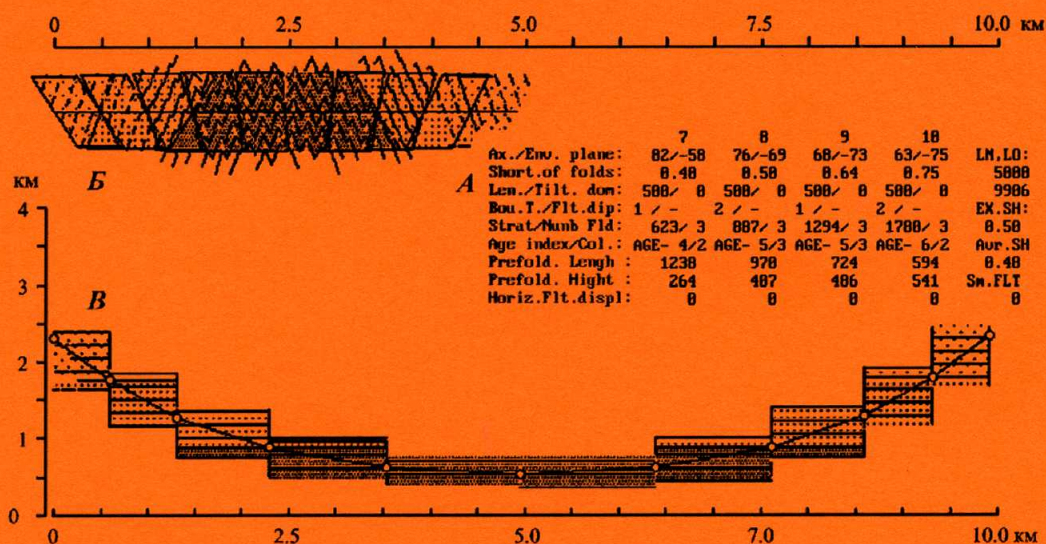


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. Шмидта
 РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Ф.Л. Яковлев

РЕКОНСТРУКЦИЯ СКЛАДЧАТО-РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУР В ЗОНАХ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ ПО СТРУКТУРНЫМ РАЗРЕЗАМ



Москва, 2017

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. Шмидта
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Ф.Л. Яковлев

**РЕКОНСТРУКЦИЯ
СКЛАДЧАТО-РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУР
В ЗОНАХ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ
ПО СТРУКТУРНЫМ РАЗРЕЗАМ**

Москва, 2017

УДК 551.24.035; 551.243

ББК 26.324

Я47

Яковлев Ф.Л. Реконструкция складчато-разрывных структур в зонах линейной складчатости по структурным разрезам. М.: Изд. ИФЗ РАН, 2017. 60 с. / 65 цвет. рис. и табл.; список литер. 32 назв., компакт диск

ISBN 978-5-91682-037-9

Детально описана методика балансирования структуры комплексов линейной складчатости по «геометрии складчатых доменов» для структурных разрезов. Такие сбалансированные разрезы строятся для трех стадий развития структуры: доскладчатой, постскладчатой и посторогенной (современной). Балансирование структуры проводится для условий постоянства объема всего осадочного чехла хинтерланда (10–15 км мощности) с учетом величины ее соскладчатого горизонтального сокращения. Текст описания сопровождается полным набором структурных материалов, всех компьютерных программ, файлов таблиц Excel для вычислений и т.д. Все объяснения основного метода делаются на примере трех первичных структурных профилей через одну из складчатых зон Большого Кавказа. В складчатой структуре выделяются объекты нескольких иерархических уровней – «складки» (ширина 10–500 м), «складчатые домены» (0.5–2 км), «структурные ячейки» (5–7 км), «тектонические зоны» (10–30 км), которые связаны с определенным объемом охватываемой ими слоистой среды. Описаны требования к исходному природному материалу, который используется в методике, показаны процедуры замеров основных параметров структуры в «складчатом домене», даны теоретические основы методики и основные операции восстановления параметров доскладчатого домена, объединения этих материалов в объеме всего осадочного чехла (для «структурных ячеек»). Объяснены операции определения величины горизонтального сокращения, глубины кровли фундамента, объема размытых пород верхней части чехла и амплитуды неотектонического поднятия для «структурных ячеек». Продемонстрированы возможности построения квази-трехмерных моделей структуры складчатого осадочного чехла для трех стадий развития на основе этих материалов.

Книга предназначена для самостоятельного освоения метода балансирования складчатой структуры структурными геологами и тектонистами. Она может быть использована также в курсах повышения квалификации геологов, для обучения студентов старших курсов и аспирантов по предметам «структурная геология» и «геотектоника».

Yakovlev F. L. Reconstruction of folded and faulted structures in zones of the linear folding using structural cross-sections / Moscow: Published in IPE RAS, 2017, 60 p. / 65 color figures and tables; references, 32 titles, compact disk (in Russian)

The technique of balancing (restoration) of structure of the linear folded systems by "the geometry of folded domains" for structural cross-sections is described in details. Such balanced cross-sections are created for three stages of development of structure: for pre-folded, post-folded and post-mountain-building (present day). Balancing of structure is carried out for conditions of a constancy of volume of sedimentary cover of a hinterland (10-15 km of thickness), taking into account the value of its fold-related horizontal shortening. The text of description is accompanied by a full package of structural materials, all computer programs, of files of the Excel tables for computation, etc. All explanations of technique are made on the example of initial natural structural materials, which are presented by three profiles across one of folded zones of Greater Caucasus. In the folded structure, the objects of several hierarchical levels are distinguished, such as "folds" (of 10–500 m width), "folded domains" (0.5–2 km), "structural cells" (5–7 km), "tectonic zones" (10–30 km). These levels are tied to a certain volume of the layered medium embraced by them. Requirements to the initial natural material, which is used in a technique, are described. Measurements of key parameters of structure in "the folded domain" are shown. Theoretical bases of a technique and all main restoration operations of parameters of the pre-folded domain, an aggregation of these pre-folded domains in volume of entire sedimentary cover (for "structural cells") are explained. Calculation operations of value of horizontal shortening, depth of top of the metamorphic basement, a volume of eroded rocks of the upper part of a sedimentary cover and amplitude of neotectonic uplift for "structural cells" are explained. Possibilities of creation of quasi-3D models of structure of a folded sedimentary cover are demonstrated based on these materials. Such models were created for three stages of structure development.

The book is intended for independent leaning of the method of folded structure restoration by specialists in structural geology and tectonics. It may also be used for advanced training courses for geologists, students and graduate students in the courses "structural geology" and "geotectonics".

ISBN 978-5-91682-037-9

© Институт физики Земли РАН

© Ф.Л.Яковлев

1. Введение

Основная цель написания настоящей работы состоит в ознакомлении всех желающих с общими идеями и технологией метода балансирования структурных разрезов сложных складчатых структур внутренних районов складчато-надвиговых поясов. Выбранная форма изложения в виде инструкции пользователя дает также возможность тестирования метода квалифицированными исследователями. Подробное изложение материала, а также доступность всех необходимых программных средств и исходных структурных материалов на прилагаемом компакт-диске и на Интернет-ресурсе, указанном в конце книги, позволяет использовать данную книгу в учебных целях в курсах структурной геологии и тектоники.

Начальная структурная информация для реконструкции складчато-надвиговой региональной структуры должна представлять собой хорошо зарегистрированную складчатую и разрывную структуру (т. е. – ее документированную геометрию) вдоль линии профиля, который пересекает большие блоки структуры или весь хинтерланд в мобильном поясе. В качестве теоретической основы метода используются идеи определения типа и величины деформации в многогранной структуре [Яковлев, 2008а]. Главным методом восстановления структуры или составления сбалансированных поперечных сечений в масштабе всего осадочного чехла является метод «геометрии складчатых доменов» [Яковлев, 1987, 2009, 2012, 2015а, 2015b]. Ожидаемые результаты действий исследователя в рамках описанного метода – это складчато-надвиговая структура в доскладчатом и в современном видах; величина сокращения для частей структурных разрезов (в масштабе «структурных ячеек»); предсказание (прогноз) продолжения современной структуры на глубину (данные по глубине кровли фундамента в масштабе «структурных ячеек» или для всего осадочного чехла) и в «воздухе», а именно – «виртуальная» или теоретическая мощность той части осадочного чехла, которая была размыта в ходе складкообразования и неотектонического подъема структуры.

Изложение метода дается на конкретном природном структурном материале, представленном тремя структурными профилями в масштабе 1:100000, составленными автором [Яковлев, 1997] в Чиатурской тектонической зоне Большого Кавказа (Южная Осетия и Северная Осетия). Материал является частью набора 24 структурных профилей, расположенных в трех регионах Большого Кавказа [Яковлев, 2015а]. Имея в виду прежде всего методические цели исследования, данные о структуре и истории развития Чиатурской зоны и всего Большого Кавказа здесь не приводятся и не обсуждаются. Этот хорошо известный материал изложен в ряде работ [Милановский, Хаин, 1963; Милановский, 1968; Яковлев, 1987, 1997, 2012, 2015а; Шолпо и др., 1993; Леонов, 2007; Saintot et al., 2006]. Получаемые результаты, имеющие вид ряда численных параметров, могут быть использованы для исследования геодинамических процессов формирования структур, например, Большого Кавказа [Яковлев, 2015а; Яковлев, Горбатов, 2016; Яковлев, Сорокин, 2016], но в данной работе также не ставились цели обсуждения этих перспектив.

2. Требования, предъявляемые к первичному структурному материалу

Описываемый метод применим к складчатой структуре внутренних частей мобильных поясов: это должны быть блоки мелких интенсивных складок хинтерланда, но не крупные складки и надвиги форланда или предгорных прогибов. Тип осадочных пород – флишевые или флишеподобные осадочные толщи большой мощности (толщина ритмов – 0.2–1–5 метров; терригенный, терригенно-карбонатный и карбонатный флиш, полная мощность осадочного чехла до 10–15–20 км). В структурах возможно одновременное существование нескольких порядков складок

(размерами 100 метров – 10 м – 1 м); возможна также определенная степень фрактальности (самоподобия) складок. Важным свойством структуры является морфология типичных единичных складок, обычно мелких: они должны быть «подобными», что означает сохранение их формы далеко вверх и вниз по стратиграфическому разрезу. Именно к ним применима концепция «эллипсоида деформаций». Если в структуре встречаются крупные складки «параллельного» облика, при котором разные слои расположены по частям окружностей разного радиуса, но с единым центром, то к ним должны применяться особые процедуры измерения величины сокращения.

Характер обнаженности структуры на местности и степени изученности региона (детальность изученности стратиграфии и точность отражения структуры на геологической карте) должен давать возможность наблюдать и подробно документировать большие складки шириной 1–2 км. Структурные разрезы начального, рабочего масштаба 1:10 000 или 1:50 000 должны быть построены на основе многочисленных измерений основных элементов складок и разрывов непосредственно в поле, но не по геологической карте с редкими элементами наклона слоистости. Количество измерений должно быть достаточно, чтобы при измерениях структурных элементов в конкретных складках по профилю на бумаге была гарантия, что структура была построена согласно полевым данным, а не согласно гипотетическим представлениям о структуре региона автора профиля. Геологические карты в редких случаях могут использоваться в качестве источника информации – если хорошая детальность стратиграфической колонки позволяет отражать главные черты структуры в складках и разрывах на геологической карте. Для этого ширина типичных складок должна быть больше, чем мощность типичного стратиграфического подразделения. Приблизительное отношение структурных элементов при общей мощности осадочного чехла в 10–15 км должно быть следующим: от 1 до 5 складок формируют «домен» с современной шириной 0.3–2 км, 3–7 доменов могут быть объединены в «структурную ячейку» с современной шириной 3–7 км, 2–5 структурных ячеек образуют «тектоническую зону» 10–30 км шириной. От двух или трех до пяти тектонических зон могут участвовать в структуре «складчатой системы» типа Большого Кавказа [Яковлев, 2008а, 2015а, 2015б].

3. Главные стадии получения результатов – составление сбалансированного разреза и создание трехмерных моделей деформированного осадочного чехла

- А.** Сбор структурного материала в поле или по литературе, включая создание стратиграфической модели тектонической зоны или моделей частей тектонической зоны.
- Б.** Выбор границ доменов в структурном пересечении. Дается список видов границ для используемой компьютерной (PC) программы.
- В.** Сбор измерений структурных параметров домена и их усреднения при помощи таблицы Excel (DOMAIN-1.XLS).
- Г.** Начальная стадия работы с PC программой (описанию программы посвящен раздел 5 исследования). Подготовка файла с исходными данными для PC программы на основе измерений параметров. Описание основных частей файла с данными. Заполнение файла с данными путем редактирования в Notepad и создание файла во время работы PC программы. Определение первичных начальных глубин входных точек (для первой точки разреза и для всех точек после разрывов) при помощи первоначальных стратиграфических моделей.

- Д. Объяснение операций ядра программы – восстановление доскладчатого состояния домена, оценки величины смещения разрыва.
- Е. Получение первой, предварительной версии результатов вычисления; описание главных целей и вариантов балансирования с использованием основной стратиграфической модели. Иллюстрация работы РС программы на примере материалов поперечного сечения № 12 «Кешельта» (см. раздел 5 исследования).
- Ж. Выбор структурных ячеек в доскладчатом пересечении. Изложение принципов такого выбора и описание ячеек в структуре поперечного сечения «Кешельта».
- З. Формирование окончательной стратиграфической модели для каждой структурной ячейки.
- И. Финальное составление (вычисление) сбалансированного поперечного сечения.
- К. Объяснение общих целей дальнейших действий при создании складчато-разрывной структуры, которая сбалансирована по объему осадочного чехла и по величинам его деформаций. Вычисление величины сокращения для структурных ячеек. Расчет средней высоты рельефа для ячеек. Расчет средней глубины линии разреза в стратиграфической модели. Расчет новой мощности осадочного чехла после сокращения и образования складчатости. Расчет глубины кровли фундамента, амплитуды эрозии и амплитуды «неотектонического поднятия».

4. Основные особенности метода на подготовительных стадиях работы

4.1 Сбор структурного материала в регионе

Сбор структурного материала в регионе - очень важная стадия работы, так как начальный структурный материал по морфологии складчатых комплексов должен быть как можно ближе к природной геометрии без влияния на него любых теоретических идей. Главные условия для структуры как объекта исследования среди других параметров - наличие геологической карты масштаба около 1:100 000, стратиграфической колонки с обычными стратиграфическими подразделениями около 0.2–1.0 км мощности, хорошее качество и количество обнажений, и возможность использования долин, направленных вкост простирания структуры. Во время маршрута вдоль долины реки или вдоль дороги, геолог находит в обнажениях относительно небольшие структуры, такие как залегание флишевой слоистости, замки складок и поверхности разрывов. Необходимо зарисовать их в удобном масштабе в полевом дневнике, определить на этом рисунке важные пункты для измерений геометрии складок и произвести все эти измерения только в обнажениях (рис. 1А).

Местоположения этих коротких пересечений должны быть зафиксированы на топографической карте и/или иметь внутри измеренные расстояния с целью точного воспроизведения пропорций структуры при вычерчивании ее на бумаге. Топографическая карта используется для составления основы поперечного сечения как линии разреза вдоль долины или вдоль дороги с вертикальными высотами и с некоторым пространством для рисунка структуры вдоль склона долины. Высота этого пространства составляет приблизительно 0.2-1 км для горных регионов. На следующей стадии, используя геологическую карту, стратиграфическую колонку и другие материалы, должен быть определен возраст всех групп литологических комплексов, а также их положение относительно морфологических элементов складок и разрывов.

Эти зарисовки должны быть объединены как части всего структурного пересечения в определенном масштабе (предпочтительно 1:10 000). Прорисовка профиля должна быть сделана с использованием всех измерений геометрии складок (рис. 1Б). Описанный метод составления поперечных сечений неоднократно

вверх и вниз по стратиграфическому разрезу почти в неизменном виде. Крупные складки «параллельного» морфологического типа, в которые сминается заметная часть осадочного чехла, вызывает сложности [Коннов, Войтенко, 2013]. Объяснение причин этого и предложения по возможному методу восстановления таких складок даются в конце книги, в разделе 8.

Самые важные свойства таких доменов – это одинаковые или близкие значения наклона осевых поверхностей складок и углов между крыльями складок (рис. 3А, Б). Если вдоль профиля наблюдается существенное изменение одного из этих параметров, то это место может быть выделено как граница следующего домена. Поверхности больших разрывов и границы между стратиграфическими или литологическими подразделениями также могут быть выделены как границы. Помимо этого, критерием выделения границ доменов может быть условие

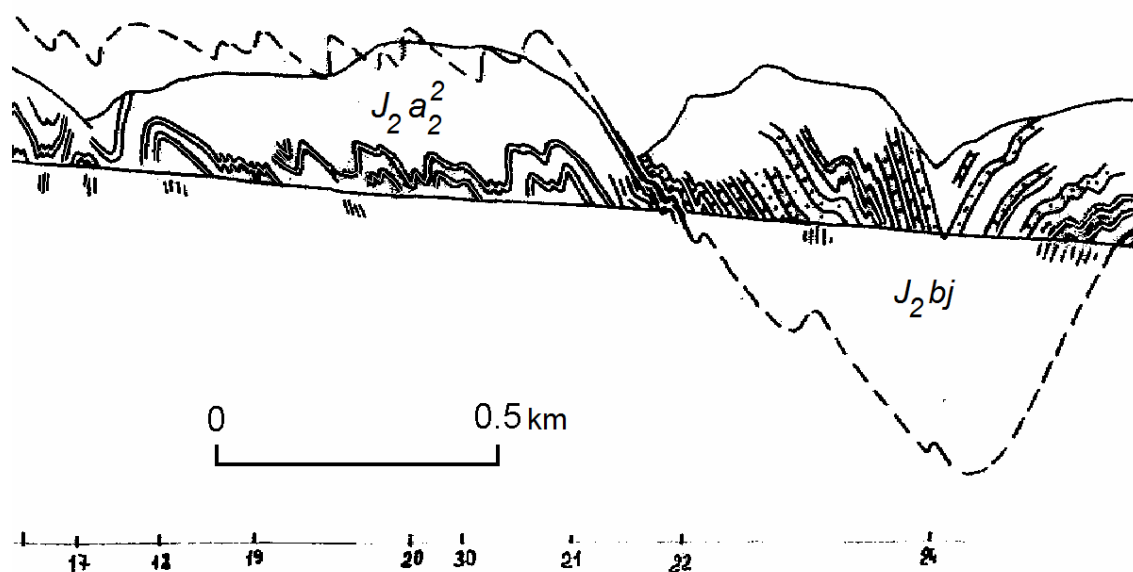
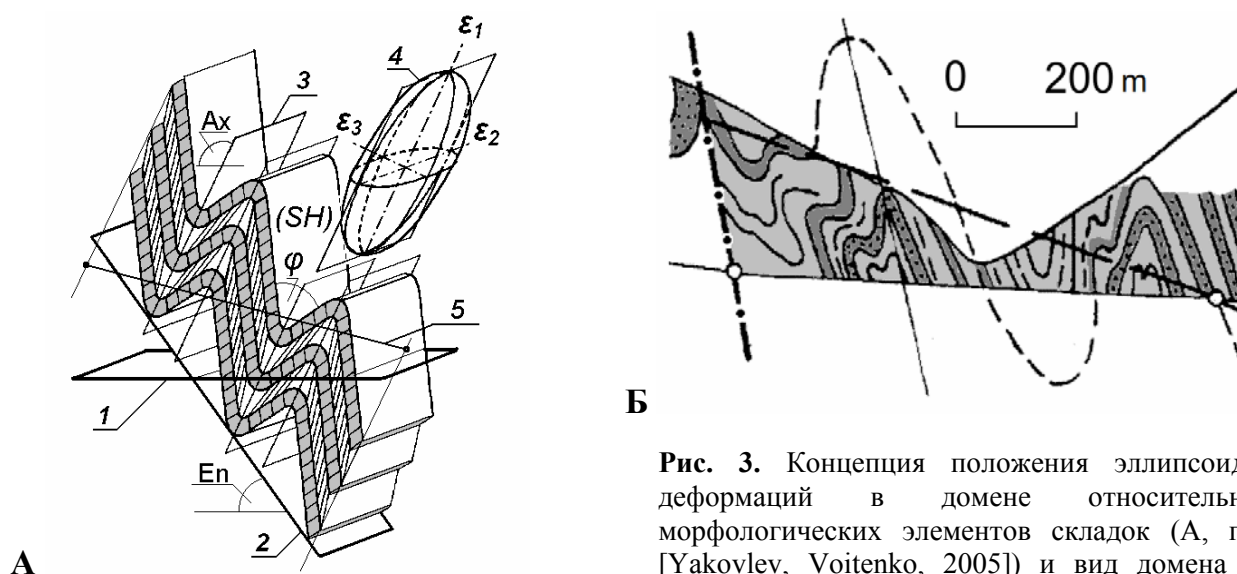


Рис. 2. Характер отражения природной структуры в составленном пересечении: очень хорошо наблюдается сочетание маленьких и больших складок. Река Кудиалчай, западный Азербайджан, приблизительно 1–2 км на север от перевала Салават главного горного хребта Большого Кавказа. Дается по [Яковлев, 2015а, стр. 130, рис. 2-21], разрешение на использование части этого разреза от автора разреза, Е.А. Рогожина, имеется.



Б

Рис. 3. Концепция положения эллипсоида деформаций в домене относительно морфологических элементов складок (А, по [Yakovlev, Voitenko, 2005]) и вид домена в природной структуре (Б, по [Yakovlev, 2012]).

приблизительно равного объема разных доменов вдоль структурных разрезов. Точки границ доменов должны быть отмечены на линии профиля. Как правило, такую точку удобно ставить на линии уреза воды, но допустимо ее положение в любом месте в пределах полосы обнажений в борту долины, имеющей обычно высоту 100–500 метров. Выше и ниже линии разреза в этом домене, должны быть проведены линии, параллельные осевым поверхностям складок, которые представляют собой линии границ домена (Рис. 4А, красные линии). Все измерения параметров домена должны быть сделаны в пространстве между этими линиями. Обоснование этого варианта проведения границ домена будет дано ниже, в части 5 (рис. 20).

4.3 Сбор измерений параметров геометрии доменов и их усреднение при помощи таблицы EXCEL («DOMAIN-1.XLS»)

Элементы геометрии структуры, которые необходимы для восстановления доскладчатого состояния домена и которые связаны с эллипсоидом деформации, должны быть измерены. Длина сегмента линии профиля и ее падения относительно горизонта измеряются в метрах и в градусах (L , α) (рис. 4Б, красная линия). Для измерения наклона плоскости зеркала складок один из слоев в домене должен быть продолжен в обоих направлениях до пересечения с границами домена. Затем через

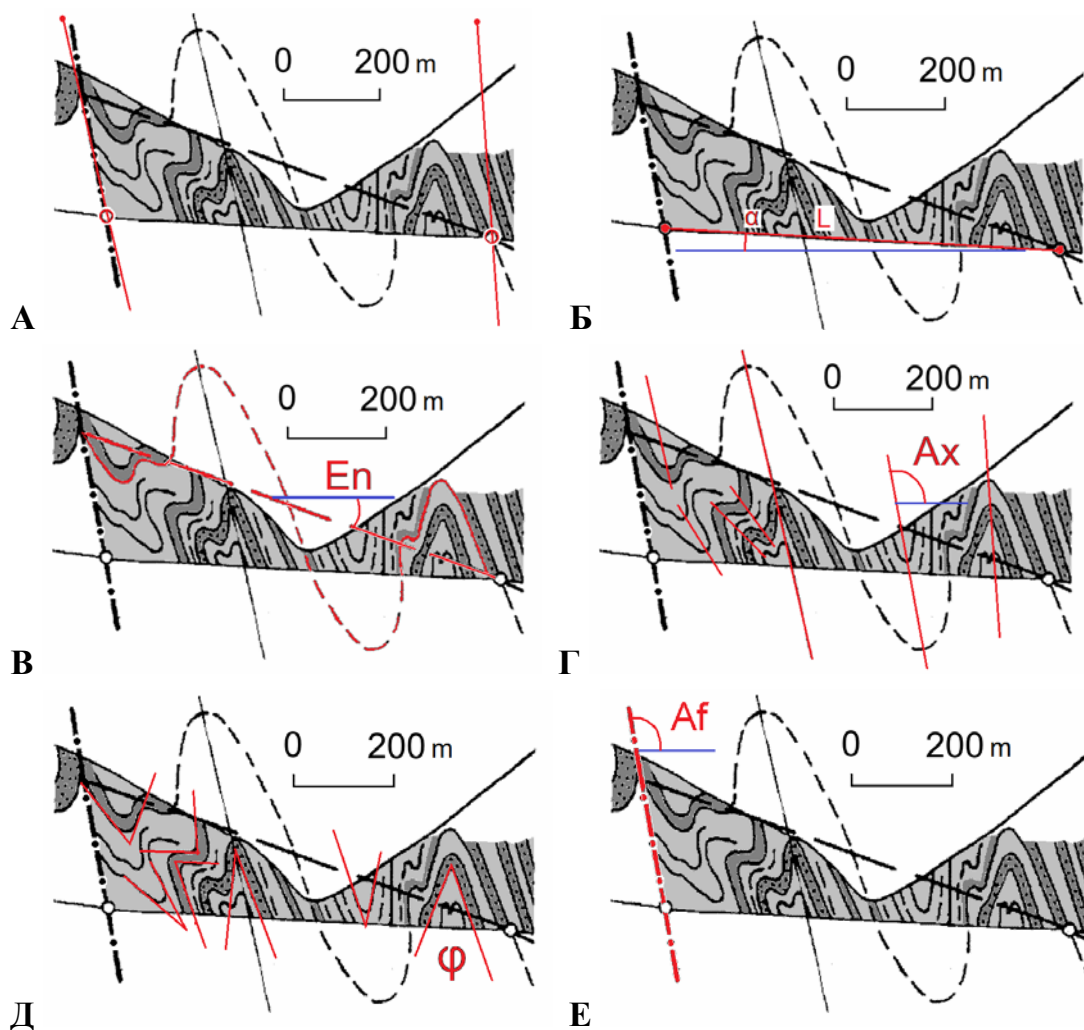


Рис. 4. Параметры морфологии доменов (использован рисунок из [Yakovlev, 2012], fig. 10b). А – границы домена; Б – сегмент линии профиля (L , α , длина и наклон сегмента); В – плоскость зеркала складок и ее падение (EN); Г – осевые плоскости складок и их падения (AX); Д – углы между крыльями складок (ϕ , SH); Е – плоскость разрыва и ее падение (AF).

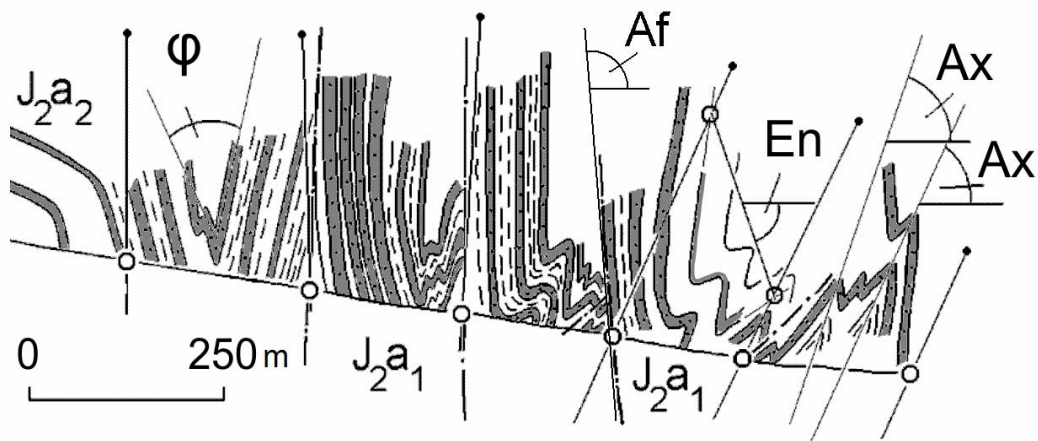


Рис. 5. Последовательность нескольких доменов в природном разрезе с элементами их геометрии (по [Yakovlev, 2012], с изменениями).

точки «входа» и «выхода» этого слоя на границах доменов необходимо провести прямую линию. Наклон этой линии (EN) является «наклоном зеркала складок» (рис. 4В, красный слой и линия) или, если совсем точно, наклоном линии первоначальной слоистости. В тексте ниже будет использоваться более привычное, но не совсем точное понятие «наклоном зеркала складок». Должны быть измерены наклоны осевых поверхностей почти всех складок. Для этого необходимо провести прямые линии через замки нескольких складок. Наклоны этих линий относительно горизонта (АХ, относительно линии, направленной, например, на север, это направление используется в том числе и для других измерений) должны быть измерены как падения осевых плоскостей складок (рис. 4Г). Измеренные наклоны для нескольких складок усредняются; метод определения среднего будет показан ниже. Полученный наклон осевой плоскости соответствует ориентировке продольной оси эллипса деформаций (в предположении, что линейные складки имеют 2D, плоскую деформацию; т.е. деформация вдоль шарнира отсутствует). Углы между крыльями складок почти всех складок в домене также измеряются. С этой целью во многих складках проводятся две пересекающиеся линии для прямолинейных частей крыльев; угол между ними (ϕ) измеряется (рис. 4Д, красные линии). Эти углы должны быть преобразованы в величину укорочения (SH) в перпендикулярном направлении к осевой плоскости; это отражает длину короткой оси эллипса/эллипсоида деформации. Формулы и способ определения среднего будут показаны ниже. Если граница домена проходит по разрыву, то наклон плоскости смещения (AF) этого разрыва также должен быть измерен (рис. 4Е). На примере части профиля показаны (рис. 5) некоторые домены с измеренными элементами геометрии этих видов структур.

Существуют два способа измерения: вручную, используя изображение на бумаге, и с применением процессора «AutoCAD» (Autodesk, Inc.). Для «бумажной» версии для рисования необходимых дополнительных линий, а также измерений углов и расстояний используют два листа с изображением структуры в определенном масштабе: 1) для измерения L и α – длины и наклона линии профиля для каждого домена; для измерения EN; и для измерения углов между крыльями складок (ϕ , SH), 2) для измерения параметров AX и AF (рис. 6). Каждое измеренное значение AX должно быть записано на бумаге под доменом (для контроля) и затем должно быть помещено в таблицу «DOMAIN-1.XLS» (ПО Microsoft Office Excel) (рис. 7). В той же таблице в левой части собираются все данные параметров доменов (рис. 8). В столбцах «А» и «I» показан порядковый номер домена. Желтые столбцы В, D, F содержат результаты

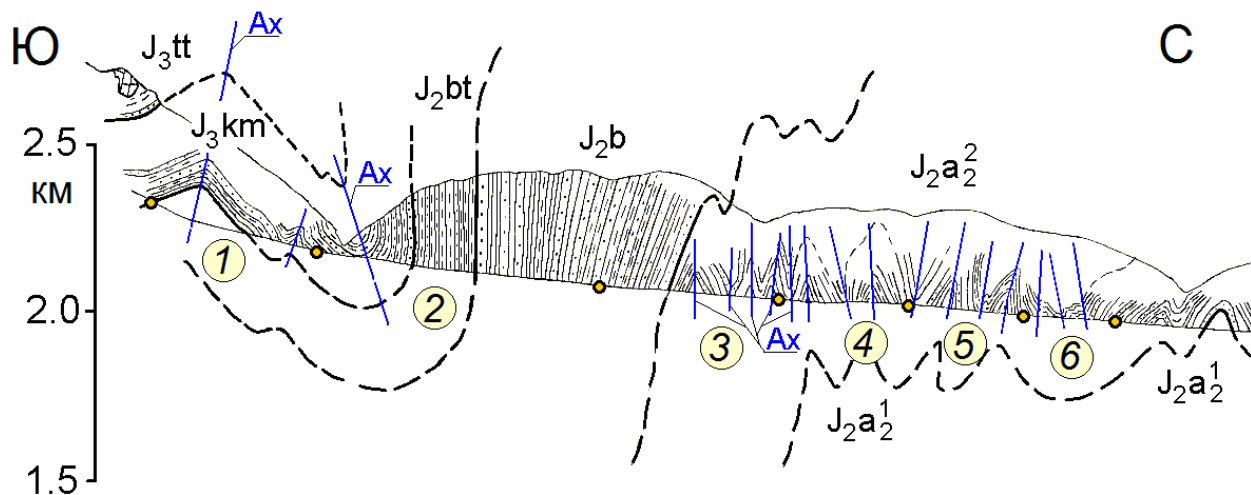


Рис. 6. Последовательность нескольких доменов в природном разрезе с линиями осевых плоскостей в доменах, наклоны которых должны быть измерены и затем усреднены (по [Яковлев, 2015а], рис 6-18Г, с изменениями). Показана часть разреза 7 «Агчай» Тфанской зоны. (Разрешение автора профиля, Е.А. Рогожина, на публикацию этой части разреза имеется).

5										
TFAN-zone										
calculation of average values 1-32										
1	AX	an-flank	SH	2	an-flank	SH	AX	an-flank	SH	3
	80	105	0,794	106	40	0,342	92	48	0,407	
	75	84	0,669				90	30	0,259	
	74	110	0,819				92	28	0,242	
							92	30	0,259	
							88	40	0,342	
	76		0,761	106		0,342	91		0,302	
4	AX	an-flank	SH	5	an-flank	SH	AX	an-flank	SH	6
	94	18	0,157	81	40	0,342	87	40	0,342	
	94	15	0,131	80	35	0,301	102	65	0,538	
	104	28	0,242	80	30	0,259	100			
	94	35	0,301	82	26	0,225				
				74						
	97		0,207	79		0,282	96		0,440	
7	AX	an-flank	SH	8	an-flank	SH	AX	an-flank	SH	9
	79	57	0,477	101	60	0,500	107	59	0,493	
	90	80	0,643	103	57	0,477	114	85	0,676	
	87	57	0,477	98	60	0,500	92	60	0,500	
				99			85	60	0,500	
							88	94	0,732	
	85		0,533	100		0,493	97		0,580	
10	AX	an-flank	SH	11	an-flank	SH	AX	an-flank	SH	12

Рис. 7. Часть таблицы Excel «DOMAIN-1.XLS» с усреднением параметров AX и SH. Красные прямоугольники для доменов 3, 4, 5, 6 отражают данные измерений по структуре на рис. 6. Густым синим цветом XLS-ячеек (и оранжевый для 5) показано среднее значение от выше расположенных XLS-ячеек. XLS-ячейки «an-flank» показывают данные угла между крыльями складок; каждое это значение было преобразовано до SH ($SH = \sin(\varphi/2)$) в смежной XLS-ячейке. Значения SH были усреднены (значения внизу).

прямых измерений. Длина линии профиля в «мм» на бумаге (столбец В) преобразована до реальных метров (столбец С) согласно масштабу бумажного изображения (ячейка С1). Столбцы Е и G содержат усредненные данные AX и SH для домена (см. рис. 7). Если первая точка домена совпадает с плоскостью разреза, ее измеренный наклон отражается в столбце Н. Эта часть таблицы данных (рис. 8) используется для подготовки файла данных «*.BCS» для программы РС «CROSS-B4.EXE». Файл «DOMAIN-1.XLS» может использоваться в качестве формы для стандартной работы с любыми другими разрезами. Для этой цели данные доменов 26-33 как «ячейки с формулами» должны быть скопированы в 1-25. Ниже этих данных каждая ячейка (для AX, an-flank, SH) без результатов измерений должна быть замещена «пустой» ячейкой вместо ячейки с формулами, иначе возникнет ошибка отображения данных.

Файл с данными для программы РС «CROSS-B4.EXE» имеет следующую структуру («KESH-12.BCS»). Первая строка содержит название профиля (KESHDELTA, река), масштаб экрана (1000 м/см), положение первой точки изображения современного профиля на части экрана (между 0 и 1; 0.7), глубина верхней точки масштабной линейки (вертикальная шкала) для изображения доскладчатого состояния (-3000), количество доменов (26):

KESHDELTA , 1000 0.70 -3000 26

Вторая и следующие строки имеют 11 параметров, нужных как для вычислений, так и в качестве вспомогательных. Первые колонки (1-5) содержат данные для

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		profil 1, мм	19,9203							5
2	domen N	domen L-ini	L, metr	domen An	Axial An	Envel An	short	fault-An	domen N	TFAN-zone
3	1	25,6	510	-16	76	-23	0,761		1	1
4	2	42,6	849	-6	106	61	0,342		2	
5	3	26,4	526	-4	91	70	0,302		3	
6	4	19,4	386	-2	97	-34	0,207		4	
7	5	17,1	341	-3	79	-20	0,282		5	
8	6	12,2	243	-3	96	-4	0,44		6	
9	7	19,2	382	-4	85	23	0,533		7	
10	8	17,6	351	-3	100	-22	0,493		8	
11	9	18,2	363	-3	97	25	0,58		9	
12	10	19,8	394	-3	104	-7	0,462		10	
13	11	20,1	400	-2	78	-24	0,359	91	11	4
14	12	16,7	333	-3	77	-23	0,436		12	
15	13	26,8	534	-2	79	-50	0,441	91	13	
16	14	27,2	542	-3	59	-25	0,472		14	
17	15	16,1	321	-2	77	-70	0,399		15	
18	16	18,2	363	-3	57	-70	0,427		16	
19	17	29,0	578	-2	68	-8	0,538	89	17	
20	18	51,6	1028	-2	72	11	0,595		18	
21	19	16,0	319	-1	101	9	0,887	90	19	
22	20	17,3	345	-3	87	-56	0,208	92	20	
23	21	15,7	313	-2	87	-74	0,208		21	7
24	22	22,4	446	-1	68	30	0,422	90	22	
25	23	25,9	516	-2	45	-22	0,574		23	
26	24	35,5	707	-2	76	18	0,572		24	
27	25	57,5	1145	-2	78	-4	0,866		25	

Рис. 8. Таблица для сбора всех параметров доменов в файле «DOMAIN-1.XLS». Красные прямоугольники показывают средние величины из таблицы рис. 7.

реконструкций домена из колонок E, F, G, C, D «DOMAIN-1.XLS» (рис. 8). Колонка 6 является вспомогательной, здесь указан тип границы (1 – тот же самый раздел стратиграфии, 2 – следующий или другой раздел, 3 – разрыв). В колонке 7 находится угол наклона плоскости разрыва, если такой разрыв есть. Колонка 8 содержит глубину первого домена и каждого домена после разрыва. Другие величины в колонке 8 представляют собой результат вычислений для восстановления структуры. Колонки 9–11 содержат вспомогательные данные: 9 задает количество складок в домене для его отображения (3, обычно), 10 содержит индекс цвета стратиграфии в изображении структуры (в кодах языка BASIC), 11 содержит комментарий – возраст стратиграфического раздела и текущий номер домена (таблица 1).

Таблица 1. Параметры строк в основном массиве файла данных «KESH-12.BCS».

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AX	EN	SH	L	Tlt	Bnd	Flt	dpth	n-f	clr	commnt
95	-10	0.80	1000	-2	1	0	-5000	3	5	J2-1

Общий вид файла данных показан в таблице 2.

Таблица 2. Файл с данными для PC программы «CROSS-B4.EXE», для «KESH-12.BCS».

KESHELTA				1000		0.70	-3000	26		
95	-10	0.80	1000	-2	1	0	-5000	3	5	J2-1
118	28	0.50	2200	1	3	120	-2800	3	14	K2-2
115	60	0.52	1650	3	2	0	-3299	3	10	K1AAL-3
115	85	0.42	400	3	2	0	-4178	3	2	K1H2B4
110	70	0.45	1500	3	2	0	-4511	3	3	K1H15
115	88	0.48	750	1	2	0	-5477	3	11	K1V26
115	-35	0.48	1650	1	1	0	-6269	3	11	K1V27
117	-25	0.45	1500	7	2	0	-5338	4	3	K1H18
122	-30	0.28	1300	9	1	0	-4757	3	3	K1H19
125	-30	0.40	1350	8	3	134	-5200	3	3	K1H1-10
118	-32	0.35	1100	16	3	125	-4200	3	2	K1H2B11
105	-17	0.55	650	30	2	0	-3628	3	10	K1APAL12
120	35	0.35	750	-11	1	0	-3319	3	10	K1APAL13
118	-35	0.40	650	-10	3	120	-4150	3	2	K1H2B14
105	-10	0.55	550	-7	1	0	-3908	3	2	K1H2B15
90	45	0.55	1000	-7	3	95	-4450	3	3	K1H116
85	-65	0.30	400	-8	1	0	-5063	3	3	K1H117
85	30	0.52	1250	-7	3	80	-4850	3	3	K1H118
95	50	0.50	800	-6	2	0	-5328	3	11	K1V219
95	37	0.50	700	-6	1	0	-5797	3	11	K1V220
102	40	0.50	1000	-5	2	0	-6078	3	9	K1V121
120	-28	0.45	1500	-4	3	102	-6900	3	9	K1V122
120	30	0.40	1950	-3	1	102	-6382	3	9	K1V123
120	-18	0.40	1050	-3	3	95	-8000	3	1	J3-24
112	-30	0.30	1750	-2	1	0	-7838	3	1	J3-25
95	-20	0.30	1000	-2	3	118	-8400	3	5	J2-26

(NB!) Файл должен заканчиваться пустой строкой (последняя строка данных должна иметь знак перевода каретки) для корректного прочтения данных последнего домена программой BASIC. В противном случае возникнет ошибка чтения файла и аварийная остановка программы.

4.4 Сбор материалов о стратиграфических подразделениях

Важной идеей для получения конечного варианта 3D модели осадочного чехла является создание стратиграфической модели всего осадочного чехла. Материал для модели может быть собран из литературных источников и/или из прямых измерений стратиграфических (литологических) подразделений в поле или на разрезах на крыльях больших складок. Все мощности подразделений должны быть собраны вместе для вычисления общей мощности чехла. Затем устанавливается общая масштабная линейка для стратиграфической модели; «0» находится в верхней части колонки, тогда подошва чехла будет иметь определенную глубину (-15475 м, например). Каждое подразделение будет иметь точную глубину кровли и подошвы (табл. 3, рис. 9).

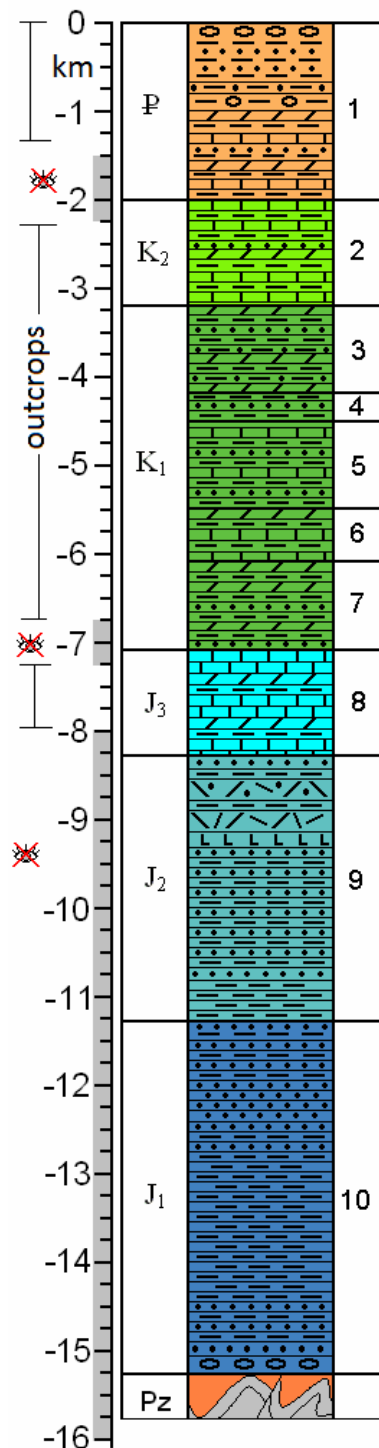


Таблица 3. Таблица мощностей и глубины подошвы для десяти стратиграфических подразделений Чиаурской зоны (номера подразделений соответствуют рис. 9):

N	age	position
1	thickness	2100
	P	sole 2100
2	thickness	1200
	K ₂	sole 3300
3	thickness	880
	K ₁ ap-al	sole 4180
4	thickness	320
	K ₁ h ₂ -b	sole 4500
5	thickness	975
	K ₁ h ₁	sole 5475
6	thickness	800
	K ₁ v ₂	sole 6275
7	thickness	1000
	K ₁ v ₁	sole 7275
8	thickness	1200
	J ₃	sole 8475
9	thickness	3000
	J ₂	sole 11475
10	thickness	4000
	J ₁	sole 15475

Рис. 9. Стратиграфическая модель для Чиаурской тектонической зоны (по [Яковлев, 2015a], рис. 6-6). Выделяются десять литологических подразделений. Литологические знаки – стандартные. Некоторые части колонки прямо наблюдались в поперечном профиле (в обнажениях), другие части были определены по аналогии с соседними зонами (обозначены серым цветом вдоль шкалы слева). Масштабная линейка на левой части использовалась для вычислений (см. также приведенную выше табл. 3).

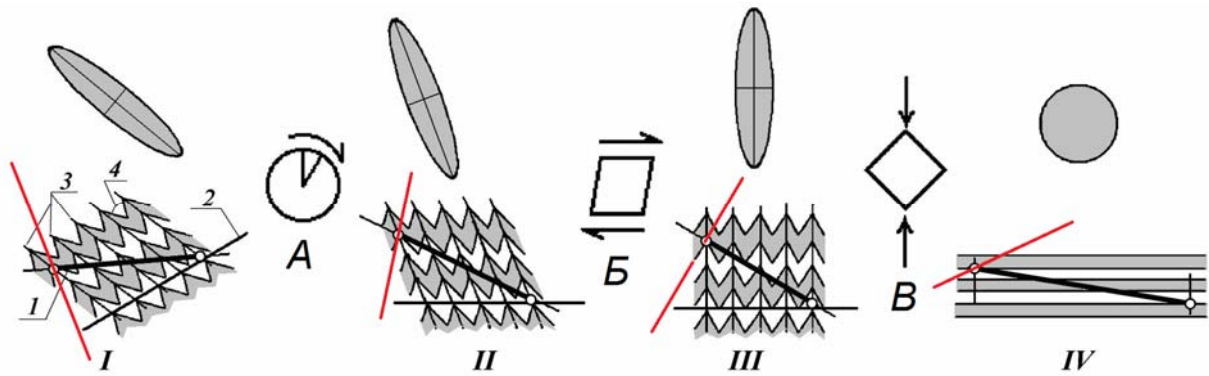


Рис. 10. Операции по восстановлению доскладчатого состояния доменов, по [Яковлев, 2008b] с изменениями. Показаны символические изображения складчатой структуры домена (1-4) для состояний от фактического (I) к доскладчатому (IV); эллипсы деформаций соответствуют тем же состояниям домена и типам операций: А – поворот (от стадии I до стадии II), Б – горизонтальной простой сдвиг (от II до III), В – растяжение (вертикальный чистый сдвиг, от III до IV). Изменения положения красной линии (того же самого вида, что и для доменов) показывают изменения наклона плоскости разрыва.

Используемые геометрические параметры домена (на стадии I):

1 – сегмент линии профиля (измеряются длина и наклон), 2 – линия плоскости зеркала складок (измеряется наклон); 3 – осевые поверхности складок (измеряется наклон); 4 – угол между крыльями складок, соответствует коэффициенту сокращения складок ($K=L1/L0$; 50% SH = 0.5 K).

4.5 Ядро компьютерной программы: преобразования параметров домена во время операций его восстановления от фактического состояния к доскладчатому

В методе и в компьютерной (PC) программе используется следующая последовательность кинематических операций (рис. 10):

1) поворот (вращение) домена как целого до горизонтального положения линии наклона первичной слоистости (то же самое – плоскости зеркала складок),

2) простой горизонтальный сдвиг до вертикального направления осевых плоскостей,

3) растяжение (чистый сдвиг) до исчезновения складок в соответствии с эллипсом деформации (до круга). Следует обратить внимание на то, что все операции производятся с отрезками линий и с эллипсом деформации, но они не имеют отношения к морфологии складок в масштабе слоя. На уровне доменов эти свойства (например – изменения мощности слоя в замке относительно крыла или длины крыльев) игнорируются, поскольку результат их анализа (величина сокращения) уже использован.

Эти операции могут быть описаны следующими формулами, которые не выходят за рамки геометрии [Яковлев, 1987; 2008b, 2009; 2015a]. Определим начальные параметры: AX_0 – наклон осевой плоскости; EN_0 – наклон линии первоначальной слоистости (плоскость зеркала складок); K_0 – коэффициент сокращения складок в направлении перпендикуляра к осевой плоскости; LS_0 – длина сегмента профиля для домена; TS_0 – наклон сегмента линии профиля; D_1 – глубина стратиграфического уровня на входе, т.е. в первой точке домена (она остается постоянной, глубина точки на выходе из домена, D_2 , вычисляется).

Операция поворота, вращения (рис. 10, А), для угла вращения $\Delta\alpha = - EN_0$; (поворот до горизонтального положения зеркала складок):

$$AX_1 = AX_0 + \Delta\alpha \quad (1)$$

$$TS_1 = TS_0 + \Delta\alpha \quad (2)$$

Величина укорочения складок и длина сегмента линии профиля при этом остаются постоянными:

$$K_1 = K_0 \text{ и } LS_1 = LS_0.$$

Операция простого горизонтального сдвига (рис. 10, Б), для угла сдвига $\Delta\gamma = 90 - AX_1$:

$$K_2 = K_1 / \sin(AX_1) \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}(TS_2) = \operatorname{tg}(AX_1) \cdot \operatorname{tg}(TS_1) / (\operatorname{tg}(AX_1) + \operatorname{tg}(TS_1)) \quad (4)$$

$$LS_2 = (LS_1 \cdot \sin(TS_1)) / \sin(TS_2) \quad (5)$$

Операция удлинения или «чистого сдвига» (рис. 10, В) для величины удлинения (укорочения складок) K_2 :

$$\operatorname{tg}(TS_3) = \operatorname{tg}(TS_2) \cdot K_2^2 \quad (6)$$

$$LS_3 = LS_2 \cdot K_2 \cdot \sin(TS_2) / \sin(TS_3) \quad (7)$$

В результате сегмент профиля приобретает следующее положение в доскладчатой среде:

$$\text{Горизонтальная длина } L_h = LS_3 \cdot \cos(TS_3) \quad (8)$$

$$\text{Вертикальная длина } L_v = LS_3 \cdot \sin(TS_3) \quad (9)$$

Соответственно, глубина слоя в точке выхода из домена вдоль профиля будет составлять:

$$D_2 = D_1 + L_v \quad (10)$$

5. Инструкции по работе с компьютерной программой

5.1 Начало работы программы. Первая страница экрана

Компьютерная программа «CROSS-B4.EXE» была написана и скомпилирована в программной среде TURBO-BASIC в 1995–1998 гг и обновлена в 2017 г. При этом в программном коде первоначально были запланированы некоторые дополнительные функции, которые потом не были реализованы. В процессе обработки вычисляется параметр среднего сокращения складок (Avg. SH), который в настоящий момент не является актуальным (он использовался ранее в других моделях). Программа рассчитывает и показывает: 1) данные параметров для восстановленных доменов; 2) символическое изображение фактической (складчатой) морфологии домена с углом между крыльями, который соответствует величине сокращения; и 3) изображение доскладчатого состояния домена. Это означает, что у исследователя есть возможность контролировать реалистичность введенных фактических данных (путем сравнения структуры на экране с фактической структурой на бумажной версии профиля) и контролировать реалистичность сочетаний полученных доскладчатых состояний в наборе доменов.

Программа может использоваться в WINDOWS 95, 98 полностью, включая использование функции «копии экрана». При использовании «CROSS-B4.EXE» в WINDOWS-XP изображения создаются, но важная функция «копии экрана» не работает. Прямое использование «CROSS-B4.EXE», скомпилированной под DOS, в более поздних версиях (WINDOWS VISTA, 7, 8, 10) не поддерживается. Для работы программы в этих операционных системах используется специальная программа «DOSBox» (смотрите Приложение 2 в конце книги).

Последовательные рисунки, показанные ниже, иллюстрируют главные стадии работы программы «CROSS-B4.EXE».

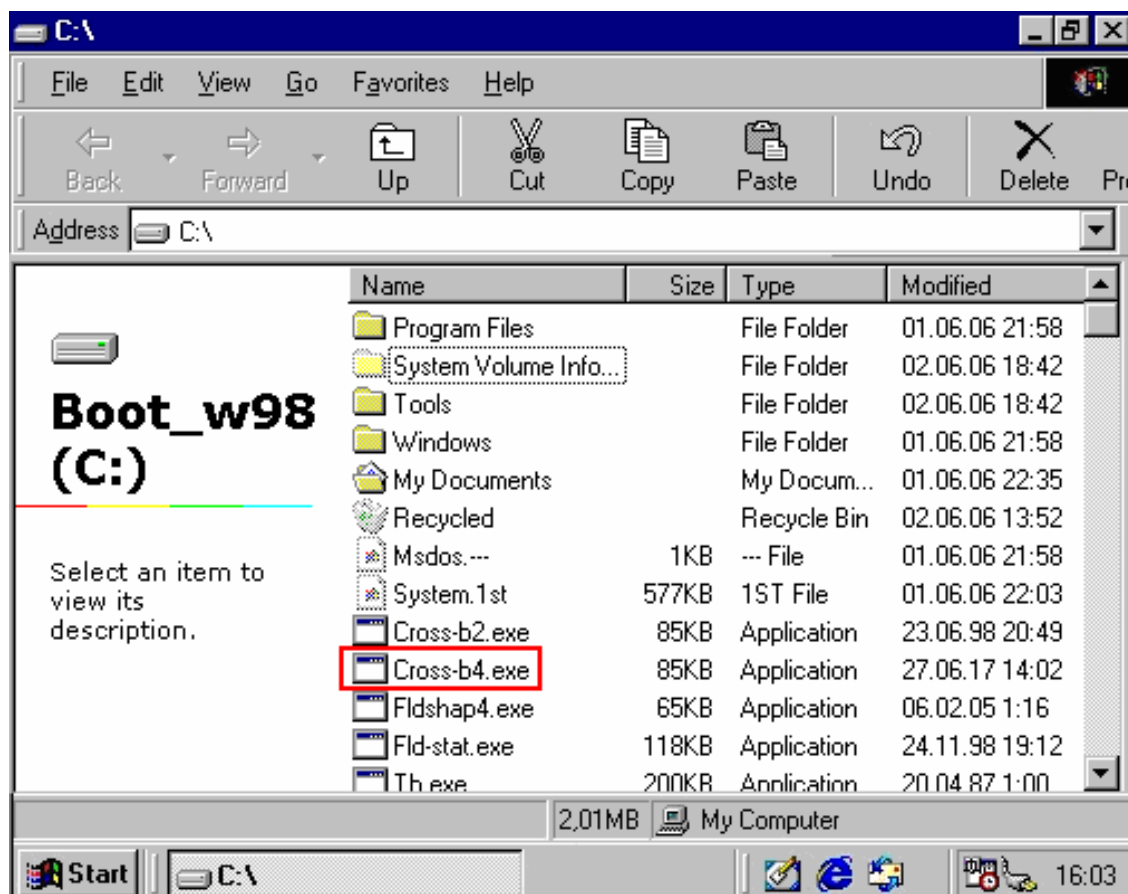


Рис. 11. Запуск программы с «Disk C:» под Window98; название программы отмечено.

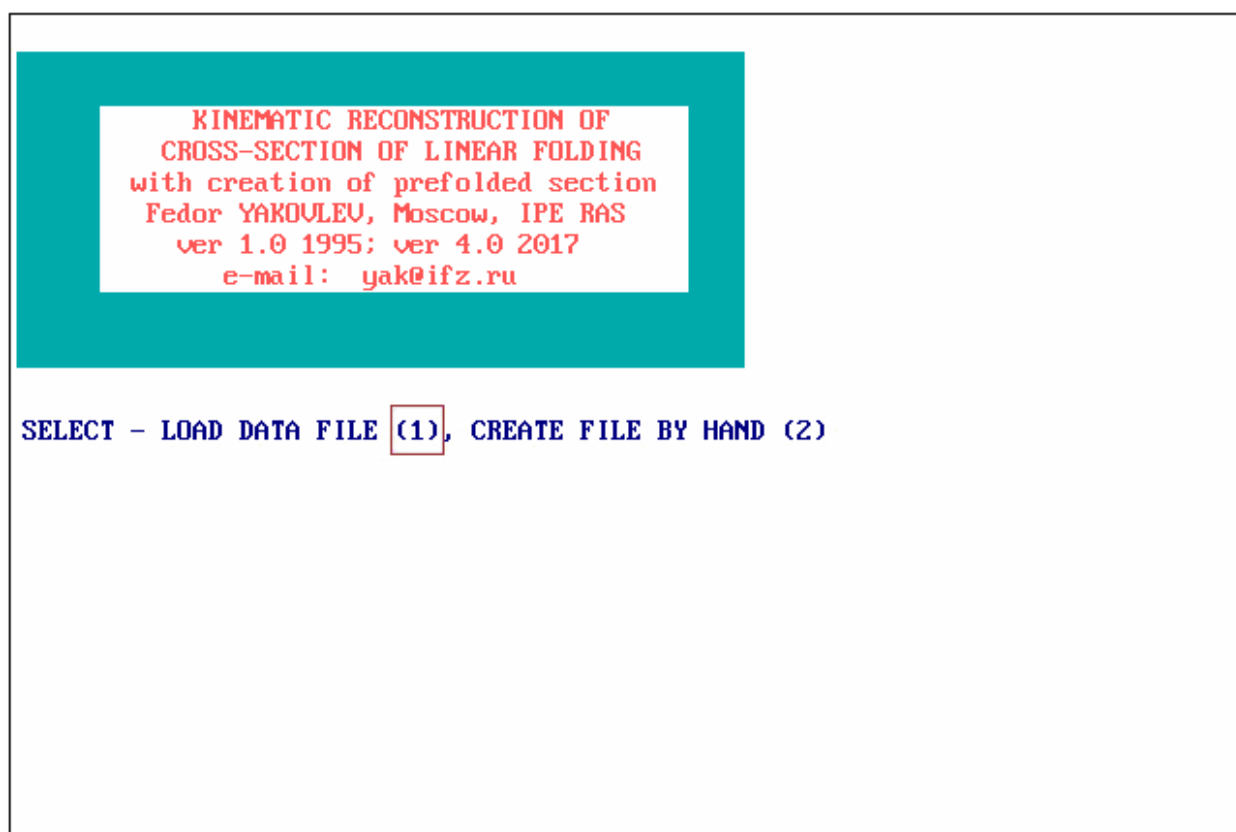


Рис. 12. Первое меню после запуска программы. Показано название PC программы «CROSS-B4.EXE» и выбор (1) дальнейших операций. Для дальнейшей работы набрать «1» и нажать «ENTER».

5.2 Процедуры загрузки файла с данными с диска, заполнения или исправления данных с клавиатуры, запись обновленного или исправленного файла с данными на диск

Ниже, в рисунках 13–41, показаны последовательные действия оператора программы.

```
BDB3A .BCS      BDB-1 .BCS      BDB-3 .BCS      BDB3C .BCS
BDB3D .BCS      BDB2 .BCS       SECSEC1 .BCS     SECSEC1A.BCS
FYI-1 .BCS      KURV-1 .BCS     BABACH7A.BCS     SECSEC1B.BCS
KARACH6C.BCS    KARACH6B.BCS    KARACH6A.BCS    KARACH6 .BCS
AGCHA5A .BCS    AGCHA-5 .BCS    FILE4 .BCS      KURV-3B .BCS
SHAL-10C.BCS    MAZA9C .BCS     FYI_1 .BCS      JIMICH8B.BCS
JIMICH8A.BCS    KUDIAL4 .BCS    RAGD_2B .BCS    MAZA .BCS
CHIAUR2 .BCS    CHIAUR1 .BCS    LIAKH-3C.BCS    LIAKH-3D.BCS
LIAKH3E .BCS    LIAKH3F .BCS    LIAKH3J .BCS    MOD3 .BCS
FILE1 .BCS      CHIAUR2K.BCS    KESH-12 .BCS
250290176 Bytes free
INSERT NAME OF FILE - ?
```

Рис. 13. Следующий экран – справка по содержанию диска «С». Выводится список файлов с данными для структурных пересечений, находящихся на «disk C:»; выбранный файл отмечен. Программа находит и показывает все файлы *.BCS, находящиеся в корне диска «С».

```
BDB3A .BCS      BDB-1 .BCS      BDB-3 .BCS      BDB3C .BCS
BDB3D .BCS      BDB2 .BCS       SECSEC1 .BCS     SECSEC1A.BCS
FYI-1 .BCS      KURV-1 .BCS     BABACH7A.BCS     SECSEC1B.BCS
KARACH6C.BCS    KARACH6B.BCS    KARACH6A.BCS    KARACH6 .BCS
AGCHA5A .BCS    AGCHA-5 .BCS    FILE4 .BCS      KURV-3B .BCS
SHAL-10C.BCS    MAZA9C .BCS     FYI_1 .BCS      JIMICH8B.BCS
JIMICH8A.BCS    KUDIAL4 .BCS    RAGD_2B .BCS    MAZA .BCS
CHIAUR2 .BCS    CHIAUR1 .BCS    LIAKH-3C.BCS    LIAKH-3D.BCS
LIAKH3E .BCS    LIAKH3F .BCS    LIAKH3J .BCS    MOD3 .BCS
FILE1 .BCS      CHIAUR2K.BCS    KESH-12 .BCS
250281984 Bytes free
INSERT NAME OF FILE - ? kesh-12.bcs
```

Рис. 14. Следующий экран. Действия: напечатать с клавиатуры название файла с расширением, нажать ENTER.

5.3 Выбор дальнейших действий, пошаговое построение структуры

В главном меню следует выбрать первую строку. Действие остальных строк в действующем варианте программы заблокировано.

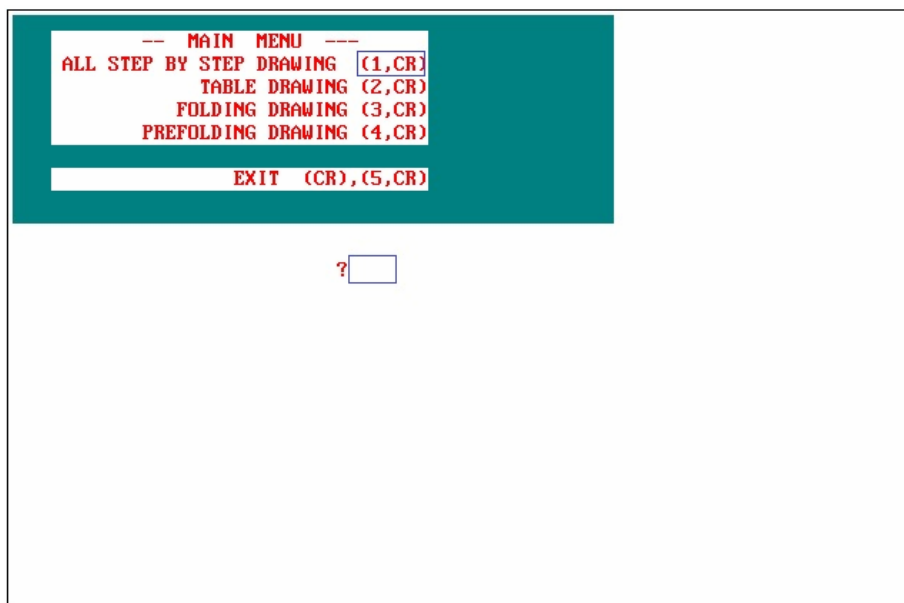


Рис. 15. Следующий экран, главное меню. Действия: напечатать с клавиатуры «1», нажать ENTER (CR). Для завершения программы при возврате в это меню нажать ENTER (CR) или (5, CR). Строки с индикацией «2–4» – нерабочие, они были зарезервированы ранее для развития программы.

5.4 Главный экран программы, демонстрация исходных данных, внесение изменений данных, построение современной/фактической складчатой структуры и доскладчатой структуры, демонстрация результатов вычислений

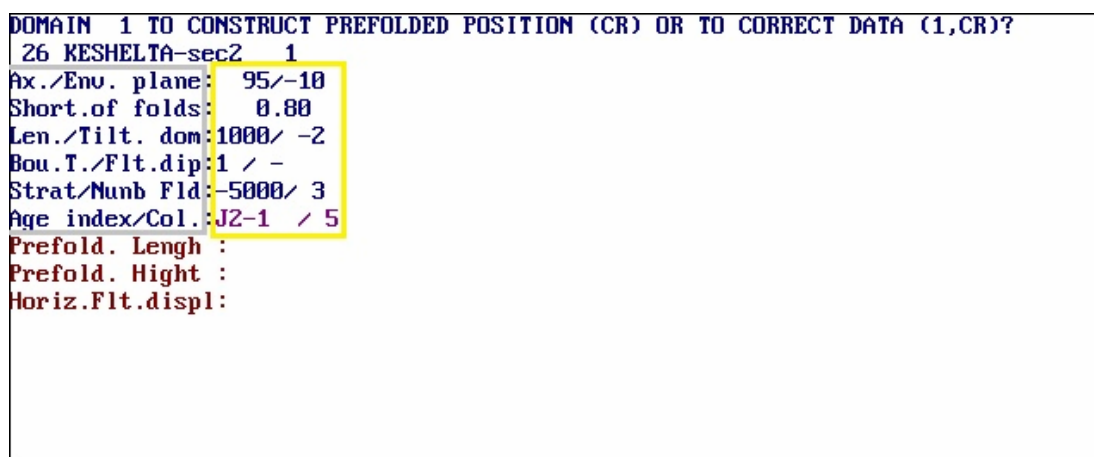


Рис. 16. Следующий экран. Первый шаг построения двух состояний профиля. Зоны экрана: список (названия) параметров (серый прямоугольник слева). Данные 1-го (текущего) домена (желтый прямоугольник); см. данные «KESH-12.BCS»; табл. 2. Первая сверху строка (DOMAIN 1...) предлагает выбор действия. Для построения структуры надо нажать ENTER (CR), для перехода к редактированию путем набора данных с клавиатуры нажать (1, ENTER). Вторая строка – общее число доменов (26) в профиле, его название (KESHELTA-sec2), номер домена (1), данные которого воспроизводятся. Три красных строки (Prefold. Lenght и др.) – основные параметры доскладчатого состояния домена, вычисляемые при построении.

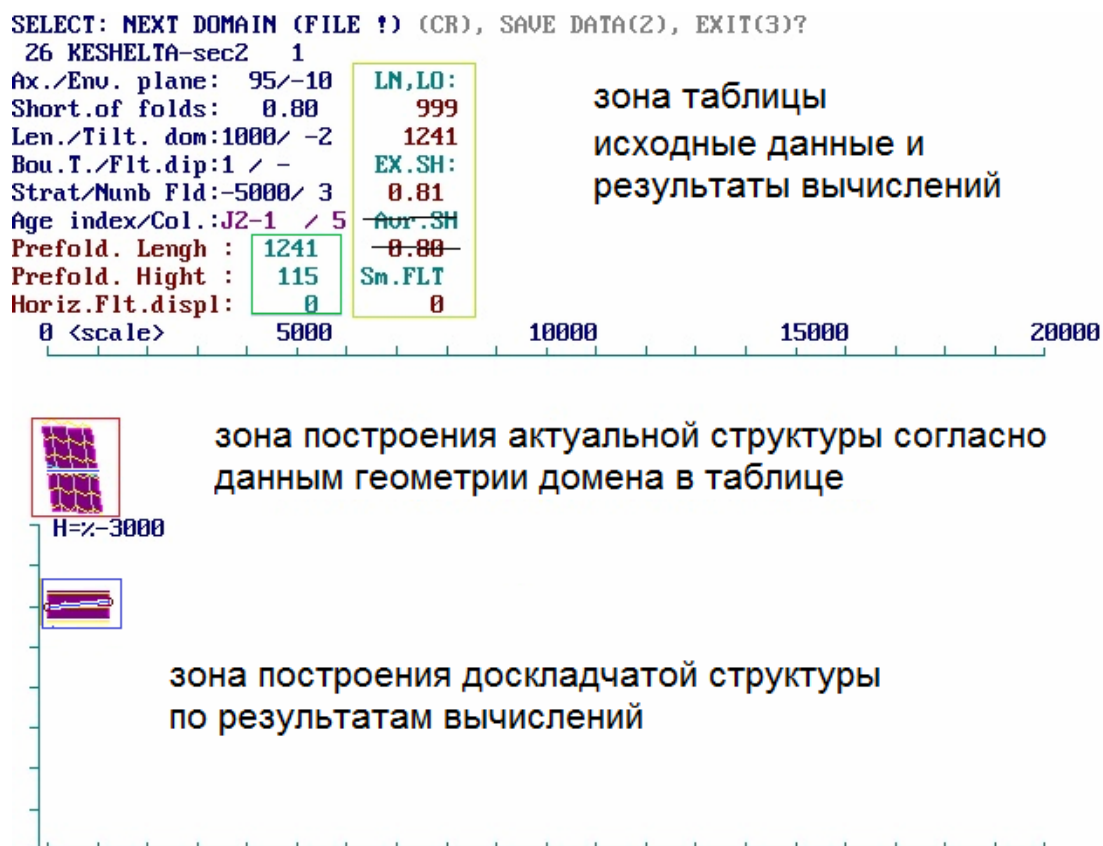


Рис. 17. Результат реконструкции первого домена (После нажатия ENTER / CR).

На рисунке 17 обозначены три зоны экрана (зона «таблицы», зоны «современной» и «доскладчатой» структур). Были построены две горизонтальные масштабные линии (0 – 20000 м) для фактической (верхней) структуры и для доскладчатой структуры (внизу). Вертикальный масштаб (тот же) дается с индикацией верхней точки (-3000 м; -11000 м для самой глубокой точки).

В красном прямоугольнике показана складчатая структура и положение сегмента линии профиля для домена от стартовой точки домена до его последней точки (синяя линия). В зоне таблицы (желтый прямоугольник) показаны накопленные горизонтальные длины для фактического (зеленый LN, красные 999) и доскладчатого состояний (LO, красные 1241) профиля; в данном случае – для домена 1. Там же дан параметр «EX.SH:», внешняя (накопленная) величина сокращения; это «общая текущая» величина сокращения, без разрывов (LN/LO, 0.81). Строка Avr. SH и ее значение (0.80, зачеркнуты) были зарезервированы для старой версии метода; в обсуждаемом методе этот параметр не используется. Параметр «Sm.Flt.» показывает суммарное горизонтальное смещение по разрывам (0, красная цифра). Зеленый прямоугольник содержит данные: 1241 – вычисленная доскладчатая длина текущего домена (см. также изображение в синем прямоугольнике в «зоне доскладчатой структуры»), 115 - вертикальное смещение линии профиля домена (от стартовой точки, -5000 м, до последней точки, глубиной -4885 м). Горизонтальное смещение по разлому (разлома нет) равно 0 (зеленая цифра).

Верхняя строка (серая) предлагает выбор дальнейших действий: построить следующий домен (CR), записать таблицу (2, CR), завершить программу (3, CR).

Далее в рисунках 18–20 показаны последовательные шаги, при которых строятся домены 2 и 3. На переходе от первого ко второму доменам определены параметры сброса (рис. 19).

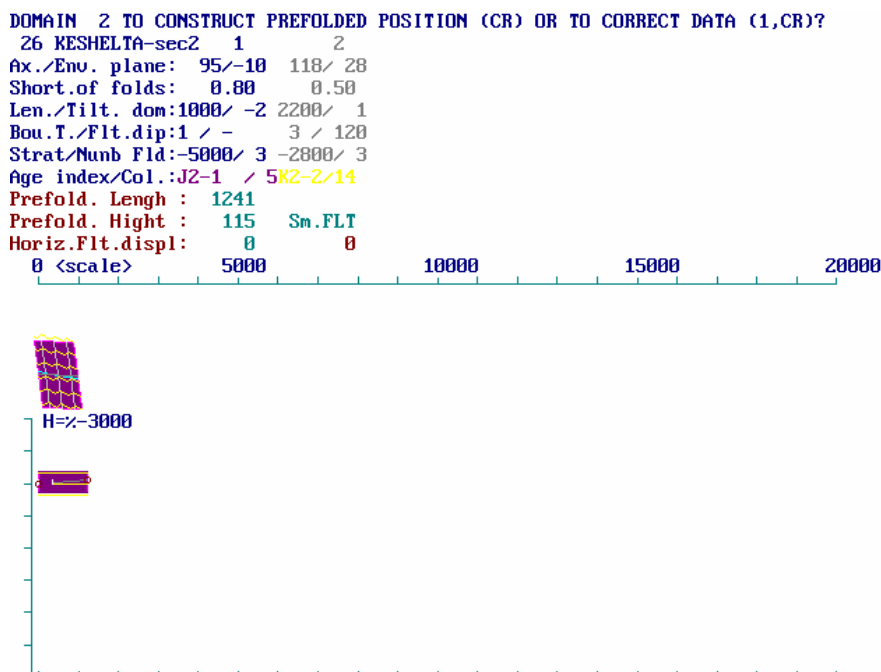


Рис. 18. Следующий шаг реконструкции: демонстрация данных второго домена (столбец серых чисел).

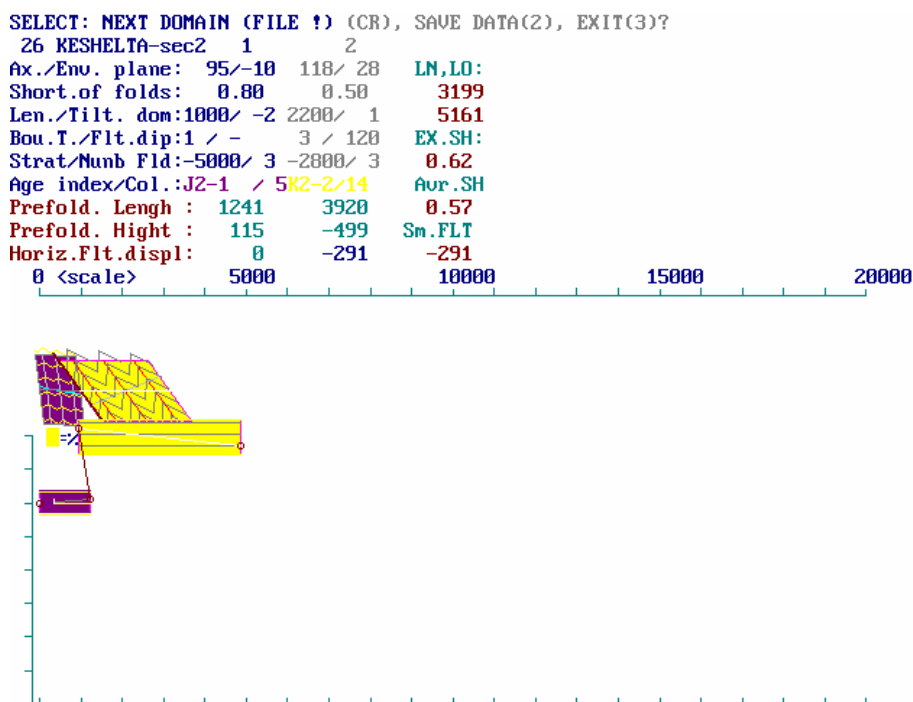


Рис. 19. Результат реконструкции второго домена.

Синяя и красная цифры -291 является горизонтальным смещением по сбросу (сравните данные «Strat» для домена 1 и 2). Величина сокращения EX.SH 0.62 не включает в себя смещение по разрывам. Строка «Age index» показывает относительный возраст пород (J2, K2), текущий номер доменов (1, 2) и индекс цвета в программном языке Basic (/5, /14). Вертикальные позиции изображения складчатой структуры в зоне «актуальной структуры» (рис. 17) регулируются параметром «0.70» в первой строке файла «KESH-12.BCS», в данном случае зарезервировано гипсометрическое пространство для дальнейшего подъема линии профиля в доменах 12-13. «0» является максимально высокой позицией, «1» – максимально низкой.

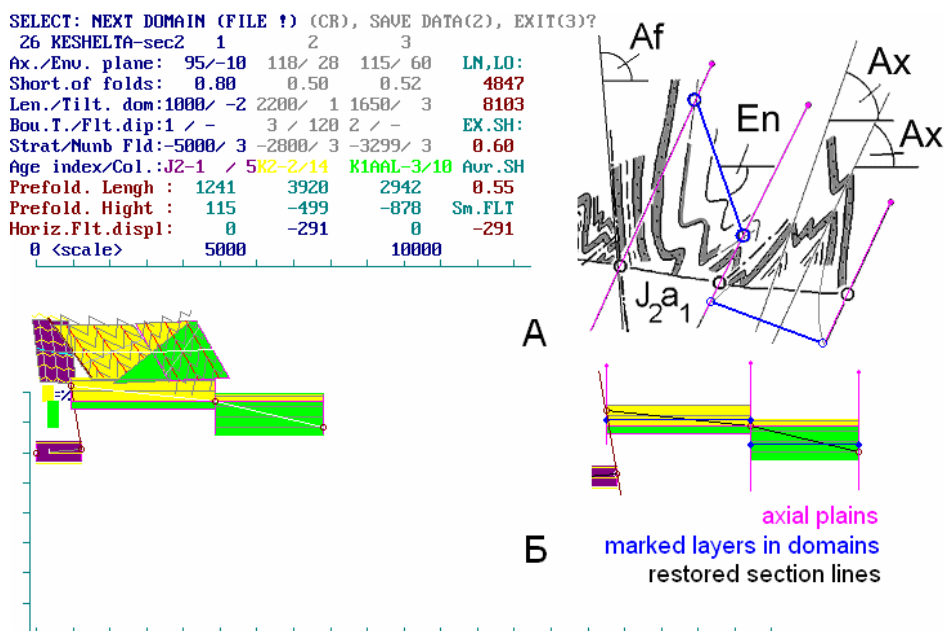


Рис. 20. Результат реконструкции домена 3.

На рис. 20 в дополнительных изображениях «А» и «Б» дано объяснение проведению линий границ в доменах (см. также границы на рис. 4А; структуры «А» и «Б» относятся к разным профилям). Границы должны быть параллельны осевым плоскостям в фактических доменах («А», розовый цвет), такие плоскости имеют вертикальное положение в доскладчатом состоянии («Б»). Две линии первоначальной слоистости (EN) соединяют точки пересечений границ с некоторыми слоями (две синие линии, «А»). Восстановление линии профиля для доменов и доскладчатой ширины доменов имеет отношение к реконструкции отмеченных (синих) слоев и смещение структуры от домена 1 к домену 2 вдоль осевой плоскости до следующего отмеченного слоя. Такое смещение от одного домена до следующего не будет корректным, если границы доменов будут не параллельны осевым плоскостям складок в доменах.

На рис. 21 последовательность доменов 2, 3, 4 не имеет разрывов внутри структуры, границы доменов расположены на границах стратиграфических комплексов, и таким образом вертикальные смещения линии профиля в доменах были равны мощностям комплексов. В левой части зоны доскладчатой структуры около вертикального масштаба, показана индикация стратиграфической колонки (небольшие прямоугольники желтого, светло-зеленого, темно-зеленого цвета). Стратиграфические модели для домена 1 (Закавказский срединный массив) и для доменов 2–6 (и далее, для Чиаурской зоны Большого Кавказа) отличаются друг от друга, поэтому на одной глубине находятся разные комплексы (рис. 22, средняя юра для домена 1 и готерив-баррем для домена 5).

Далее на рисунках 22 и 23 показано построение доменов 5 и 6.

Комбинация геометрических параметров для домена 6 такова (рис. 23), что следует предположить некоторое УДЛИНЕНИЕ для слоистой среды, но не наличие дополнительные малых складок (как это наблюдается в домене 5). Возможности индикации программой этих ситуаций показаны во вставках «А» и «Б». «А» является складчатой структурой в случае, если слои вдоль плоскости зеркала складок показывали сокращение (синие линии). «Б» является разлинзованием в случае, когда слои вдоль плоскости зеркала складок показывают удлинение. Программа указывает на такое «удлинение», рисуя разлинзование (маленькие разрывы голубых цветов в

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2 1 2 3 4
Ax./Env. plane: 95/-10 118/ 28 115/ 60 115/ 85 LN,LO:
Short.of folds: 0.80 0.50 0.52 0.42 5246
Len./Tilt. dom:1000/-2 2200/ 1 1650/ 3 400/ 3 8986
Bou.T./Flt.dip:1 / - 3 / 120 2 / - 2 / - EX.SH:
Strat/Numb Fld:-5000/ 3 -2800/ 3 -3299/ 3 -4178/ 3 0.58
Age index/Col.:J2-1 / 5K2-2/14 K1AAL-3/1K1H2B4/ 2 Avr.SH
Prefold. Length : 1241 3920 2942 883 0.54
Prefold. Height : 115 -499 -878 -333 Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: 0 -291 0 0 -291
0 <scale> 5000 10000 15000 20000

```



Рис. 21. Результат реконструкции домена 4.

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2 1 2 3 4 5
Ax./Env. plane: 95/-10 118/ 28 115/ 60 115/ 85 110/ 70 LN,LO:
Short.of folds: 0.80 0.50 0.52 0.42 0.45 6744
Len./Tilt. dom:1000/-2 2200/ 1 1650/ 3 400/ 3 1500/ 3 12174
Bou.T./Flt.dip:1 / - 3 / 120 2 / - 2 / - 2 / - EX.SH:
Strat/Numb Fld:-5000/ 3 -2800/ 3 -3299/ 3 -4178/ 3 -4511/ 3 0.55
Age index/Col.:J2-1 / 5K2-2/14 K1AAL-3/1K1H2B4/ 2K1H15/ 3 Avr.SH
Prefold. Length : 1241 3920 2942 883 3188 0.52
Prefold. Height : 115 -499 -878 -333 -967 Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: 0 -291 0 0 0 -291
0 <scale> 5000 10000 15000 20000

```

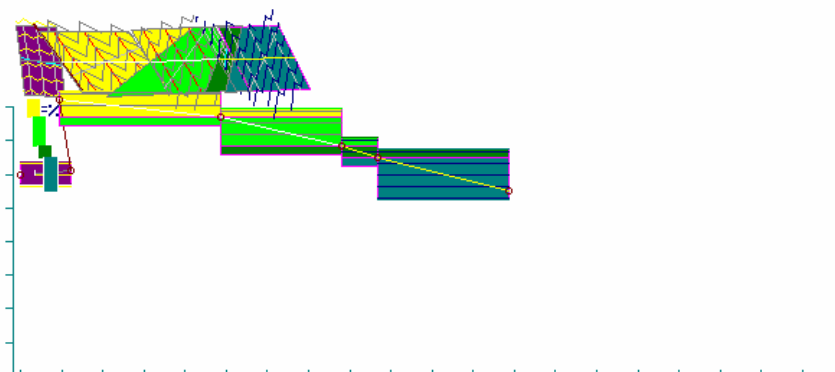


Рис. 22. Результат реконструкции домена 5. Самая глубокая точка (конечная точка домена 5) имеет глубину -5477 [-4511 + (-967)].

слоистости, «Б»). Удлинение появилось в результате балансирования вместе с доменом 7 (северное крыло большой складки). Изображение на рис. 23 включает шесть доменов (максимальное число для экрана), и оно должно быть сохранено с использованием функции «копии экрана». Для сохранения изображения можно воспользоваться программой «MICROSOFT PAINT»: копия экрана из оперативной памяти помещается в основное окно (функцией «PASTE») и далее сохраняется в виде файла с индивидуальным именем («*.BMP»). Для дальнейшей компиляции структуры у пользователя должно быть несколько таких изображений (6 + 6 + 6 ...).

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2 1 2 3 4 5 6
Ax./Env. plane: 95/-10 118/ 28 115/ 60 115/ 85 110/ 70 115/ 88 LN,LO:
Short.of folds: 0.80 0.50 0.52 0.42 0.45 0.48 7494
Len./Tilt. dom:1000/-2 2200/ 1 1650/ 3 400/ 3 1500/ 3 750/ 1 13601
Bou.T./Flt.dip:1 / - 3 / 120 2 / - 2 / - 2 / - 2 / - EX.SH:
Strat/Numb Fld:-5000/ 3 -2800/ 3 -3299/ 3 -4178/ 3 -4511/ 3 -5477/ 3 0.55
Age index/Col.:J2-1 / 5K2-2/14 K1AAL-3/1K1H2B4/ 2K1H15/ 3 K1V26/11 Avr.SH
Prefold. Length : 1241 3920 2942 883 3188 1427 0.51
Prefold. Height : 115 -499 -878 -333 -967 -792 Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: 0 -291 0 0 0 0 -291
0 <scale> 5000 10000 15000 20000

```

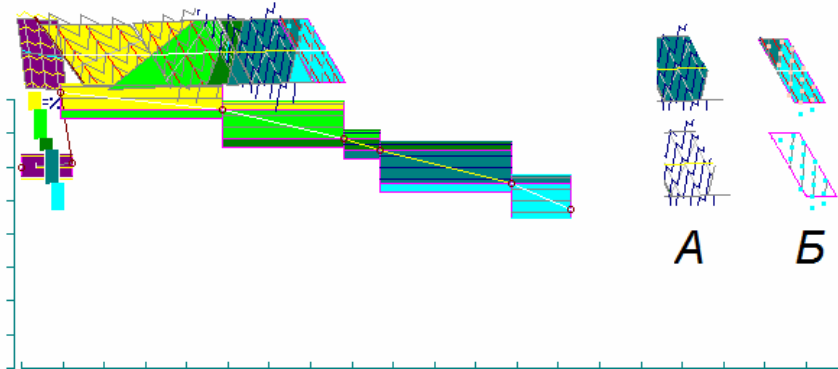


Рис. 23. Результат реконструкции домена 6.

5.5 Переход от экрана N к экрану $N+1$ для структурного пересечения, имеющего более 6 доменов

Структура домена 7 на рис. 25 не была достаточно хорошо представлена в обнажениях. Возможно, здесь существовали дополнительные складки или какой-то надвиг, но они не были замечены (как другая версия структуры). В этом случае мощность K_1V_2 может оказаться меньшей, и получившееся УДЛИНЕНИЕ в домене 6

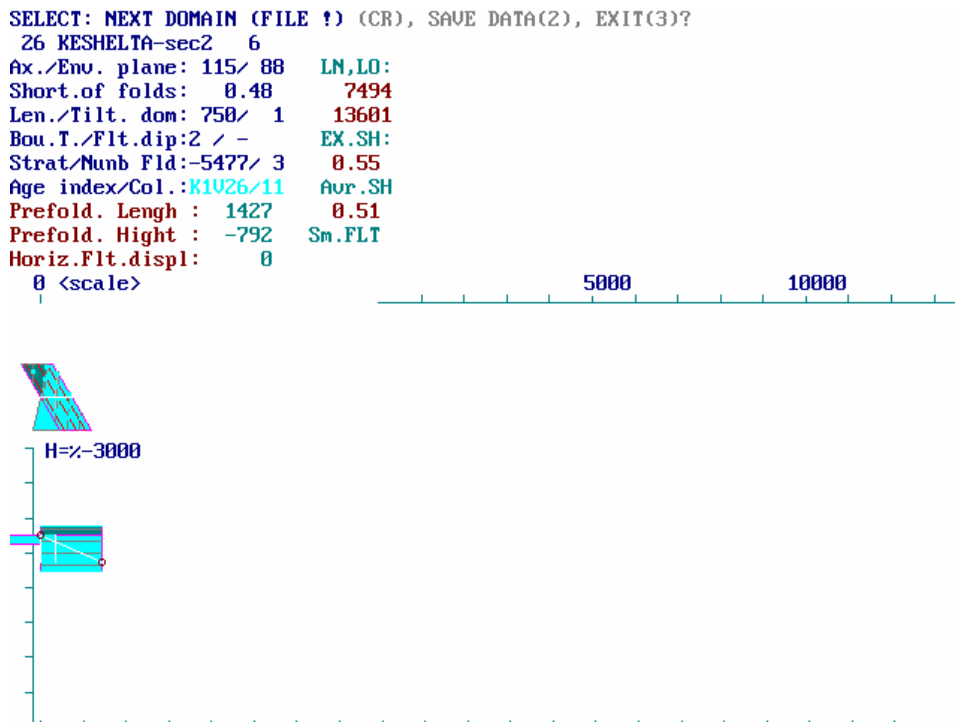


Рис. 24. Следующий экран реконструкции – расчет и построение следующего блока из 6 доменов; домены 6–11 вслед за 1–6. Предыдущий домен (номер 6) показывается как первый для этого блока структуры. Параметры LN, LO, EX.SH совпадают с параметрами на рис. 23.

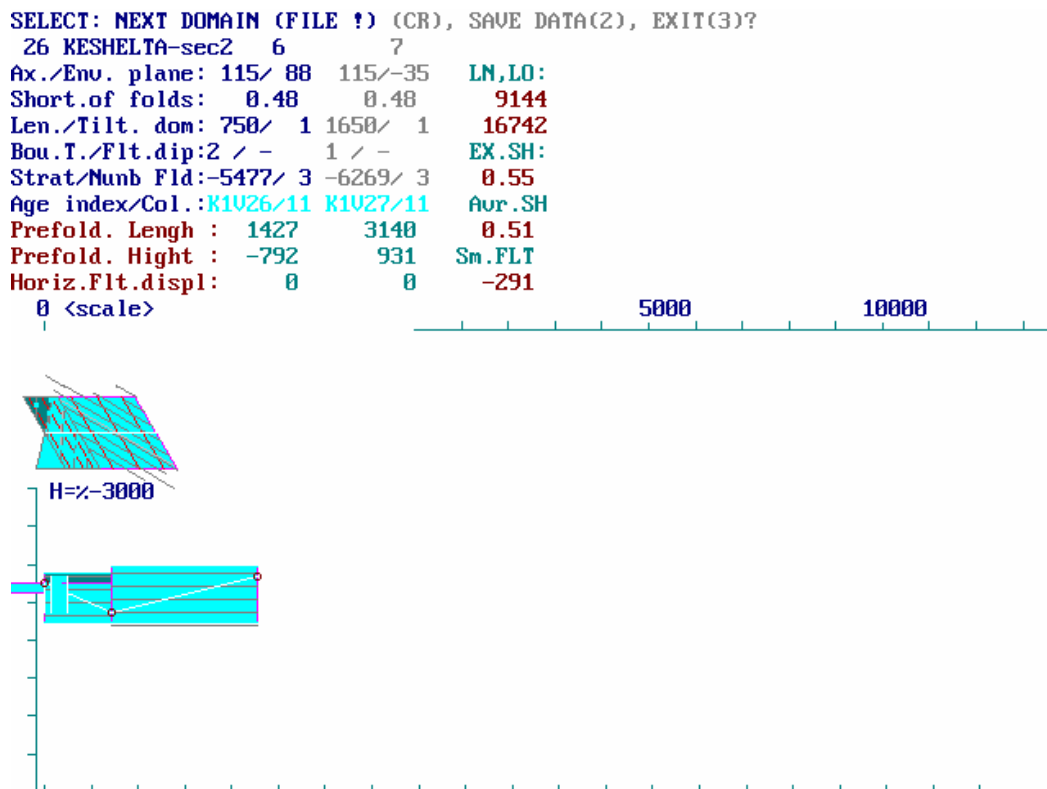


Рис. 25. Результат реконструкции домена 7 для осадков K_1V_2 (верхне-валанжинский ярус).

может быть исключено. Подошва K_1V_2 в домене 20 находится на глубине -6078 м. Сравните эти данные с глубиной -6269 м для самой низкой точки доменов 6/7 и границей кровли K_1V_2 для домена 6 (-5477 м) и домена 18 (-5328 м). Эти мощности и позиции в стратиграфической модели близки.

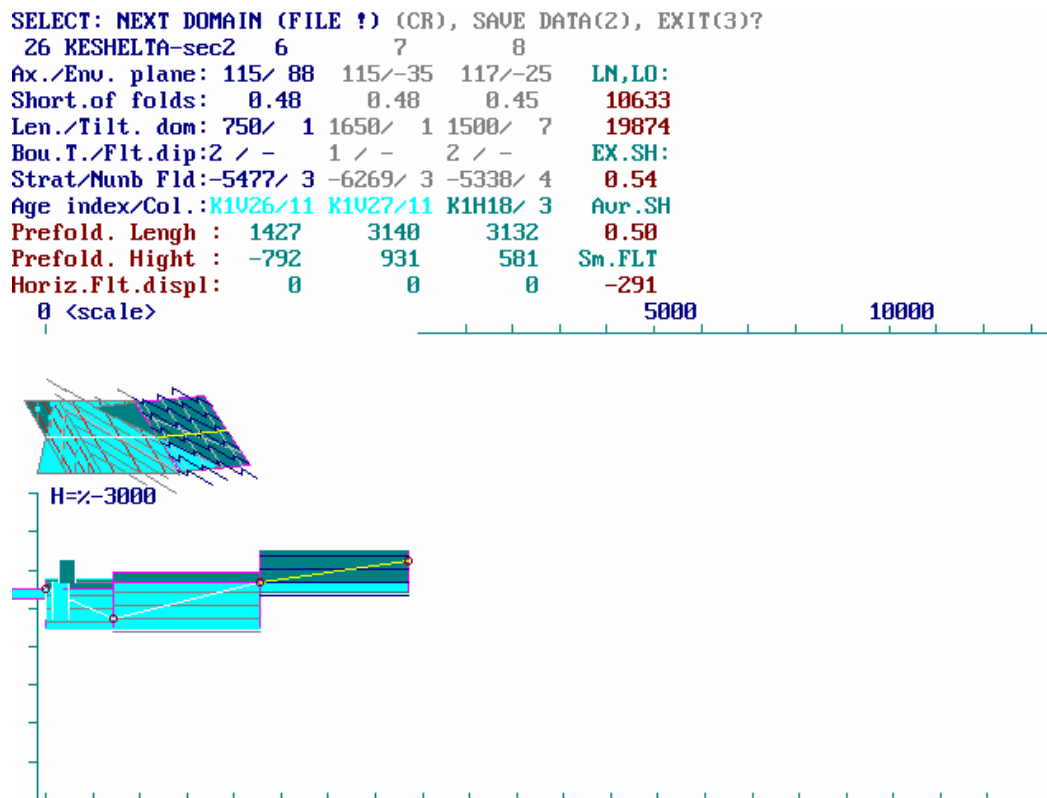


Рис. 26. Результат реконструкции домена 8.

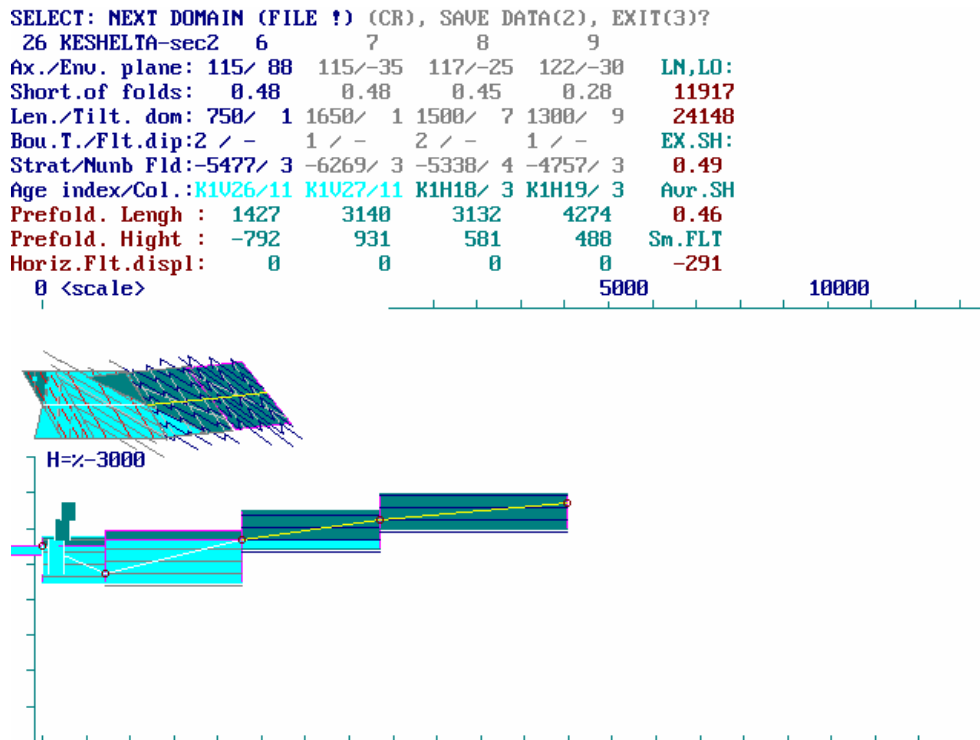


Рис. 27. Результат реконструкции домена 9.

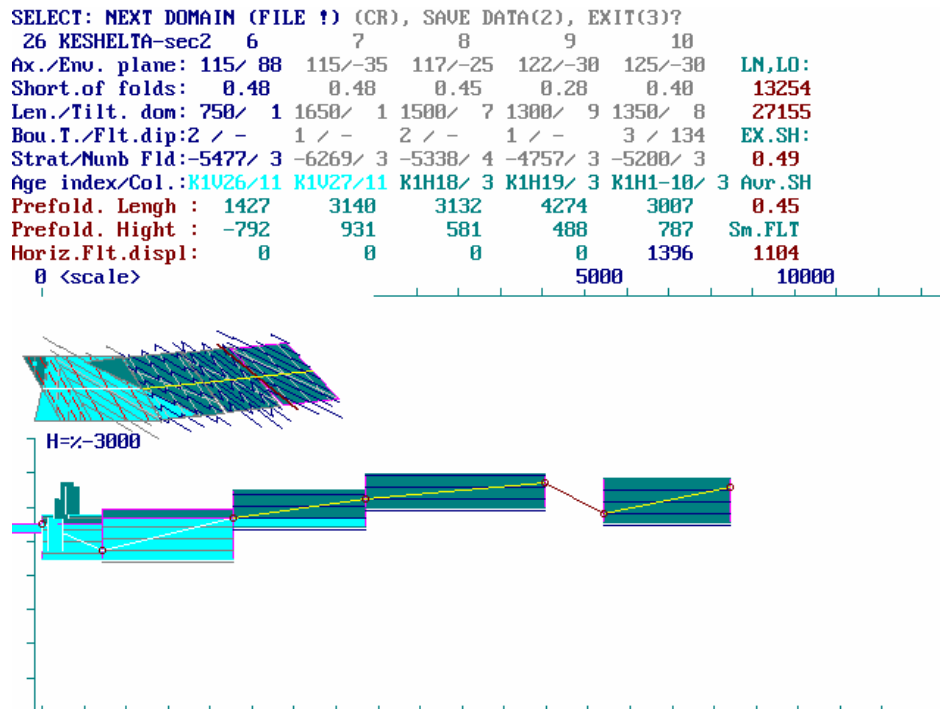


Рис. 28. Результат реконструкции домена 10.

В доменах 9 и 10 выходят на поверхность одни и те же осадки (K_1h_1 , нижний говеривский ярус), между ними находится надвиг. Глубина конечной точки домена 9 (-4269) близка к первоначальной глубине кровли этих отложений K_1h_1 -4500 (см. домен 5, рис. 22). В сочетании с предписанной глубиной стартовой точки домена 10 (-5200) и вычисленным начальным наклоном плоскости разрыва, это формирует горизонтальное смещение 1396 м и дает удовлетворительные позиции доменов внутри стратиграфической модели Чиаурской зоны.

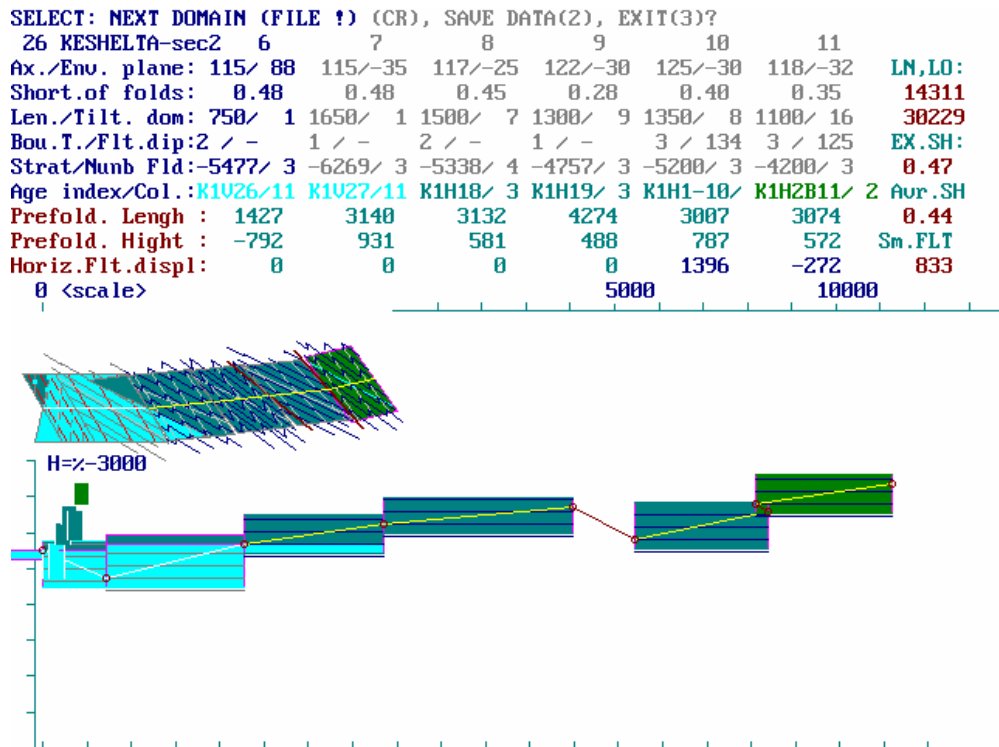


Рис. 29. Результат реконструкции домена 11.

Вертикальные позиции конечного пункта домена 10, стартовая точка домена 11, начальный наклон плоскости разрыва и стратиграфическая модель диктуют результат смещения по разрыву на их границе как «сброс» с амплитудой -272 м (рис. 29). Результаты построения этих шести доменов должны быть также зафиксированы с использованием функции «копии экрана».

На рисунках 30–39 показано построение всех остальных доменов (от 11 до 26).

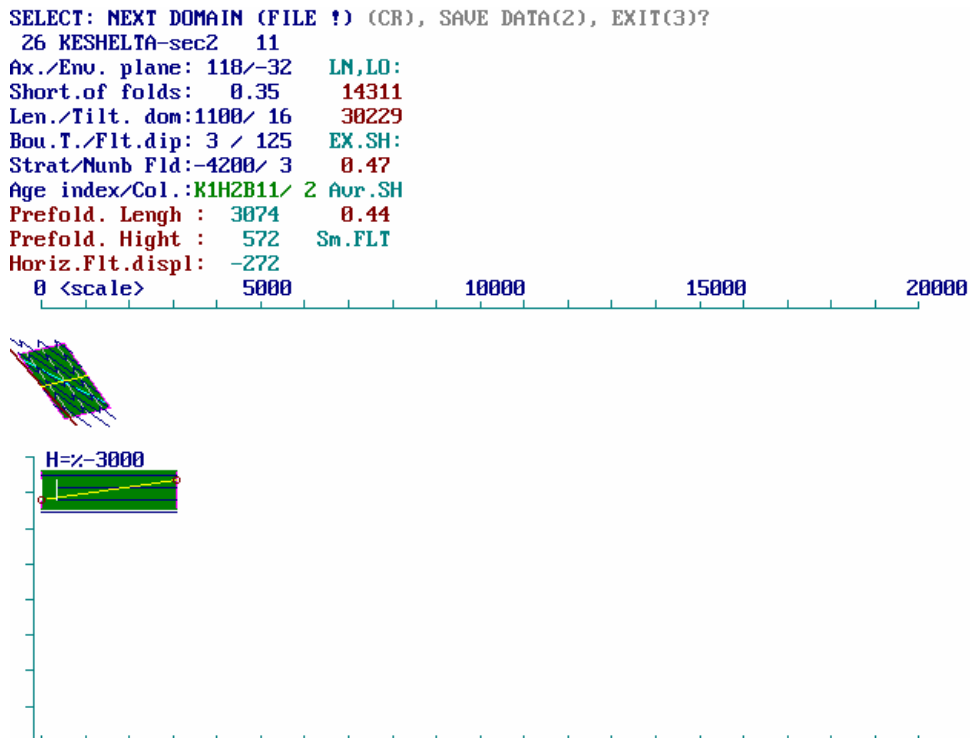


Рис. 30. Результат реконструкции домена 11, который используется еще раз в качестве первого домена для блока 3 (домены 11–16).

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
 26 KESHELTA-sec2  11      12
Ax./Env. plane: 118/-32  105/-17  LN,LO:
Short.of folds:  0.35   0.55   14874
Len./Tilt. dom:1100/ 16  650/ 30  31371
Bou.T./Flt.dip:  3 / 125  2 / -    EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4200/ 3 -3628/ 3  0.47
Age index/Col.:K1H2B11/ K1APAL12/10Avr.SH
Prefold. Length : 3074   1142   0.45
Prefold. Hight  :  572   308   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: -272    0     833
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

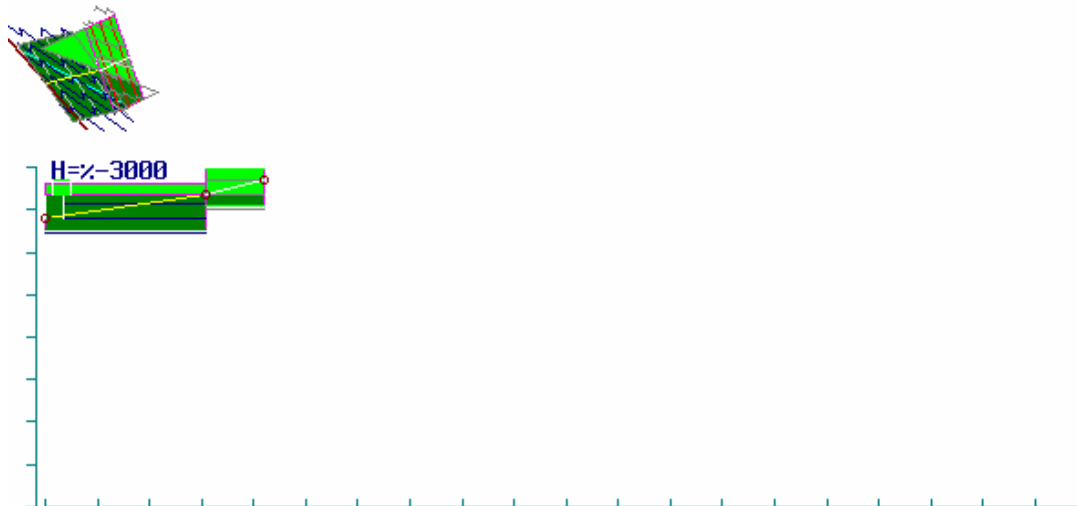


Рис. 31. Результат реконструкции домена 12.

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
 26 KESHELTA-sec2  11      12      13
Ax./Env. plane: 118/-32  105/-17  120/ 35  LN,LO:
Short.of folds:  0.35   0.55   0.35   15610
Len./Tilt. dom:1100/ 16  650/ 30  750/-11  32988
Bou.T./Flt.dip:  3 / 125  2 / -    1 / -    EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4200/ 3 -3628/ 3 -3319/ 3  0.47
Age index/Col.:K1H2B11/ K1APAL12/K1APAL13/10Avr.SH
Prefold. Length : 3074   1142   1617   0.44
Prefold. Hight  :  572   308   -190   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: -272    0     0     833
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

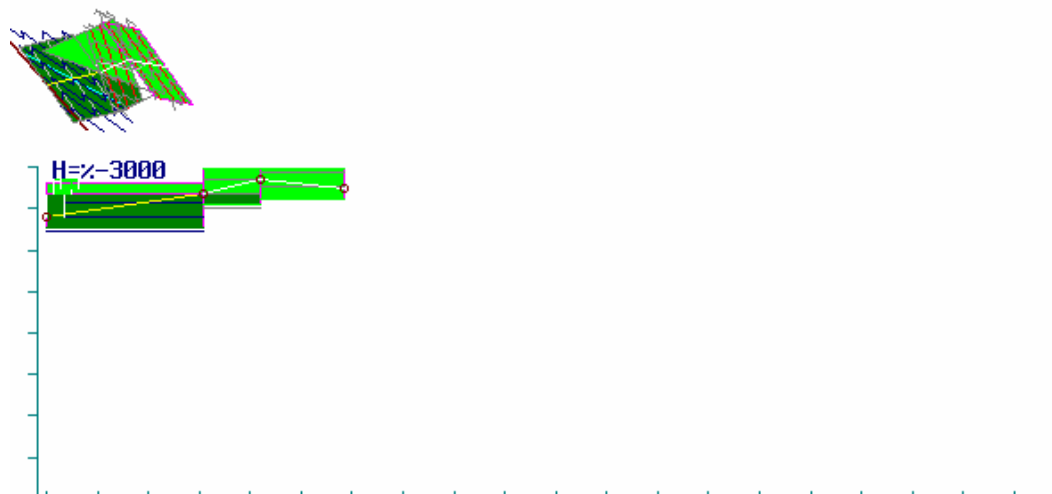


Рис. 32. Результат реконструкции домена 13.

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2  11      12      13      14
Ax./Env. plane: 118/-32 105/-17 120/ 35 118/-35  LN,LO:
Short.of folds:  0.35   0.55   0.35   0.40   16250
Len./Tilt. dom:1100/ 16  650/ 30  750/-11  650/-10  34268
Bou.T./Flt.dip:  3 / 125  2 / -    1 / -    3 / 120  EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4200/ 3 -3628/ 3 -3319/ 3 -4150/ 3  0.47
Age index/Col.:K1H2B11/ K1APAL12/K1APAL13/K1H2B14/ 2 Avr.SH
Prefold. Length : 3074   1142   1617   1281   0.44
Prefold. Height :  572   308   -190   242   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: -272    0      0      150   983
0 <scale>         5000          10000         15000         20000

```

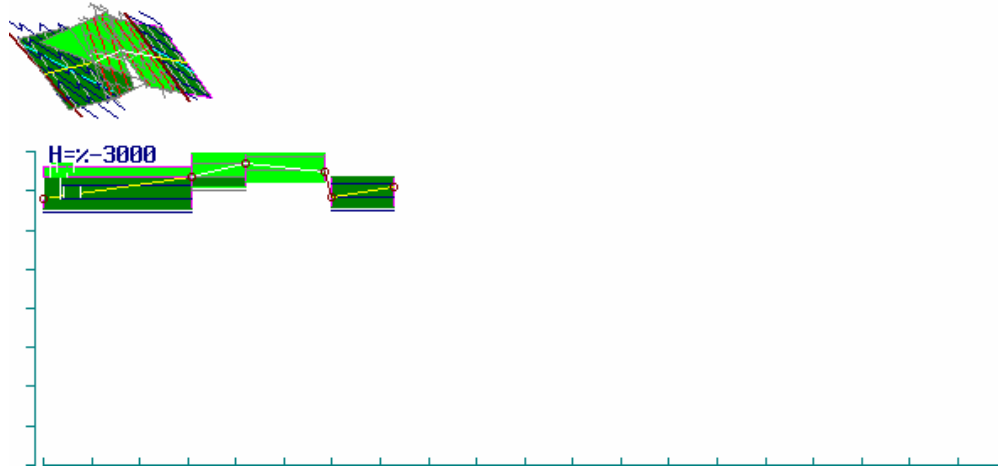


Рис. 33. Результат реконструкции домена 14. Были вычислены параметры надвига между доменами 13 и 14.

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE !) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2  11      12      13      14      15
Ax./Env. plane: 118/-32 105/-17 120/ 35 118/-35 105/-10  LN,LO:
Short.of folds:  0.35   0.55   0.35   0.40   0.55   16796
Len./Tilt. dom:1100/ 16  650/ 30  750/-11  650/-10  550/ -7  35195
Bou.T./Flt.dip:  3 / 125  2 / -    1 / -    3 / 120  1 / -    EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4200/ 3 -3628/ 3 -3319/ 3 -4150/ 3 -3908/ 3  0.48
Age index/Col.:K1H2B11/ K1APAL12/K1APAL13/K1H2B14/ K1H2B15/ 2 Avr.SH
Prefold. Length : 3074   1142   1617   1281   927   0.44
Prefold. Height :  572   308   -190   242   17   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: -272    0      0      150    0   983
0 <scale>         5000          10000         15000         20000

```

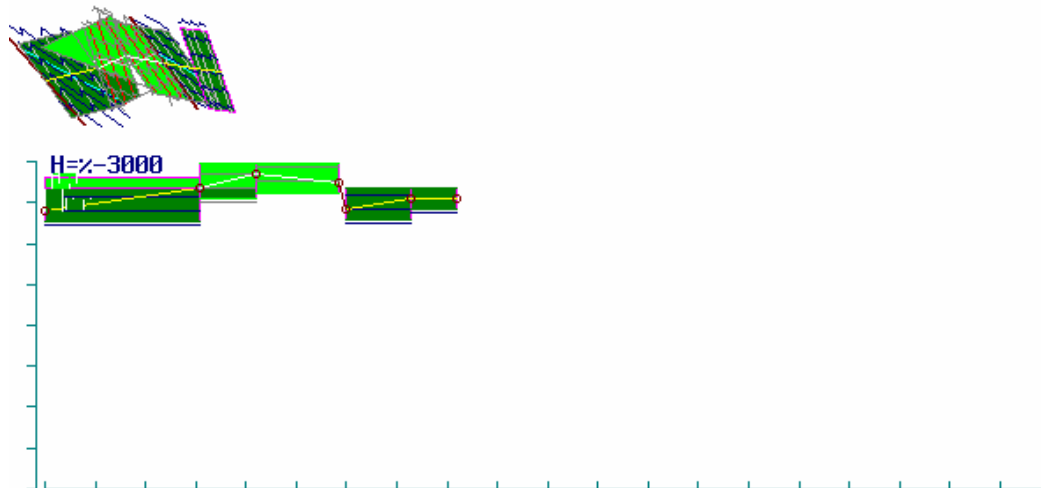


Рис. 34. Результат реконструкции домена 15.

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE ?) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2  11      12      13      14      15      16
Ax./Env. plane: 118/-32  105/-17  120/ 35  118/-35  105/-10  90/ 45  LN,LO:
Short.of folds:  0.35   0.55   0.35   0.40   0.55   0.55   17789
Len./Tilt. dom:1100/ 16  650/ 30  750/-11  650/-10  550/-7  1000/-7  37000
Bou.T./Flt.dip:  3 / 125  2 / -    1 / -    3 / 120  1 / -    3 / 95   EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4200/ 3  -3628/ 3  -3319/ 3  -4150/ 3  -3908/ 3  -4450/ 3  0.48
Age index/Col.:K1H2B11/ K1APAL12/K1APAL13/K1H2B14/ K1H2B15/ K1H116/ 3  Avr.SH
Prefold. Length : 3074   1142   1617   1281   927   1805   0.45
Prefold. Hight  :  572   308   -190   242   17   -613   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: -272    0     0     150    0    149   1132
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

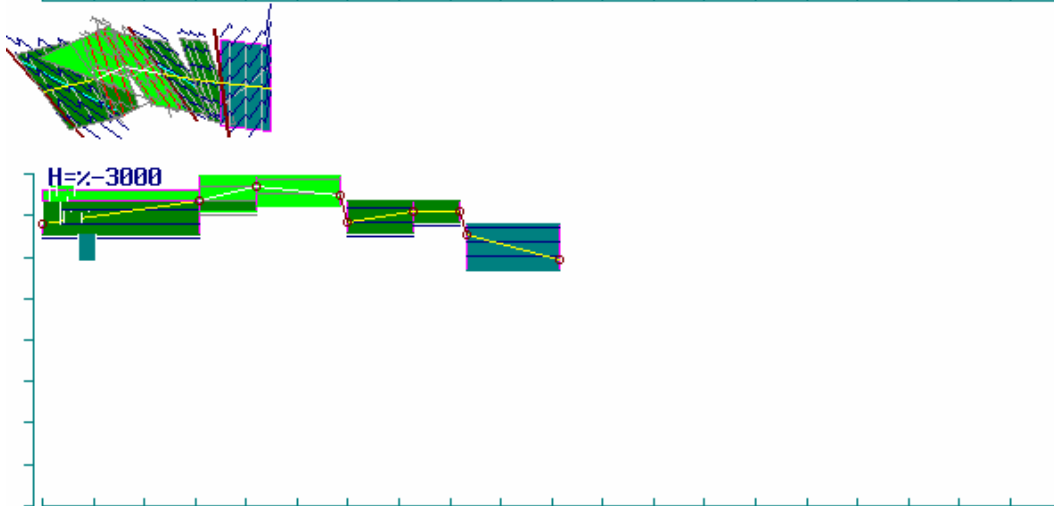


Рис. 35. Результат реконструкции домена 16. Перед доменом 16 были вычислены параметры небольшого надвига. Для регистрации восстановленного состояния блока из шести доменов (11–16) необходимо еще раз использовать функцию «копии экрана».

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE ?) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2  16
Ax./Env. plane:  90/ 45  LN,LO:
Short.of folds:  0.55   17789
Len./Tilt. dom:1000/-7  37000
Bou.T./Flt.dip:  3 / 95   EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4450/ 3  0.48
Age index/Col.:K1H116/ 3  Avr.SH
Prefold. Length : 1805   0.45
Prefold. Hight  : -613   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ:  149
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

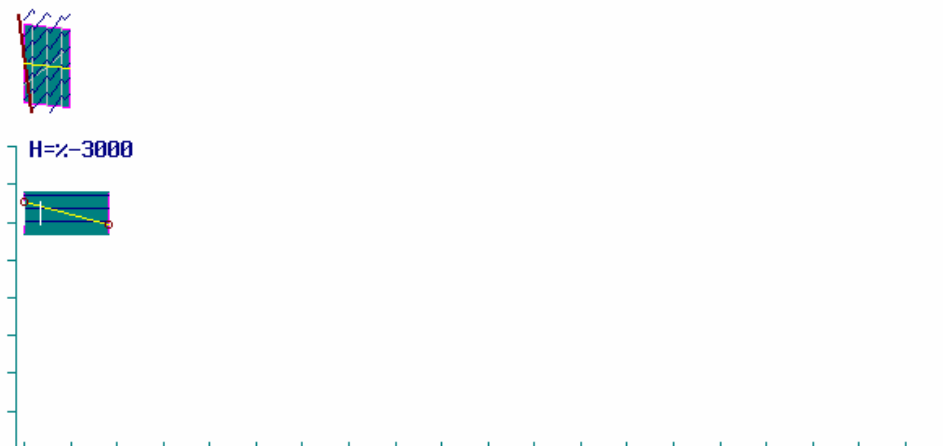


Рис. 36. Показан еще раз результат реконструкции домена 16. Он является первым доменом для блока 4 (домены 16–21).

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE ?) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2 16 17 18 19 20 21
Ax./Env. plane: 90/ 45 85/-65 85/ 30 95/ 50 95/ 37 102/ 40 LN,LO:
Short.of folds: 0.55 0.30 0.52 0.50 0.50 0.50 21913
Len./Tilt. dom:1000/-7 400/-8 1250/-7 800/-6 700/-6 1000/-5 45591
Bou.T./Flt.dip: 3 / 95 1 / - 3 / 80 2 / - 1 / - 2 / - EX.SH:
Strat/Numb Fld:-4450/ 3 -5063/ 3 -4850/ 3 -5328/ 3 -5797/ 3 -6078/ 3 0.48
Age index/Col.:K1H116/ 3K1H117/ 3K1H118/ 3K1V219/11K1V220/11K1V121/ 9 Avr.SH
Prefold. Length : 1805 1332 2402 1571 1374 1913 0.45
Prefold. Height : -613 201 -478 -469 -281 -400 Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: 149 0 4 0 0 0 1136
0 <scale> 5000 10000 15000 20000

```

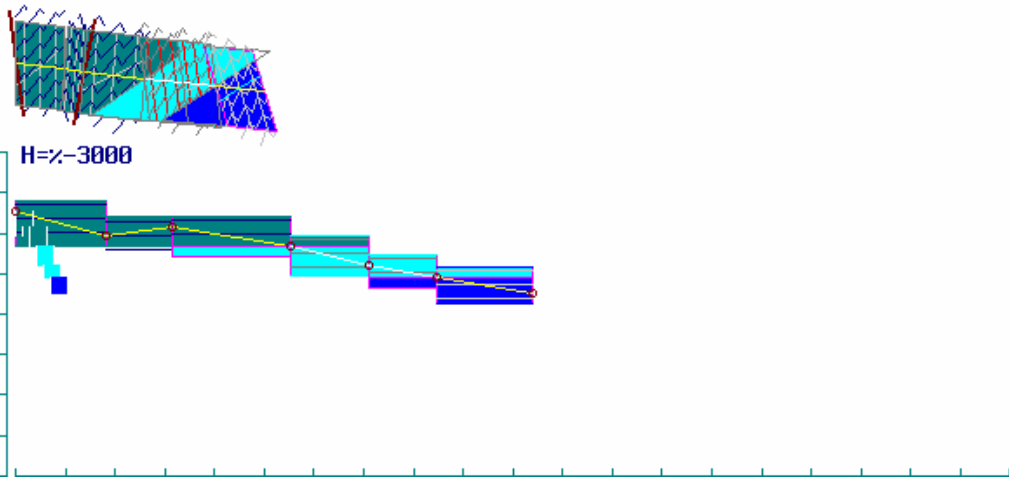


Рис. 37. Результат реконструкции доменов 16–21. Горизонтальная амплитуда разрыва (надвига) между доменами 17 и 18 была определена как незначительная (4 метра).

```

SELECT: NEXT DOMAIN (FILE ?) (CR), SAVE DATA(2), EXIT(3)?
26 KESHELTA-sec2 21 22 23 24
Ax./Env. plane: 102/ 40 120/-28 120/ 30 120/-18 LN,LO:
Short.of folds: 0.50 0.45 0.40 0.40 26406
Len./Tilt. dom:1000/-5 1500/-4 1950/-3 1050/-3 54645
Bou.T./Flt.dip: 2 / - 3 / 102 1 / - 3 / 95 EX.SH:
Strat/Numb Fld:-6078/ 3 -6900/ 3 -6382/ 3 -8000/ 3 0.48
Age index/Col.:K1V121/ 9K1V122/ 9K1V123/ 9J3-24/ 1 Avr.SH
Prefold. Length : 1913 2763 4089 2202 0.45
Prefold. Height : -400 518 -425 162 Sm.FLT
Horiz.Flt.displ: 0 -445 0 -2291 -1601
0 <scale> 5000 10000 15000 20000

```

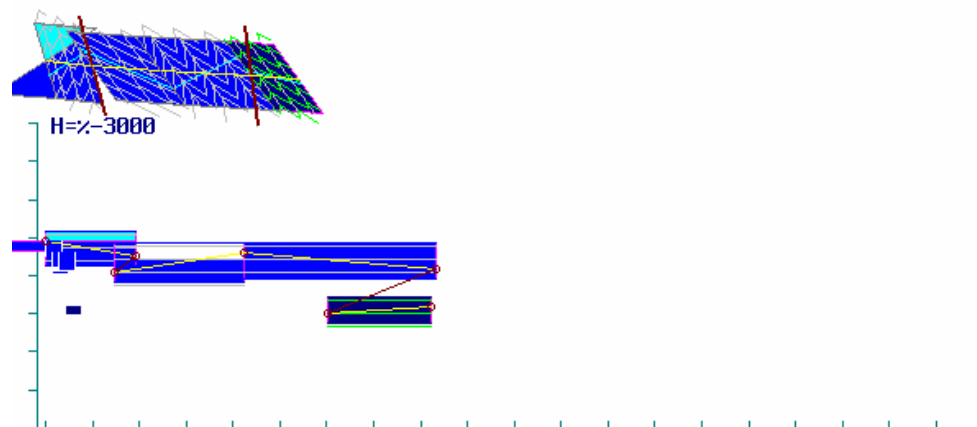


Рис. 38. Результат реконструкции доменов 21–24. Комбинации первоначальных наклонов плоскостей разрывов с вертикальными позициями начальных точек для следующих доменов (21/22 и 23/24) указывают на смещения в восстановленной структуре по этим разломам по типу «СБРОС» (не надвиг!).

```

SELECT: NEXT DOMAIN (LAST !) (CR), SAVE resume file kesh-12.DCS - Ok! (CR)?
 26 KESHELTA      21      22      23      24      25      26
Ax./Env. plane: 102/ 40 120/-28 120/ 30 120/-18 112/-30 95/-20 LN,LO:
Short.of folds:  0.50   0.45   0.40   0.40   0.30   0.30   29154
Len./Tilt. dom:1000/ -5 1500/ -4 1950/ -3 1050/ -3 1750/ -2 1000/ -2 63282
Bou.T./Flt.dip:2 / -   3 / 102 1 / -   3 / 95 1 / -   3 / 118 EX.SH:
Strat/Numb Fld:-6078/ 3 -6900/ 3 -6382/ 3 -8000/ 3 -7838/ 3 -8400/ 3  0.46
Age index/Col.:K1V121/ 9K1V122/ 9K1V123/ 9J3-24/ 1 J3-25/ 1 J2-26/ 5 Avr.SH
Prefold. Length : 1913   2763   4089   2202   5329   3308   0.43
Prefold. Hight  : -400   518   -425   162   400   102   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ:  0     -445    0     -2291  0     5662  4061
 0 <scale>      5000      10000      15000      20000

```

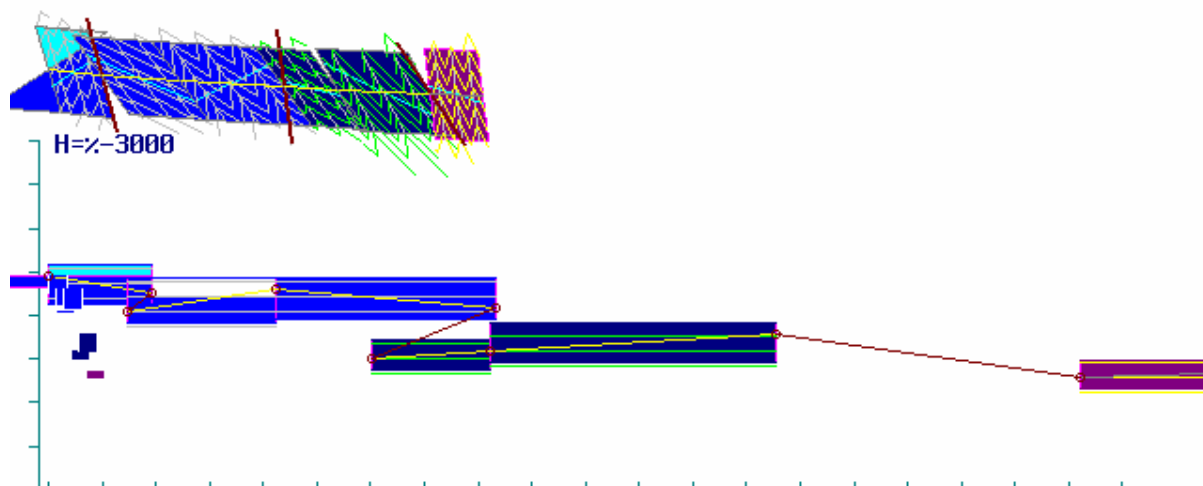


Рис. 39. Результат реконструкции доменов 21–26.

На рис. 39 домен 26 принадлежит Казбеги-Лагодехской тектонической зоне Большого Кавказа, расположенной к северу от Чиаурской зоны. Структура домена 26 по ряду обстоятельств не была исследована достаточно хорошо непосредственно при полевых исследованиях, и ее параметры не были измерены на профиле как точные. Однако, поскольку стратиграфическая модель Казбеги-Лагодехской зоны в целом подобна модели Чиаурской зоны, и значение глубины среднеюрских пород могли быть приняты теми же (-8400 м, на 400 м ниже подошвы верхней юры), вычисления были сделаны. Для этого параметры домена 26 были приняты близкими к параметрам домена 25. В связи с этим расчетную амплитуду горизонтального смещения по надвигу 5662 м (сокращение) следует считать значением очень приблизительным.

NB!: В верхней строке экрана (рис. 39) красное слово «LAST» (ПОСЛЕДНИЙ) указывает на последний домен из файла данных, № 26. При его появлении может прозвучать зуммер. В этой же строке был сделан также запрос на создание полного файла отчета о вычислениях (*.DCS). На запрос был дан ответ «да», далее файл («KESH-12.DCS») был записан на диск. В данном положении (рис. 39) после нажатия «ENTER» программа перейдет к следующим операциям.

На следующем шаге (рис. 40, 41) в верхней строке был сделан запрос на запись текущей (заключительной) версии файла данных для случая, когда в него были внесены изменения во время последнего балансирования, при этом в файле будут сделаны записи вычисленных новых глубин доменов. Это позволяет зафиксировать все сделанные изменения и повторить при необходимости успешную версию реконструкции.


```

DOMAIN 2 INSERT NAME OF FILE - ?                                CR)?
26 KESHELTA-sec2  21      22      23      24      25      26
Ax./Env. plane: 102/ 40  120/-28  120/ 30  120/-18  112/-30  95/-20  LN,LO:
Short.of folds:  0.50   0.45   0.40   0.40   0.30   0.30  29154
Len./Tilt. dom:1000/ -5  1500/ -4  1950/ -3  1050/ -3  1750/ -2  1000/ -2  63282
Bou.T./Flt.dip:2 / -    3 / 102 1 / -    3 / 95 1 / -    3 / 118  EX.SH:
Strat/Numb Fld:-6078/ 3 -6900/ 3 -6382/ 3 -8000/ 3 -7838/ 3 -8400/ 3  0.46
Age index/Col.:K1U121/ 9K1U122/ 9K1U123/ 9J3-24/ 1 J3-25/ 1 J2-26/ 5  Avr.SH
Prefold. Length : 1913   2763   4089   2202   5329   3308   0.43
Prefold. Height : -400   518   -425   162   400   102   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ:  0     -445    0     -2291   0     5662  4061
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

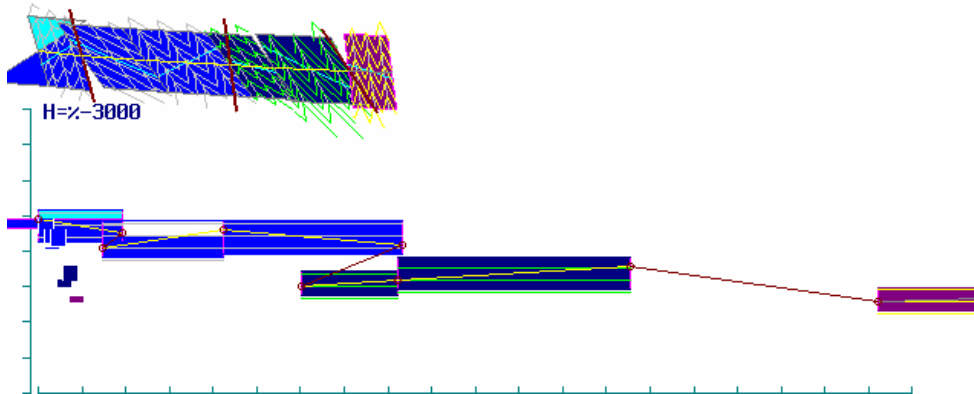


Рис. 40. Заключительные процедуры реконструкции для доменов 21–26.

```

DOMAIN 2 INSERT NAME OF FILE - ? chi-2a.bcs                    CR)?
26 KESHELTA-sec2  21      22      23      24      25      26
Ax./Env. plane: 102/ 40  120/-28  120/ 30  120/-18  112/-30  95/-20  LN,LO:
Short.of folds:  0.50   0.45   0.40   0.40   0.30   0.30  29154
Len./Tilt. dom:1000/ -5  1500/ -4  1950/ -3  1050/ -3  1750/ -2  1000/ -2  63282
Bou.T./Flt.dip:2 / -    3 / 102 1 / -    3 / 95 1 / -    3 / 118  EX.SH:
Strat/Numb Fld:-6078/ 3 -6900/ 3 -6382/ 3 -8000/ 3 -7838/ 3 -8400/ 3  0.46
Age index/Col.:K1U121/ 9K1U122/ 9K1U123/ 9J3-24/ 1 J3-25/ 1 J2-26/ 5  Avr.SH
Prefold. Length : 1913   2763   4089   2202   5329   3308   0.43
Prefold. Height : -400   518   -425   162   400   102   Sm.FLT
Horiz.Flt.displ:  0     -445    0     -2291   0     5662  4061
0 <scale>          5000          10000          15000          20000

```

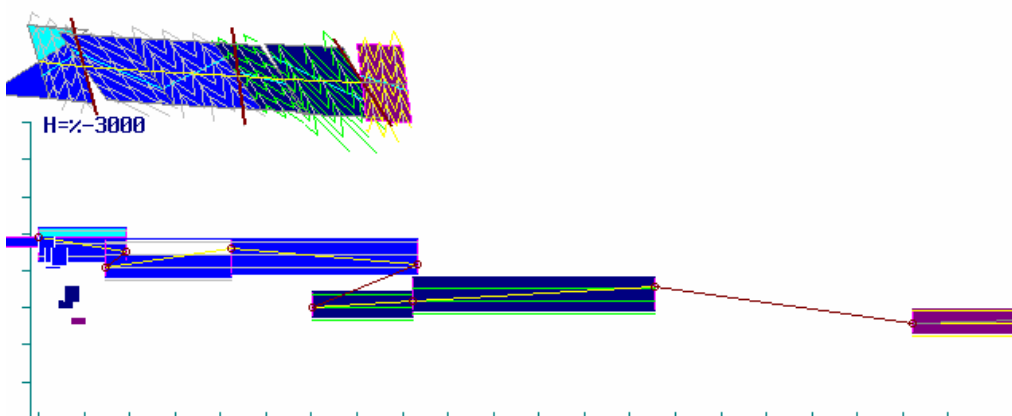


Рис. 41. Заключительные процедуры реконструкции для доменов 21–26 и всего пересечения. В верхней строке было введено имя для записи заключительной версии файла данных (CHI-2A.BCS).

На рис. 41 показаны последние операции собственно работы программы. Далее должны быть выполнены следующие операции: 1) чтобы возвратиться к главному меню (рис. 5) – нажать 3, ENTER; и затем, в главном меню 2) нажать 5, ENTER для нормального завершения работы PC программы «CROSS-B4.EXE».

После выполнения всех указанных выше операций возникает несколько результатов реконструкции доскладчатой структуры для пересечения 12 (Кешельта):

- а) 5 блоков изображений «копии экрана»,
- б) новая версия набора исходных данных по структуре доменов (*.BCS),
- в) файл-резюме результатов вычислений (*.DCS).

Дальнейшие операции реконструкций доскладчатой структуры в объеме всего осадочного чехла производятся за пределами работы компьютерной программы «CROSS-B4.EXE».

5.6 Формирование полного структурного пересечения в доскладчатом состоянии

Имеющиеся изображения пяти блоков доменов (1–6; 6–11; 11–16 ...) в форме *.BMP или *.TIF файлов (файлы *.JPG нежелательны!) необходимо объединить. Лучше это сделать на одном рисунке с тремя зонами информации. В стыке между двух смежных блоков, разумеется, используется соответствующий последний / первый блок (например, 6 для блоков 1–6 и 6–11). Для этой операции может применяться обычная программа «MICROSOFT PAINT» (рис. 42), входящая в набор программ операционной системы, причем наращивать изображения следует отдельно для трех зон (доскладчатая структура, зона «В», современная складчатая структура – зона «Б» и зона таблицы «А»). На рис. 42 для доскладчатого состояния осадочного чехла всей тектонической зоны вокруг основных полос разрезов для каждого домена показан весь объем чехла, существующий согласно стратиграфической модели. Были использованы копии блоков 1–6, 6–11 и других доменов; вокруг этих доменов показаны пустые полосы.

5.7 Процедуры балансирования структуры

Как показано на рис. 42, главная цель балансирования – это создание такой структуры, в которой на всем ее протяжении глубины стратиграфических единиц имеют свои практически постоянные значения в соответствии с принятой стратиграфической моделью. Как хорошо видно на рис. 42, каждая из границ 10-ти стратиграфических подразделений вдоль профиля длиной 65 км не меняет свое положение по глубине, а сами стратиграфические единицы имеют почти неизменные мощности. Это означает, что главная операция балансирования должна устанавливать корректные глубины стратиграфических подразделений в каждом домене после нарушения структуры плоскостью разрыва. Выбор глубины стартовой точки домена должен быть таким, что положение следующей стратиграфической границы должно совпасть с модельным значением. Если это необходимо, проблемные места структуры могут быть сбалансированы снова с другими глубинами начальной точки или используя некоторые, но небольшие изменения других параметров – Af, SH, AX, EN.

При балансировании структуры могут встретиться два типа сложностей. Самый сложный случай – это когда ориентации плоскости разрыва и первоначальной слоистости (поверхности зеркала складок) близки. В этом случае восстановленная доскладчатая ориентация плоскости разрыва будет почти горизонтальна. Это означает, что даже небольшое вертикальное смещение даст очень большую величину горизонтального смещения (см. области разрыва в доменах 25/26, рис. 42). Такого типа данные могут вызвать ошибку в вычислениях и аварийную остановку вычислений программы. Каждый раз, когда это возможно, необходимо избегать таких ситуаций, внося в замеры небольшую поправку. Другой случай – очень большое вертикальное

смещение по разлому и относительно высокое горизонтальное смещение (5–10 км и больше). Любая оценка такого значительного смещения не может быть точной, потому что падение поверхности разрыва на большом расстоянии не может быть постоянным – крупный разрыв не является заведомо плоским повсеместно. Это означает, что относительно небольшие смещения по разрыву, 1–3 км, и плоская поверхность разрыва являются предусмотренными условиями модели для корректных вычислений. Если это необходимо, в случае больших смещений могут быть внесены небольшие поправки в осредненные замеры главных параметров домена (AX, EN, SH), поскольку в природных складках всегда существуют некоторые отклонения этих параметров от среднего.

Если существуют несколько параллельных структурных пересечений через одну структуру, имеет смысл сравнить результаты реконструкции смежных профилей. Идея линейности структуры включает в себя существование определенной ее ширины, что может быть использовано в этом случае. Если какой-либо разрыв в одном профиле покажет ненормально большое смещение (см. второй случай выше), то ширина соседней структуры, в которой не было большого разрыва, должна использоваться как образец для внесения поправки.

Характер разрывов в природной складчатой структуре и в ее доскладчатом состоянии может отличаться от привычных представлений. Например, обычное определение «надвиг / сброс», связанное только с возрастом пород и направлением падения плоскости разрыва может быть более сложным. Так, на основании признака «более древние породы в поднятом висячем блоке» тип разрыва между доменами 23/24 (рис. 41) может быть определен как «надвиг». Но смещение по этой разрывной структуре после восстановления было найдено как «сброс». Здесь оказалось важным соотношение углов падений осевых плоскостей складок и плоскости разрыва. Надо заметить также, что, в конечном счете, после реконструкции очень многих структурных профилей Большого Кавказа, сумма смещений по «надвигам» и «сбросам» по отдельности для многих пересечений фактически оказалась очень близкой; т.е. природная складчатость имеет разрывные нарушения обоих типов.

5.8 Способы внесения исправлений в файл исходных данных («*.BCS»)

Самым простым методом является исправление начальной версии файла с данными в обычной программе MS NOTEPAD. (Будьте внимательны! После строки данных для последнего домена следующей последней строкой должна быть пустая!) После записи исправленного файла данных на диск (после сохранения данных), этот файл по запросу снова загружается в программу «CROSS-B4.EXE». Можно также исправить данные в процессе работы программы сразу после показа параметров домена (см. рис. 18, «TO CORRECT DATA») путем выбора (нажать «1», далее ENTER). В этом случае все параметры должны быть внесены еще раз с клавиатуры, включая скорректированные и нормальные (AX, EN; SH; L, Tlt; Bnd, Dip Fault; Strat., NumFld; Age, Color). (**NB!** В этом случае параметры всех доменов, следующих за исправляемым доменом должны быть внесены также еще раз с клавиатуры).

Для первого эпизода обработки данных по программе «CROSS-B4.EXE» в файле «*.bcs» конечно должны быть указаны глубины тех доменов, которые находятся «после плоскости разрыва». Но глубины всех обычных доменов (не «после разрыва») могут быть обозначены как «0». Во время вычислений эти параметры будут обязательно определены, и во время заключительной записи файла с данными эти глубины будут автоматически записаны в файл. Запись файла на диск (т.е. сохранение данных) может быть использована после вычислений параметров любого домена N (для этого надо указать выбор «2» «SAVE DATA» в верхней строке, рис. 38, например). Все оставшиеся домены (N+1 ...) при этом не будут записаны, поэтому в

этом случае лучше использовать новое название файла, во избежание полной потери старого. Нормальное завершение программы без изменения файла с данными (например, для последующего редактирования в NOTEPAD) осуществляется выбором «3» («EXIT») после завершения вычислений для любого домена.

Полная информация обо всех начальных и расчетных параметрах может быть написана в итоговом файле-резюме (*.DCS, рис. 39). Но этот файл имеет сложную структуру, и для обычных целей достаточно информации в файлах – копиях экрана.

6. Инструкция по формированию структуры, сбалансированной по объему осадочного чехла. Использование материалов, полученных при подсчетах по программе «CROSS-B4.EXE»

6.1 Создание таблицы EXCEL с результатами вычислений (на основе файлов копий экрана; файл «SECTION-2.XLS»)

На первом шаге формирования квази-3D модели осадочного чехла необходимо объединить основные данные расчетов программы «CROSS-B4.EXE» в одной таблице и вычислить полное сокращение структуры в профиле (рис. 43). Самым простым методом достижения этой цели будет использование файлов копии экрана (1–6; 6–11 ...). Параметры «длина линии профиля» и «наклон» этой линии (рис. 43Б, буквы F, 1500 и G,-4) должны быть внесены в колонки F и G таблицы «SECTION-2.XLS». Горизонтальная длина этой линии (горизонтальное проложение) вычисляется в колонке «H». Формула XLS-ячейки – $[H(N) = F(N) * \cos(G(N))]$. Результаты вычисления доскладчатой структуры, такие как горизонтальная длина доскладчатой линии профиля для домена (D, 2763, рис. 43Б) и амплитуда смещения по плоскости разрыва (C, -445, рис. 43Б) вносятся в колонки C и D (рис. 43А). Последовательное суммирование длин этих линий и амплитуд смещений C(N), D(N) и объединение с предыдущими данными происходит в колонке E; в итоге это будет доскладчатая длина структурного профиля. Формула XLS-ячейки - $E(N) = C(N) + D(N) + E(N-1)$. Такое же суммирование современной длины профиля размещается в колонке «I»; формула XLS-ячейки – $I(N) = I(N-1) + H(N)$.

В результате этого первого шага вычисляется полное сокращение структурного профиля. Для доменов 2-25 (только Чиаурская зона) доскладчатая длина профиля составила 57134 м (см. строку 40 колонки F; «F»40; 58375 - 1241), и современная длина профиля 27155 (см. «G»40; 28156 - 999). Величина сокращения для доменов 2-25 составила 0.48 или 52.5% (см. «I»42 и «I»43).

6.2 Выбор структурных ячеек в доскладчатом состоянии структурного пересечения

Величина сокращения для всей тектонической зоны 60-километровой начальной ширины является важной информацией, но для дальнейшего анализа не очень существенной. На обсуждаемом этапе надо найти решение проблемы – каков размер такой структуры, в которой может быть определено тектоническое сокращение, не искаженное дисгармонией. Решение проблемы было найдено в рамках представлений о «структурной ячейке», имеющей отношение к «Простейшей Математической Модели Адвекции» (ПММА) М.А. Гончарова [Гончаров, 1979].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		2	Keshelta							
3				pre-folded		length		horizontal		
4			distance	length	sum	domain		domain	cumulative	
5		domain N	fault	domain		actual	tilting	length	length	
6		1	0	1241	1241	1000	-2	999	999	
7		2	-291	3920	4870	2200	1	2200	3199	
8		3	0	2942	7812	1650	3	1648	4847	
9		4	0	883	8695	400	3	399	5246	
10		5	0	3188	11883	1500	3	1498	6744	
11		6	0	1427	13310	750	1	750	7494	
12		7	0	3140	16450	1650	1	1650	9144	
13		8	0	3132	19582	1500	7	1489	10633	
14		9	0	4274	23856	1300	9	1284	11917	
15		10	1396	3007	28259	1350	8	1337	13254	
16		11	-272	3074	31061	1100	16	1057	14311	
17		12	0	1142	32203	650	30	563	14874	
18		13	0	1617	33820	750	-11	736	15610	
19		14	150	1281	35251	650	-10	640	16250	
20		15	0	927	36178	550	-7	546	16796	
21		16	149	1805	38132	1000	-7	993	17789	
22		17	0	1332	39464	400	-8	396	18185	
23		18	4	2402	41870	1250	-7	1241	19425	
24		19	0	1571	43441	800	-6	796	20221	
25		20	0	1374	44815	700	-6	696	20917	
26		21	0	1913	46728	1000	-5	996	21913	
27		22	-445	2763	49046	1500	-4	1496	23410	
28		23	0	4089	53135	1950	-3	1947	25357	
29		24	-2291	2202	53046	1050	-3	1049	26406	
30		25	0	5329	58375	1750	-2	1749	28155	
31		26	5662	3308	67345	1000	-2	999	29154	
32					67345				29154	
33					67345				29154	
34					67345				29154	
35					67345				29154	
36					67345				29154	
37					67345				29154	
38			0	0	67345				29154	
39			0	0	67345	dom. 2-25	dom. 2-25		29154	
40			0	0	67345	57134	27155		29154	
41			faults	domains		pre-folded				
42			4062	63283	67345	-1600	53072		0,48 SH	
43						fault			52,47	
44										
45										
46										

А

26 KESHELTA-sec2 21 22
 Ax./Env. plane: 102/ 40 120/-28
 Short.of folds: 0.50 0.45
 Len./Tilt. dom:1000/-5 1500/-4 F G
 Bou.T./Flt.dip:2 / - 3 > 102
 Strat/Nunb Fld:-607B/ 3 -6900/ 3
 Age index/Col.:K1U121/ 9K1U122/
 Prefold. Length : 1913 2763 — D
 Prefold. Height : -400 518
 Horiz.Flt.displ: 0 -445 — C

Б

Рис. 43. Таблица «SECTION-2.XLS» (А). (Б) – источник информации таблицы, копия экрана таблицы программы «CROSS-B4.EXE», часть рис. 41. Показаны положения расчетных параметров программы в копии экрана для «SECTION-2.XLS» (С, D, F, G).

Термин «адвекция» в данном случае означает такой вид конвекции, при котором реализуется движение только 0.5 конвективного цикла от обычного многократного кругового движения. При этом теоретически возможном процессе осадочные породы меньшей плотности из нижней половины структуры обмениваются местами с более плотными породами верхней части структуры. Например, это, несомненно, имеет место в соляных диапирах в областях соляной тектоники. В модели ПММА М.А. Гончарова используется только кинематика перемещения точек в ячейке, какие-либо аспекты физики или динамики процесса в ней не учитываются.

Первоначальная идея и основная цель ПММА состояли в изучении деформаций в конвективной ячейке, которая охватывает весь осадочный чехол. При этом для объяснения возникновения структуры использовалась разновидность тепловой конвекции без общего горизонтального сокращения, что должно было интерпретировать происхождение линейной складчатости в рамках одной из версий «фиксизма». Аналогом «тепловой» конвекции в природе считалось увеличение объема пород в нижней части чехла в результате метаморфических реакций в глинистых породах [Шолпо, 1978]. Ценность этой модели для нас состоит в том, что в одной и той же модели объединены два уровня деформации – здесь есть деформации доменов (для пакета слоистости 0.5–2-км мощности; здесь формируются мелкие складки), которые возникают внутри крупных складок, охватывающих весь осадочный чехол (10–15 км мощности). Модификация этой модели с привлечением небольшого сокращения (рис. 44) была использована для моделирования крупных

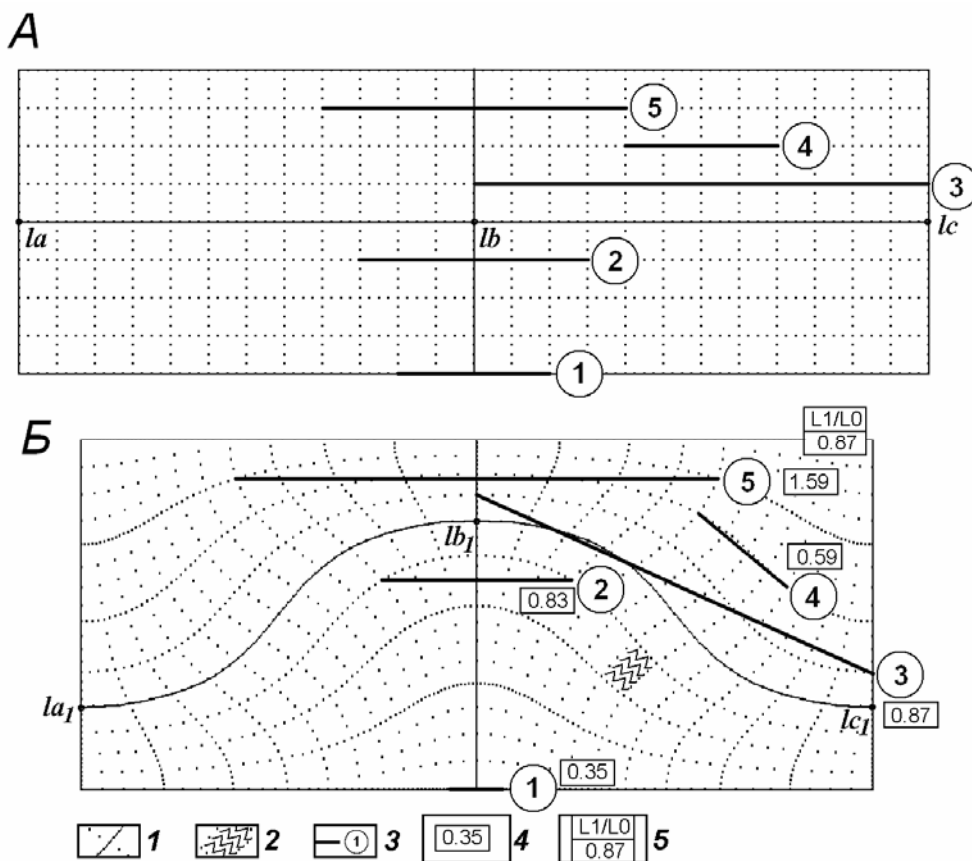


Рис. 44. Дисгармония деформаций в структурной ячейке в версии квази-изгиба в масштабе всего осадочного чехла, по [Яковлев, 2008a]. А – две смежные ячейки в первоначальном состоянии, Б – те же две ячейки после действия комбинации конвективных движений (этап 1) и сплющивания или однородного укорочения $K=0.87$ (этап 2). Сокращение в модели подобрано так, что линия $la-lb-lc$ сохранила свою длину ($la_1-lb_1-lc_1$), что моделирует «продольный изгиб» в масштабах чехла. 1 – первоначальная сетка и ее искажение, слой вдоль сплошной линии сохранил свою длину, 2 – символическое изображение складок в пределах условного домена, 3 – исследуемый отрезок и его номер, 4 – величина горизонтального укорочения для исследуемого отрезка, 5 – величина общего укорочения для ячейки. Показана неоднородность деформации горизонтального сокращения для разных структур (отрезков) в пределах ячеек; сокращение отрезков совпадает с общим укорочением только для отрезка 3.

складок продольного изгиба (в масштабах чехла). «Структурная ячейка» выделялась как пространство между «антиклинальной» осевой вертикальной линией (в точках lb , lb_1) и «синклинальной» линией (в точках lc , lc_1), другими словами, это полуволна большой складки. Анализ дисгармонии этой модифицированной модели (обратите внимание на величины сокращения пяти разных отрезков) показывает, что только «структурная ячейка» может быть использована для измерения чистого «тектонического» сокращения (рис. 44). Для нашей цели этот результат означает, что «структурная ячейка» (длина между точками lb и lc , рис. 44) должна быть выделена в таком горизонтальном (доскладчатом) пространстве слоистой среды, которое близко по размеру к величине мощности осадочного чехла. Это наименьшая структура, которая имеет «тектоническое» сокращение, и в которой на этот результат не влияет внутренняя дисгармония.

Поскольку общая доскладчатая ширина структура Чиаурской тектонической зоны составляет 55-60 км, а мощность осадочного чехла близка к 15 км, число структурных ячеек может составить 4–5. Для выбора границ структурных ячеек

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2		2	Keshelta								cover	15300		
3				pre-folded		length		horizontal						
4			distance	length	sum	domain		domain	cumulative					
5		domain N	fault	domain		actual	tilting	length	length					
6		1	0	1241	1241	1000	-2	999	999					
7		2	-291	3920	4870	2200	1	2200	3199	1		3629		
8		3	0	2942	7812	1650	3	1648	4847			6571		
9		4	0	883	8695	400	3	399	5246			7454		
10		5	0	3188	11883	1500	3	1498	6744	12069	6495	10642		
11		6	0	1427	13310	750	1	750	7494	0,54		12069		
12		7	0	3140	16450	1650	1	1650	9144	46,19		3140	2	
13		8	0	3132	19582	1500	7	1489	10633			6272	10546	4423
14		9	0	4274	23856	1300	9	1284	11917			10546	0,42	10546
15		10	1396	3007	28259	1350	8	1337	13254			4403	58,06	
16		11	-272	3074	31061	1100	16	1057	14311			7205		
17		12	0	1142	32203	650	30	563	14874			8347		
18		13	0	1617	33820	750	-11	736	15610			9964		
19		14	150	1281	35251	650	-10	640	16250			11395		
20		15	0	927	36178	550	-7	546	16796	3		12322		
21		16	149	1805	38132	1000	-7	993	17789	14276	5872	14276		
22		17	0	1332	39464	400	-8	396	18185	0,41		1332		
23		18	4	2402	41870	1250	-7	1241	19425	58,87		3738		
24		19	0	1571	43441	800	-6	796	20221			5309		
25		20	0	1374	44815	700	-6	696	20917			6683		
26		21	0	1913	46728	1000	-5	996	21913	4		8596		
27		22	-445	2763	49046	1500	-4	1496	23410	10914	5621	10914		
28		23	0	4089	53135	1950	-3	1947	25357	0,52		4089	5	
29		24	-2291	2202	53046	1050	-3	1049	26406	48,50		4000	9329	4745
30		25	0	5329	58375	1750	-2	1749	28155			9329	0,51	9329
31		26	5662	3308	67345	1000	-2	999	29154			18299	49,14	
32					67345				29154					

Рис. 45. Вычисления величины сокращения для 5 структурных ячеек в файле CELL-3.XLS. Доскладчатые и современные длины ячеек показаны в XLS-ячейках зеленым цветом. Результаты в виде SH (46.19%) и K (0.54) показаны в ячейках полужирным шрифтом.

может использоваться таблица «SECTION-2.XLS», поскольку здесь есть параметр накопления доскладчатой ширины структуры (колонка E, рис. 43A). Другое свойство структуры, которое необходимо принимать во внимание, – это наличие крупномасштабных складок (последовательность наклона зеркала складок EN) и существование крупных разрывов. На основе этих признаков были выделены 5 ячеек (рис. 42, 45). Наиболее корректно по этим правилам была проведена граница между ячейками 1 и 2, совпавшая с осевой зоной очень большой антиклинальной складки.

6.3 Вычисление значения сокращения для выбранных структурных ячеек (преобразование таблицы «SECTION-2.XLS» до таблицы «CELL-3.XLS»)

Значения сокращения для каждой структурной ячейки могут быть легко вычислены на основе таблицы CELL-3.XLS. Для этой цели используется таблица SECTION-2.XLS, которая переносится в файл CELL-3.XLS. Здесь доскладчатая длина ячейки «1» вычислена в XLS-ячейке «J10» как $J(10) = E(11) - E(6)$. Фактическая, современная длина ячейки вычислена в XLS-ячейке «K10» как $K(10) = I(11) - I(6)$. Результат вычисления коэффициента укорочения K помещается в XLS-ячейке «J11» как $J(11) = K(10)/J(10)$ и в процентах (SH, %) как «J12» = $(1 - J(11)) * 100$. Аналогичные значения были вычислены в XLS-ячейках «M14», «J22», «J28», «M30». Заметим, что доскладчатая ширина пяти ячеек имеет абсолютные значения 12.1, 10.5, 14.3, 10.9, 9.3 км, которые несколько меньше, чем 15 км мощности осадочного чехла, но достаточно близки к этому значению. Оценка ширины 5-й ячейки является дискуссионной из-за крупного разрыва перед доменом 26.


```

26 KESHELTA-sec2 21 22 23
Ax./Env. plane: 102/ 40 120/-28 120/ 30
Short.of folds: 0.50 0.45 0.40 M
Len./Tilt. dom:1800/-5 1500/-4 1950/-3 L
Bou.T./Flt.dip:2 / - 3 / 102 1 / -
Strat/Numb Fld:-6078/ 3 -6900/ 3 -6382/ 3
Age index/Col.:K1U121/ 9K1U122/ 9K1U123/ B
Prefold. Length : 1913 2763 4089
Prefold. Hight : -400 518 -425 C
Horiz.Flt.displ: 0 -445 0

```

Рис. 46. Источники материала для таблицы файла «CELL-4.XLS». Параметры «доскладчатой высоты смещения» линии профиля от первой до второй точек (С), и глубина первой точки домена (В) используются для расчета средней глубины ячейки по линии профиля. Длина и наклон линии реального профиля (L, М) используются для расчета средней топографической высоты линии профиля в ячейке.

6.4 Вычисление средней «стратиграфической» глубины линии профиля, средней топографической высоты и амплитуды неотектонического поднятия для структурной ячейки; формирование файла CELL-4.XLS на основе копий экрана

Следующий шаг формирования квази3D модели осадочного чехла – это вычисление позиции структурной ячейки в стратиграфической колонке осадочного чехла и амплитуды неотектонического поднятия или (что почти то же) величины соскладчатого и син-орогенного размыва верхней части осадочного чехла. С этой целью используются материалы копии экрана (рис. 46), которые помещаются в две смежные таблицы (файл «CELL-4.XLS», рис. 47, 49, 50). В «Таблице 1» «CELL-4.XLS» вычисляется средняя стратиграфическая глубина линии профиля для каждой

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	table 1							
2	calculation of depths (stratigraphic) of section lines for structural cells							
3						average		2-nd stage
4	section 2	Keshelta			depth	depth	shortening	depth
5	number	first	delta	last	average	for cell	K(SH)	post-folded
6	1	-5000	115	-4885	-4943			
7	2	-2800	-499	-3299	-3050			
8	3	-3299	-878	-4177	-3738			
9	4	-4177	-333	-4510	-4344			
10	5	-4510	-967	-5477	-4994			
11	6	-5477	-792	-6269	-5873	-4400	0,54	-8147,22
12	7	-6269	931	-5338	-5804			
13	8	-5338	581	-4757	-5048			
14	9	-4757	488	-4269	-4513	-5121	0,42	-12193,7
15	10	-5200	787	-4413	-4807			
16	11	-4200	572	-3628	-3914			
17	12	-3628	308	-3320	-3474			
18	13	-3320	-190	-3510	-3415			
19	14	-4150	242	-3908	-4029			
20	15	-3908	17	-3891	-3900			
21	16	-4450	-613	-5063	-4757	-4042	0,41	-9858,71
22	17	-5063	201	-4862	-4963			
23	18	-4850	-478	-5328	-5089			
24	19	-5328	-469	-5797	-5563			
25	20	-5797	-281	-6078	-5938			
26	21	-6078	-400	-6478	-6278			
27	22	-6900	518	-6382	-6641	-5745	0,52	-11048,2
28	23	-6382	-425	-6807	-6595			
29	24	-8000	162	-7838	-7919			
30	25	-7838	400	-7438	-7638	-7384	0,51	-14478,1
31	26	-8400	102	-8298	-8349			

Рис. 47. Расчеты средней стратиграфической глубины линии профиля для структурных ячеек 1–5 (таблица 1 внутри файла «CELL-4.XLS»).

структурной ячейки. Для этой цели глубина первой точки домена (параметр В, рис. 46) помещается в столбце В, рис. 47, отклонение глубины между первыми и последними точками (параметр С, рис. 46) помещается в столбец С, рис. 47. Глубина последней точки вычисляется в столбце D по формуле $D(7) = B(7) + C(7)$. Средняя глубина для каждого домена была вычислена в столбце E, используя В и D. Используя значения XLS-ячеек столбца E согласно списку доменов в ячейке (например, домены 2–6 для ячейки 1; E (7–11)) вычисляется средняя «стратиграфическая» глубина (XLS- ячейки F11, F14, F21, F27, F30).

Для последующих действий сначала необходимо принять определенную модель развития деформационного процесса или последовательности тектонических событий, что позволит найти алгоритм вычислений. Для Большого Кавказа формирование складчатости произошло раньше, чем воздымание его структуры во время горообразования [Милановский, 1968; Trifonov, Sokolov, 2014]. Период сокращения пространства и образования складчатости начался после палеоцена (35 млн лет) и, возможно, завершился в течение олигоцена (до рубежа 17 млн лет); этот этап фиксируется формированием майкопской серии, составляющей нижнюю молассу. Неотектоническое поднятие началось в сарматском веке (15–13 млн лет), что проявилось в первом появлении конгломератов в верхней молассе; это поднятие получило существенное ускорение в последние 5–2 млн лет. На основе этого мнения была принята модель трех этапов событий, использованная для вычислений (рис. 48).

Согласно модели развития в конце 1-го этапа был накоплен весь объем осадочного чехла и была сформирована горизонтально слоистая среда. Этот этап ассоциируется с доскладчатым состоянием структурного профиля (рис. 42, «С», нижняя часть; рис. 48, этап 1). Во время этапа 2 (до стадии 3) была реализована полная величина сокращения. Считается, что при этом нижняя часть структуры была опущена, а верхняя часть осадочного слоя не поднималась выше уровня моря и эрозии не подвергалась; это предположение касается только расчетной модели. Последние 15 млн лет, на 3-м этапе, уже сформированная складчатая структура была поднята и подверглась эрозии. В соответствии с моделью, были вычислены постскладчатые средние глубины структурных ячеек для линии профиля (столбец H, таблица 1, рис. 47). Этот стратиграфический уровень пород поднялся на высоту современного рельефа в ходе движений третьего этапа. Для определения амплитуды

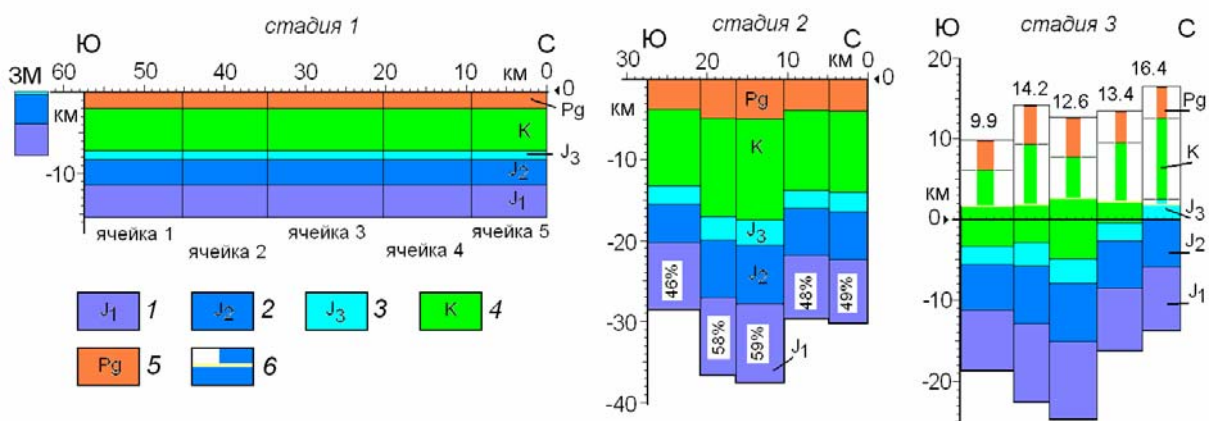


Рис. 48. Модель условных трех этапов тектонического развития, которая использовалась для вычислений, для профиля 12 (по [Яковлев, 2012], часть рис. 5, стр. 204, с изменениями). Показаны 5 ячеек (стадия 1), величины сокращения (стадия 2), расчетная высота кровли осадочного чехла (стадия 3). ЗМ – Закавказский массив. 1 – нижняя юра, 2 – средняя юра, 3 – верхняя юра, 4 – меловые отложения, 5 – палеоген, 6 – положение современного рельефа.

поднятия сначала вычисляется средняя высота линии профиля для структурных ячеек (рис. 49). Для этого собираются величины длины и наклонов сегментов линии профиля (L, M, рис. 46) помещаются в столбцы L и M таблицы 2 (рис. 49).

Первая позиция линии профиля берется с топографической карты, смещение для каждого домена вычисляется по формуле $N(i) = L(i) \cdot \sin(M(i))$. Используя первые и последние позиции высоты домена, средняя высота домена вычисляется в столбце P. Подобно тому, как это было сделано в таблице 1, средние значения высоты для структурных ячеек вычисляются в XLS-ячейках Q11, Q14, Q21, Q27, Q30.

Амплитуда неотектонического поднятия вычисляется в таблице 3 (рис. 50) как разница между современной высотой структуры и ее глубиной на 2-й стадии. Например, неотектоническое поднятие ячейки 1 составило $9877 = 1730 - (-8147)$. Это означает, что породы со средней стратиграфической глубиной -8147 м были подняты на высоту 1730 м. Разумеется, необходимо полагать, что все отложения, которые были выше этого уровня, были разрушены. Очень возможно, что некоторая часть (0.5?) этого очень большого объема разрушенной колонны пород была размыва в время формирования складчатости еще до начала поднятия горного сооружения в чистом виде. Но в настоящий момент нет никаких данных, которые могут позволить оценить это явление. Это означает, что отношения между складкообразованием (как

I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	table 2							
2	calculation of altitude (topography) of line of structural cells							
3								average
4	section 2	Keshelta					altitude	altitude
5	number	first	L	TLT	delta	last	average	for cell
6	1	1635	1000	-2	-35	1600	1618	
7	2	1600	2200	1	38	1638	1619	
8	3	1638	1650	3	86	1725	1682	
9	4	1725	400	3	21	1746	1735	
10	5	1746	1500	3	79	1824	1785	
11	6	1824	750	1	13	1837	1831	1730
12	7	1837	1650	1	29	1866	1852	
13	8	1866	1500	7	183	2049	1958	
14	9	2049	1300	9	203	2252	2151	1987
15	10	2252	1350	8	188	2440	2346	
16	11	2440	1100	16	303	2743	2592	
17	12	2743	650	30	325	3068	2906	
18	13	3068	750	-11	-143	2925	2997	
19	14	2925	650	-10	-113	2812	2869	
20	15	2812	550	-7	-67	2745	2779	
21	16	2745	1000	-7	-122	2624	2684	2739
22	17	2624	400	-8	-56	2568	2596	
23	18	2568	1250	-7	-152	2416	2492	
24	19	2416	800	-6	-84	2332	2374	
25	20	2332	700	-6	-73	2259	2295	
26	21	2259	1000	-5	-87	2172	2215	
27	22	2172	1500	-4	-105	2067	2119	2348
28	23	2067	1950	-3	-102	1965	2016	
29	24	1965	1050	-3	-55	1910	1937	
30	25	1910	1750	-2	-61	1849	1879	1944
31	26	1849	1000	-2	-35	1814	1831	
32								

Рис. 49. Расчеты средней высоты линии профиля для структурных ячеек 1–5 (таблица 2 внутри файла «CELL-4.XLS»).

table 3			
cells N	depth 2nd	altitude	neotectonic uplift
1	-8147	1730	9877
2	-12193	1987	14180
3	-9859	2739	12598
4	-11048	2348	13396
5	-14478	1944	16422

Рис. 50. Расчеты амплитуд неотектонического поднятия для структурных ячеек 1-5 (таблица 3 внутри файла «CELL-4.XLS» файл) на основе материалов таблицы 1 и таблицы 2 этого файла (рис. 47 и 49).

функцией погружения структуры) и горообразованием (как функцией поднятия структуры и ее эрозии) и изменения этих отношений во времени с начала олигоцена до 5–2 млн лет пока остаются неясными.

Знание параметров амплитуды подъема и величины сокращения в комбинации с моделью осадочного чехла позволяет вычислять глубины (или виртуальные высоты) границ основных стратиграфических подразделений (2D-CELL-5.XLS, рис. 51). Параметры доскладчатой и современной длин ячеек в файле CELL-3.XLS (см. XLS-ячейки J10/K10, M13/N13 и другие на рис. 45) и набор глубин стратиграфических подразделений позволяют создавать схему топологии структуры осадочного чехла всех трех этапов развития ячеек на профилях (рис. 48). Расчетная современная структура трех разрезов для Чиатурской зоны (для стадии 3) показана на рис. 52 и 53.

Поскольку современная топология 2D моделей осадочного чехла в трех разрезах для Чиатурской зоны является весьма сложной по сравнению с другими регионами, построение квази-3D модели этой тектонической зоны не делалось.

Для демонстрации более эффективных вариантов реконструкции аналогичной квази-3D модели ниже на рис. 54, 55, 56 показаны реконструкции трех этапов развития структуры осадочного чехла Северо-Западного Кавказа. Эти модели были созданы

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	section 12				uplift			section 12					uplift
2	Keshelta		K shortening	stage 2	amplitude	stage 3		Keshelta		K shortening	stage 2	amplitude	stage 3
3	cell 1 (a)	thickness	0,54		9877			cell 2 (b)	thickness	0,42		14181	
4	Chiaur zone	depth		0	9877	0		Chiaur zone	depth		0	14181	0
5		2000	0,54	3704					2000	0,42	4762		
6	Pg	-2000		-3704	9877	6173		Pg	-2000		-4762	14181	9419
7		1200	0,54	2222					1200	0,42	2857		
8	K2	-3200		-5926	9877	3951		K2	-3200		-7619	14181	6562
9		1000	0,54	1852					1000	0,42	2381		
10	K1 ap-al	-4200		-7778	9877	2099		K1 ap-al	-4200		-10000	14181	4181
11		300	0,54	556					300	0,42	714		
12	K1 g2-b	-4500		-8333	9877	1544		K1 g2-b	-4500		-10714	14181	3467
13		1000	0,54	1852					1000	0,42	2381		
14	K1 g1	-5500		-10185	9877	-308		K1 g1	-5500		-13095	14181	1086
15		600	0,54	1111					600	0,42	1429		
16	K1 v2	-6100		-11296	9877	-1419		K1 v2	-6100		-14524	14181	-343
17		1000	0,54	1852					1000	0,42	2381		
18	K1 v1	-7100		-13148	9877	-3271		K1 v1	-7100		-16905	14181	-2724
19		1200	0,54	2222					1200	0,42	2857		
20	J3	-8300		-15370	9877	-5493		J3	-8300		-19762	14181	-5581
21		3000	0,54	5556					3000	0,42	7143		
22	J2	-11300		-20926	9877	-11049		J2	-11300		-26905	14181	-12724
23		4000	0,54	7407					4000	0,42	9524		
24	J1	-15300		-28333	9877	-18456		J1	-15300		-36429	14181	-22248

Рис. 51. Расчеты постскладчатой мощности и глубины подошвы стратиграфических подразделений (стадия 2), а также современные пост-орогенные глубины подошвы стратиграфических подразделений (файл «2D-CELL-5.XLS»). Чрезвычайно большие значения как глубины кровли фундамента, так и амплитуды неотектонического поднятия и эрозии неизбежны. Они определяются отношением начальной мощности осадочного чехла и значения сокращения, связанного со складчатостью. Новая мощность осадочного чехла показана значением глубины его подошвы на этапе 2 (D24, K24).

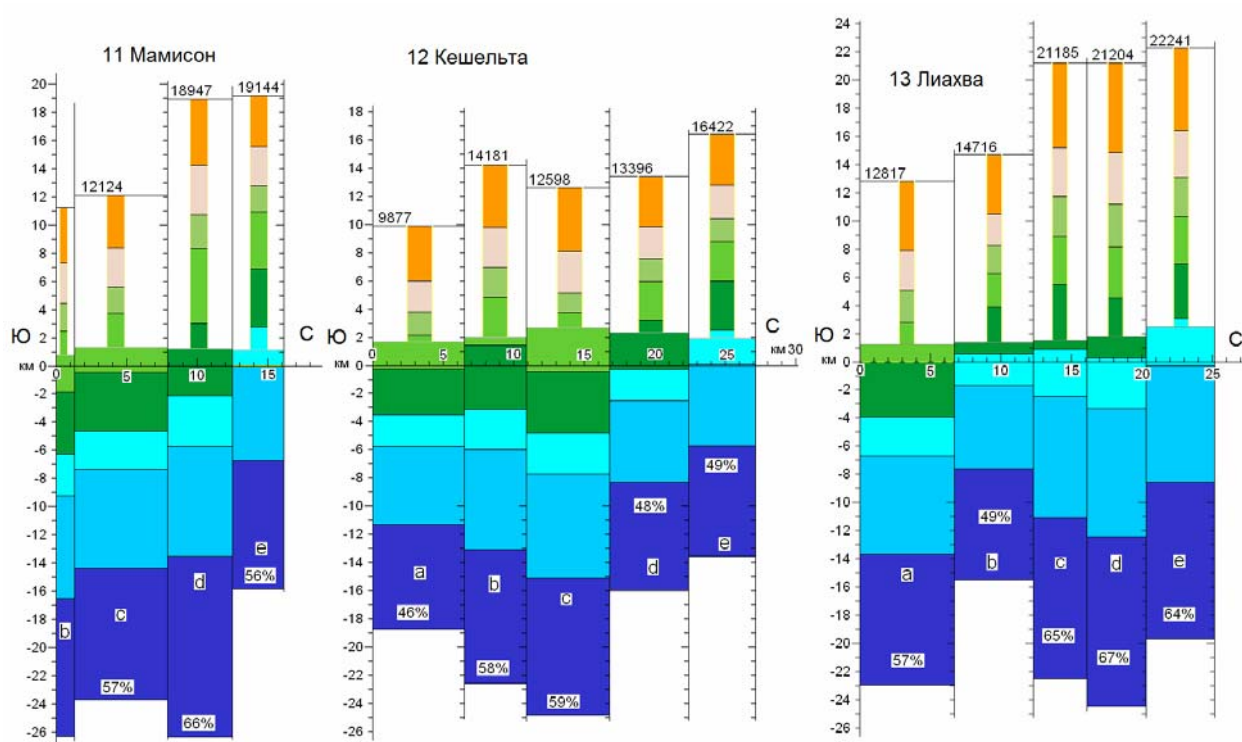


Рис. 52. 2D модели профилей 11–13, построенные по результатам вычислений параметров стадии развития 3, пост-орогенной (современной) (по работе [Яковлев, 2015а], рис. 6-36)

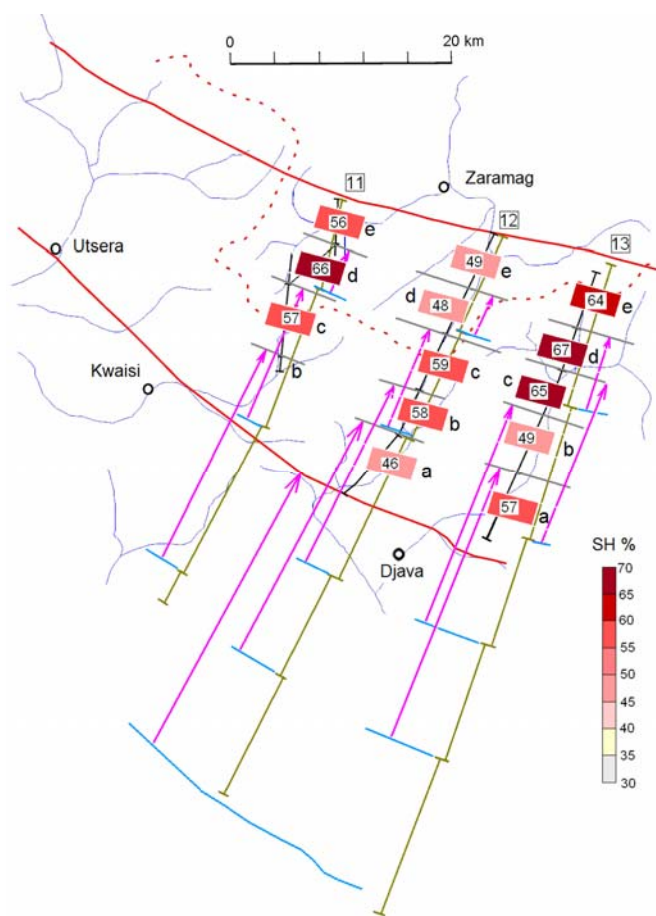


Рис. 53. Схематическая карта положений профилей 11–13 в Чиаурской зоне (пространство между двумя красными границами, они же – разломы, Тибский надвиг на севере и Рача-Лечхумский разлом на юге) с доскладчатыми положениями границ ячеек (синие линии), смещениями (розовые стрелы) и современными позициями (серые линии). Величины сокращения показаны в прямоугольниках согласно цветной шкале, расположенной внизу справа (по работе [Яковлев, 2015а], рис. 6-33).

почти тем же самым методом. Хорошо видно, что структура легко делится на три сегмента, имеющих относительно однородное строение – по профилям 1) 14, 15; 2) 16, 17, 18; 3) 19–24.

Полученные окончательные результаты могут быть представлены в самых разных вариантах – в таблицах, сериях профилей, блок-диаграммах и т.д. В настоящий момент нет никаких стандартных видов представления такого материала. Вероятно, разумным следует признать создание блок-диаграммы серии пересечений (рис. 54–56), если есть такая возможность, поскольку она обладает наглядностью.

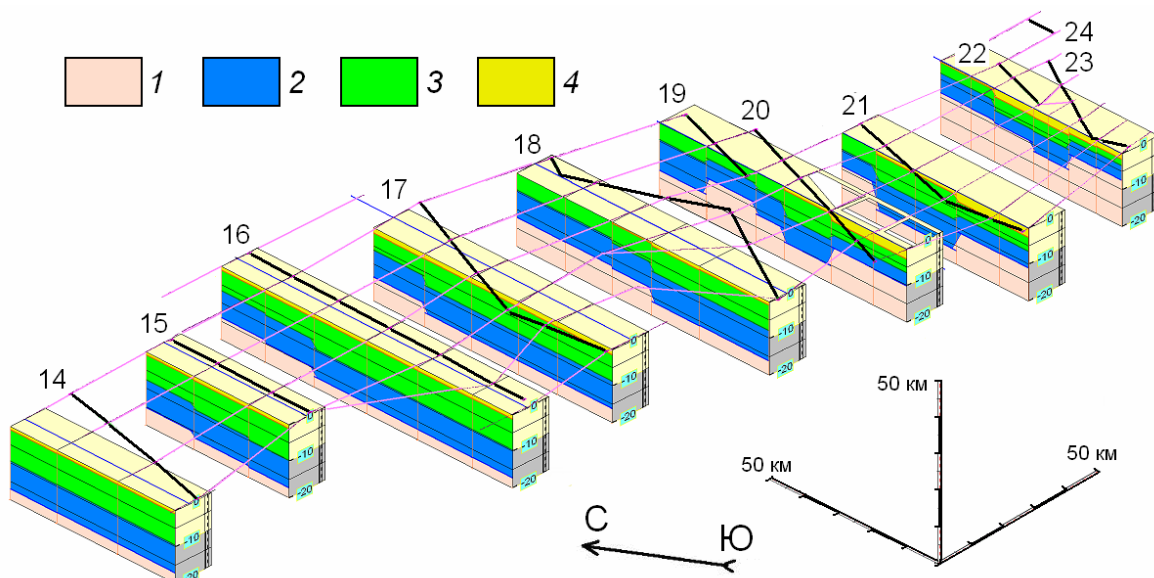


Рис. 54. Структура осадочного чехла Северо-Западного Кавказа, стадия 1, перед формированием складчатости (по работе [Яковлев, 2009б], рис. 9; по [Яковлев, 2015а], рис. 6-49, с изменениями). 1 – палеозойский метаморфический фундамент, 2 – юрские отложения, 3 – меловые отложения; 4 – палеоценовые и эоценовые отложения.

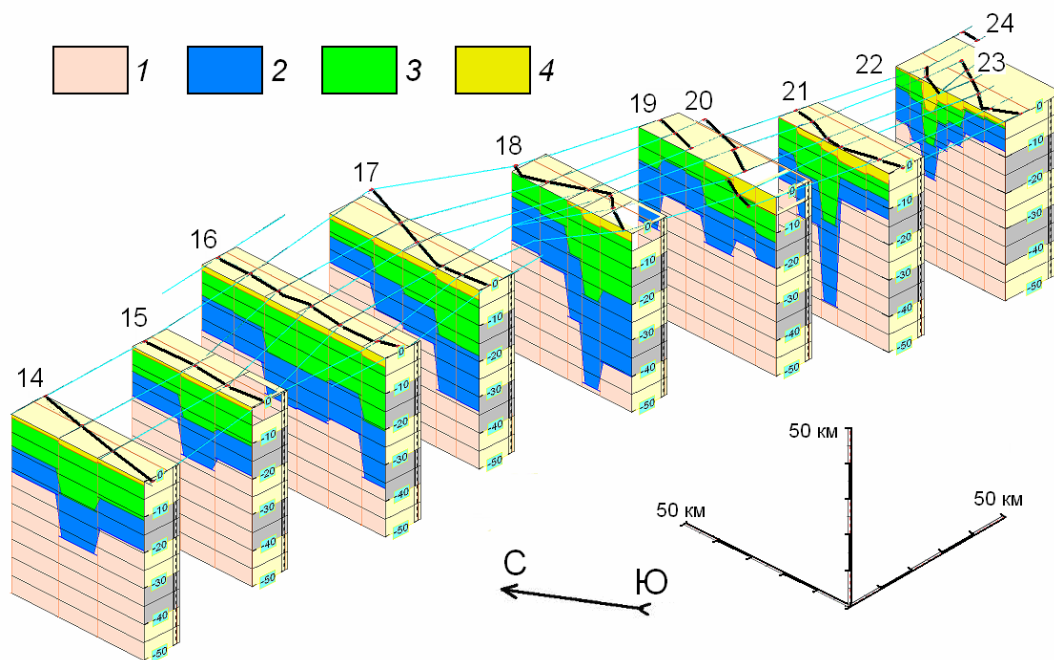


Рис. 55. Структура осадочного чехла Северо-Западного Кавказа, стадия 2 после формирования складчатости, до неотектонического поднятия (по работе [Яковлев, 2009б], рис. 10; по [Яковлев, 2015а], рис. 6-50, с изменениями). Условные обозначения – те же, что на рис. 54.

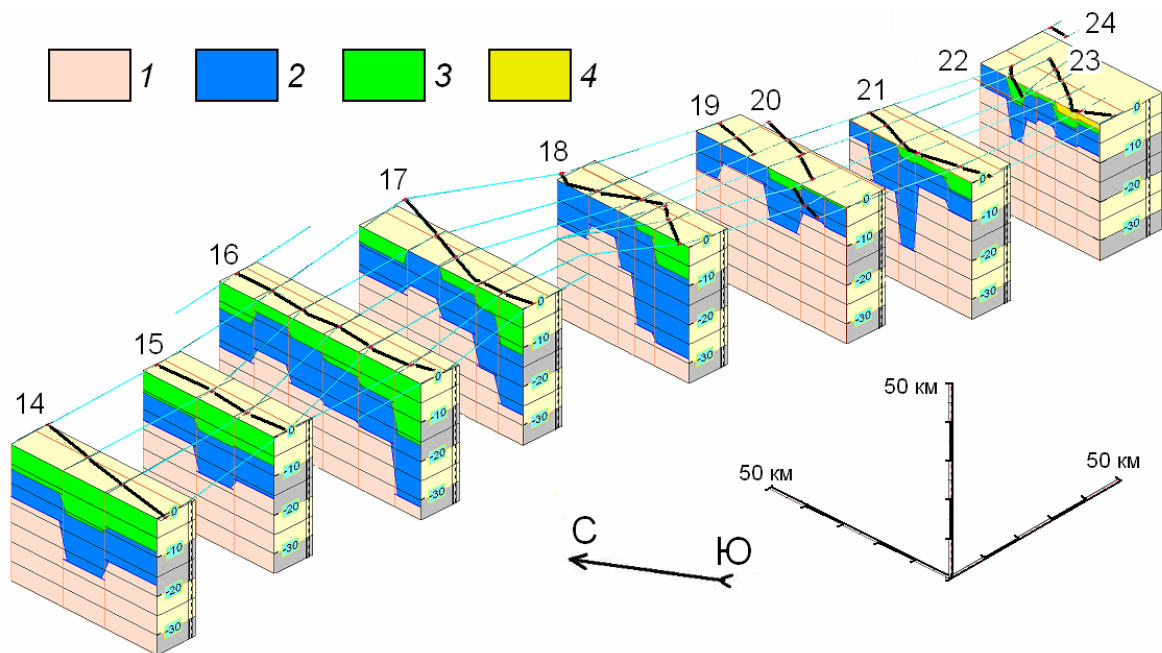


Рис. 56. Структура осадочного чехла Северо-Западного Кавказа, стадия 3, современная, после орогенного поднятия (по [Яковлев, 2009б], рис. 11; [Яковлев, 2015а], рис. 6-51). Условные обозначения – те же, что на рис. 54.

Кроме этого, при подготовке к представлению данных в виде блок-диаграммы необходимым этапом будет являться интерпретация структуры, что следует признать более полезным для понимания структуры, чем просто представление таблиц.

Представленные выше модели (рис. 54–56) были составлены вручную в самом простом графическом редакторе (MS PAINT), поскольку объем материала (количество «структурных ячеек») был небольшим – использовались только 42 ячейки. При этом возникали большие проблемы: прослеживание структуры от разреза к разрезу по простиранию (в целях идентификации одних и тех же ячеек), а также сложная, точнее – неизвестная, топология структуры кровли фундамента при переходе от одной ячейки до другой вдоль профиля. Эти проблемы не позволили эффективно использовать более прогрессивные графические редакторы, имеющие полуавтоматические функции интерполяции структуры. Весьма вероятно, что и для материалов других складчатых комплексов могут возникнуть такие же сложности.

Возможности использования материалов 2D и 3D моделей структуры осадочного чехла для целей структурной геологии, тектоники и геодинамики, а также возникающие при этом проблемы в этой книге также не обсуждаются.

7. Проверка точности вычислений программы, сравнение результатов балансирования с другими данными по величине сокращения складок

Обсудим вопрос: насколько точным является предлагаемый метод измерения величины горизонтального сокращения? Это можно сделать двумя путями. Во-первых, с помощью вычислительного эксперимента можно определить точность, которую обеспечивает технология вычислений. Во-вторых, точность метода в самом общем виде можно оценить путем сравнения с величинами сокращения структур меньшего размера, полученными другими методами.

Кроме программы «CROSS-B4.EXE», для исследований по проблеме складкообразования были составлены и использовались несколько программ кинематического моделирования, которые могут формировать различные складчатые

структуры (численные, геометрические, не методом конечных элементов). Для проверки программы «CROSS-B4.EXE» использовались экспериментальные численные модели складчатой структуры. Одна из моделей была сформирована двумя этапами. Первая стадия сформировала общую структуру конвективного типа в чистой форме без внешнего сокращения, состоящую из 10 доменов (ПММА Гончарова [1979], модель адвекции/конвекции). Модель была представлена файлом стандартных параметров этих доменов. На второй стадии на модель было наложено внешнее сокращение (рис. 57Б, 50%), что выразилось в трансформации параметров. Заметим, что эта же схема, имеющая 2 стадии деформации, использовалась также для создания моделей крупных складок (мезо-изгиба или квази-изгиба, см. рис. 44, стр. 38 настоящей работы). Для процедуры проверки вычислительной точности метода указанный стандартный набор данных для 10 доменов, в котором нет никакого прямого указания на величину общего сокращения, был передан программе «CROSS-B4.EXE» в стандартном файле «*.BCS». Затем была проведена процедура реконструкции доскладчатой структуры и определено общее сокращение структуры (рис. 57А). Было скомпилировано общее изображение структуры (рис. 57Б, В). В этой структуре было задано внешнее сокращение 50% (от 10000 м до 5000 м). Отклонение от правильного ответа в результате работы программы (Рис. 57Б, В) составило около 1% (10000 м и 9906 м). Принимая во внимание усреднение всех параметров в переданных модельных данных для 10 доменов как по длинам (до 1 м), так и по углам (до 1°), следует рассматривать полученную точность вычислений как очень высокую. В процессе многолетней разработки и отладки нескольких версий программы (сейчас – «CROSS-B4.EXE») такого рода проверки осуществлялись неоднократно.

В Чиатурской зоне были исследованы два морфологических типа отдельных складок, для чего были использованы специальные методы определения величины

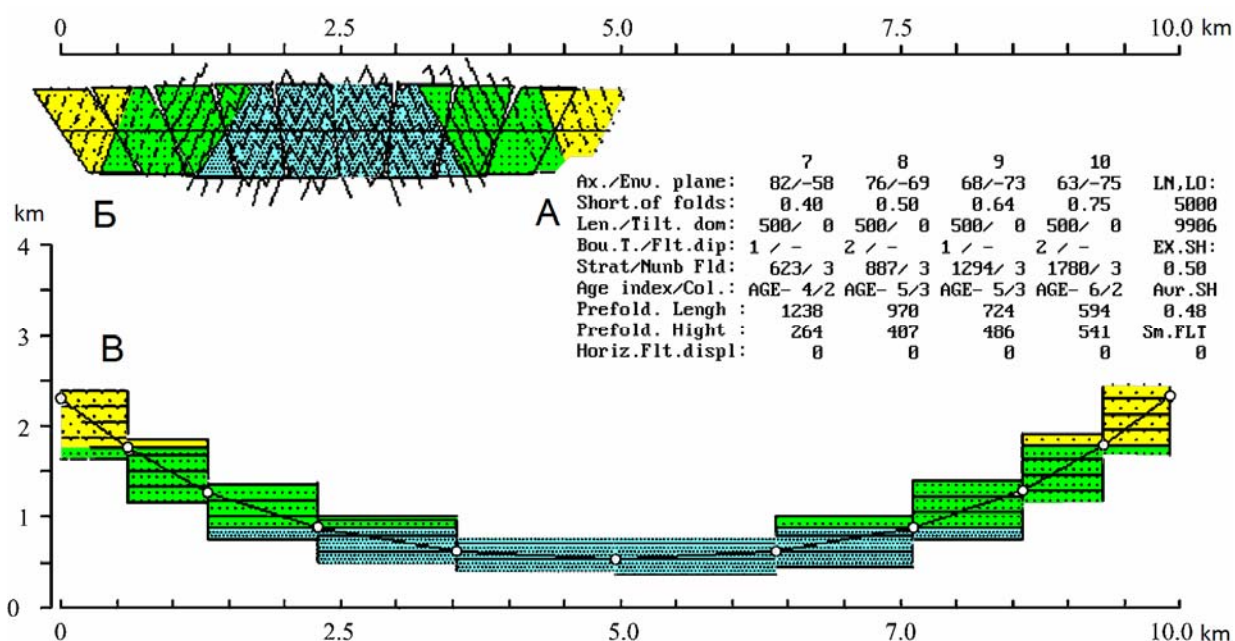


Рис. 57. Использование компьютерной программы для тестирования метода. Показаны объединенные копии экрана (по работе [Яковлев, 20086], с изменениями). А – таблица начальных параметров для доменов, основных результатов вычислений в доменах и текущих параметров всего профиля (LN, LO и др.), Б – символические изображения современной модельной складчатой структуры, цвета условные (показаны все 10 доменов, длина условного современного профиля – 5 км), В – доскладчатая структура для 10 доменов (исходная длина структуры 10.00 км, восстановленная длина доскладчатой структуры 9.91 км, т.е. ошибка вычислений метода – около 1%). Показаны вертикальная и горизонтальная масштабные линейки, масштабы совпадают.

сокращения – тип единичных складок вязкого слоя и складки пачек слоев. Метод для определения величины сокращения по морфологии «единичных складок вязкого слоя» [Яковлев, 1978; 2015a], был основан на модели развития морфологии компетентного слоя в менее вязкой среде (в форме синусоиды), которая была рассчитана методом конечных элементов в [Hudleston, Stephansson, 1973]. В этой модели длина крыльев, мощности слоев на крыльях и в замке изменяются во время развития складки. В Чиаурской зоне было найдено 78 складок этого типа, для которых была определена величина укорочения с усредненным значением 56% (Рис. 58А). Во второй модели компетентные слои в парах «компетентный / некомпетентный» изменяли свою мощность на крыльях и в замках складок во время развития складок. Модель имела небольшие итерационные приращения кинематических механизмов «изгиба (вращение крыла складки) плюс общее сплющивание замка и крыла плюс простой сдвиг вдоль осевой поверхности» в складке, имеющей два слоя [Яковлев, 1981; 2015a]. Исследование 36 складок этого вида в том же самом регионе показало то же самое среднее значение сокращения (56%) как и первый метод. Величина сокращения для 13 структурных ячеек, определенная методом балансирования по «геометрии складчатых доменов», составляет в среднем также близкое значение (57%; табл. 4), несмотря на заметную разницу в исходных материалах для вычислений и различия в моделях формирования складок и складчатых структур. Это означает, что предлагаемый метод балансирования сложных (разномасштабных) объектов, которые состоят из многих небольших складок «подобного» морфологического типа, приводит к достаточно надежным результатам.

Следует напомнить также, что обычные методы балансирования структурных профилей, используемые для анализа складок и разрывов предгорных прогибов ([Прокопьев и др., 2004]), для таких объектов не применимы.

Таблица 4. Величина сокращения для 13 структурных ячеек в Чиаурской зоне и ее среднее значение.

11c	11d	11e	12a	12b	12c	12d	12e	13a	13b	13c	13d	13e	Сред.
57	66	56	46	58	59	48	49	57	49	65	67	64	57%

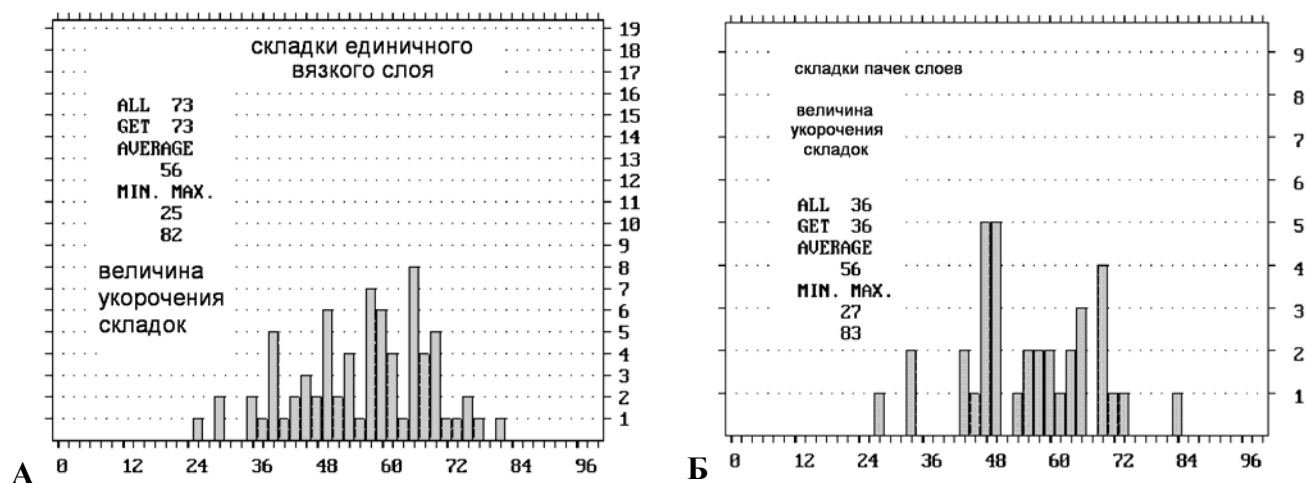


Рис. 58. Гистограммы величины сокращения складок (Sh, %) двух типов и его среднее значение (по [Яковлев, 2015a], рис. 4-8 и рис. 4-20); (А) – для «складок единичного вязкого слоя» и (Б) – для «складок пачек слоев» в Чиаурской тектонической зоне.

8. Дискуссионные вопросы метода балансирования складчатых структур

Прежде всего, необходимо напомнить, что описанный в настоящей книге метод балансирования является новым в том смысле, что он опробован на небольшом числе объектов и только несколькими исследователями. Это означает, что, несмотря на солидный календарный возраст метода (с 1995 г.), опыт его применения для анализа разных природных складчатых структур следует считать недостаточным. Одна из причин такой ситуации лежит в большой редкости доброкачественного исходного природного структурного материала.

Подробное описание складчатой структуры мощного, до 10–15 км, осадочного чехла внутренних частей складчатых поясов, имеющего тонкую слоистость флишоидного типа (0.1 м – 1 м – 10 м мощности для компетентных слоев) и формирующего обычно мелкие складки такой же ширины, в том числе – составление детальных структурных профилей, не входит в состав обязательных видов работ при геологическом картировании, даже крупного, например, 1:25 000 масштаба. Составление детальных карт, планов и структурных профилей проводится только в пределах лицензионных участков месторождений и рудных полей, являющимися отдельными частями всего складчатого пояса. Поскольку месторождения полезных ископаемых в складчатых структурах флишоидных толщ встречаются относительно редко, то недостаток внимания к таким структурам со стороны обычных геологов-съемщиков и отсутствие опыта работы с ними вполне объяснимы. В результате, такие структуры, как правило, остаются неизученными.

Все известные автору материалы детальных профилей (от 1:25 000 до 1:10000) были получены в результате многолетних специально организованных полевых работ научно-исследовательского характера, проводившихся в рамках изучения природы складчатости академическими и учебными организациями в СССР и России ([Яковлев, 2015a], стр. 172). В этой связи упомянем работы сотрудников двух лабораторий В.В. Белоусова в ИФЗ АН СССР и МГУ в альпийском Большом Кавказе (В.Н. Шолпо, Е.А. Рогожин, Ф.Л. Яковлев), в каледонском Таласском Алатау, Северный Тянь-Шань (М.А. Гончаров, А.В. Вихерт, А.Г. Малюжинец, В.Г. Талицкий, Н.С. Фролова), герцинском Туркестанском хребте Южного Тянь-Шаня (Е.А. Рогожин). Согласно устному сообщению Т.В. Гиоргобиани (ГрССР, Республика Грузия), его группой по структурам Большого Кавказа составлены детальные профили более 1 тыс. км общей длины. Поскольку многолетние специализированные полевые работы по изучению складчатых структур внутренних частей складчатых поясов являются крайне редкими в мировой практике, то не следует ожидать большого количества качественного материала такого рода, собранного другими группами исследователей. Представляется, что сбор и публикация такого материала в виде общедоступного банка данных может быть поставлена как важная научная задача.

Другой возможный источник структурного материала – обычные геологические карты. Пример камерального сбора достаточно хорошего материала представлен в недавних работах В.Н. Войтенко с соавторами по Бодайбинскому синклинию [Нилов, Войтенко, 2011; Коннов, Войтенко, 2013]. Наличие детальных (1:50000) геологических карт и удачный характер стратиграфии позволили составить и восстановить в этом районе несколько профилей масштаба 1:50000 (например, [Коннов, Войтенко, 2013]).

Материал перечисленных районов в основном уже был использован для составления сбалансированных разрезов. Это работы автора настоящего исследования по Большому Кавказу, в которых использованы собственные профили,

а также – составленные Е.А. Рогожиным и Т.В. Гиоргобиани. В.Н. Войтенко реконструировал несколько профилей для Таласского Алатау, что вошло в его кандидатскую диссертацию [Войтенко, 2007], для этого были использованы материалы, предоставленные Н.С. Фроловой (МГУ). Из известных материалов остались пока не изученными профили Е.А. Рогожина по Тянь-Шаню, небольшая часть разрезов по Большому Кавказу и большая часть пересечений Т.В. Гиоргобиани по Большому Кавказу.

Надо заметить, что для районов развития герцинской, каледонской и байкальской складчатости (Южный и Северный Тянь-Шань, Бодайбо) изложенный в настоящем издании полный метод восстановления структуры осадочного чехла, к сожалению, не может быть использован. Здесь возможно только получение величин сокращения для частей структуры. Это связано с тем, что для этих регионов нет информации о стратиграфии самых нижних частей осадочного чехла и, соответственно, нет возможности оценить глубину кровли догерцинского и докаледонского фундамента. Аналогично, практически отсутствуют данные о самых верхних, в настоящий момент размытых частях разреза, что не позволяет вычислить «виртуальную» позицию кровли чехла в конце этих тектонических циклов и рассчитать амплитуды поднятия структуры и ее размыва при герцинском и каледонском горообразовании. Все оценки такого рода, вероятно, могут быть сделаны только в виде очень слабо обоснованных гипотез.

Представленная в настоящем издании методика, как уже было сказано выше, является пока слабо апробированной, и может быть уточнена по ряду направлений.

Одно из перспективных направлений внутри описанного метода реконструкции структурных профилей связано с проблемой установления относительного возраста смещений по разрывам. Достаточно очевидно, что в принципе могут различаться конседиментационные движения (по сбросам, вероятно), соскладчатые (надвиги и, возможно, сбросы) и неотектонические, вертикально смещающие уже сформированную структуру. Разделение наблюдаемого современного смещения по разрывам на указанные три стадии, установление амплитуды смещения на каждой стадии представляет собой значительную проблему. Нельзя исключить, что восстановление первоначального положения плоскости разрыва с учетом этих данных может потребовать внесения в метод некоторых специальных операций. В настоящий момент эти движения не различаются и в существующей версии метода никак не учитываются.

Еще одно направление развития метода может быть предложено по характеру «внешних» деформаций. Для «структурных ячеек» пока определяется только внешнее горизонтальное сокращение пространства (горизонтальный чистый сдвиг). Кроме этой самой простой деформации можно предложить оценку смещения границ первоначально прямоугольной ячейки по типу вертикального простого сдвига и/или горизонтального простого сдвига, что позволит уточнить положение в пространстве кровли фундамента (наклон нижней границы ячейки) или положение ее первоначально вертикальных границ. Эти данные, могут быть использованы, например, для прогноза смещения блоков земной коры по крупным разломам.

Уже исследованные крупные структуры отличаются достаточно устойчивой стратиграфией флишоподобных тонкослоистых комплексов, сформировавших линейную складчатость. Однако, следует предусмотреть возможность восстановления таких структур, осадочный чехол которых может включать в себя дельтовые толщи с клиноформами. В этом случае потребуются предусмотреть какие-то специальные операции, компенсирующие исходный наклон слоистости, отличающийся от горизонтального. Вероятно, это можно делать путем введения поправочного угла в

наклон исходной слоистости или разбивая стратиграфическую модель структурной ячейки, сейчас единую, на несколько участков внутри ячейки с разными мощностями стратиграфических подразделений в соответствии с характером клиноформ.

Существуют важные отличия складок «подобных», формирующих линейную складчатость, для восстановления которой предназначен предлагаемый метод, от складок «параллельных», наличие которых в структуре вызывает сложности, как это уже было упомянуто в разделе 4.2. Эти отличия касаются как морфологии, так и механизмов формирования складок, и, к сожалению, недостаточно хорошо освещены в учебниках по структурной геологии. Складки «параллельные» обычно образуются в компетентных толщах большой мощности, формируя крупные складки, имеющие ширину, сопоставимую с мощностью толщи. В предгорных прогибах такие складки могут охватывать весь чехол, до 4-6 км мощности. Если эти структуры принадлежат предгорным прогибам, то они обычно отделены общим детачментом от автохтона и могут быть нарушены надвигами (рис. 59А). Одним из основных свойств является параллельность всех слоев, которые являются как бы частями окружностей с единым центром. Мощность толщ на крыльях и в замке таких складок в целом совпадают (красные стрелки, рис. 59А). Другим важным свойством является ограниченное распространение структуры по вертикали – она ограничена поверхностями дисгармонии (детачмент и поверхность земли, например). Для наших целей важно, что величина сокращения в разных частях структуры существенно разная. В ядре складок она выше, чем на их внешней части (сравните расстояния «а – b», первоначально одинаковые, в антиклинали и в синклинали на рис. 59А). Складки «подобные», в противоположность «параллельным», повторяют свою форму в почти неизменном виде вверх и вниз в осадочной толще вдоль осевых поверхностей, при этом «осевые мощности» в них сохраняются (красные стрелки, рис. 59Б). Достаточно

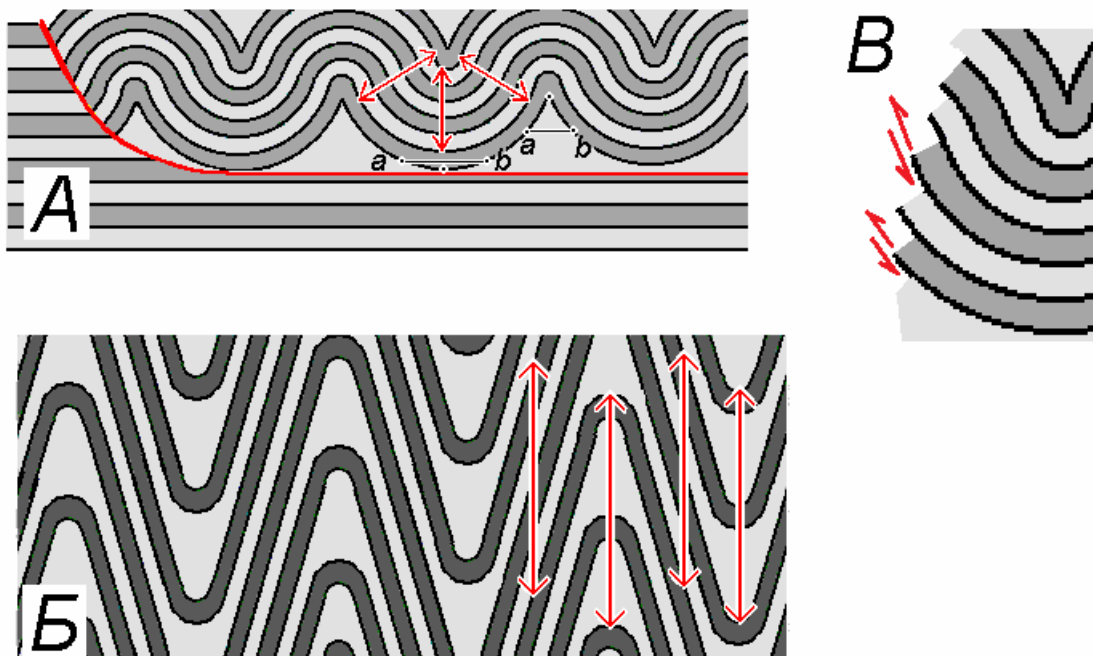


Рис. 59. Отличия «параллельных» и «подобных» складок (темным цветом обозначены компетентные слои), по [Яковлев, 2008в], с изменениями. А – параллельные складки, Б – подобные складки, В – проскальзывание между слоев в складках параллельных (механизмы «изгибного течения», flexural flow, «изгибного скольжения», flexural slip, термины даны по работе [Ramsay, Huber, 1987]).

очевидно, что величина сокращения в таких структурах сохраняется в целом одинаковой во всех частях структуры. Важным свойством структур является возможная комбинация изгибной («параллельной») морфологии слоев компетентных с «подобной» морфологией слоев некомпетентных (рис 59, Б), в которых и происходит большое увеличение мощности слоев в замках. Причем в слоях некомпетентных, если их рассматривать отдельно, увеличение мощности слоя в замке превышает обычное, «подобное». Таким образом, «подобность» морфологии складок в толще формируется парами слоев компетентных и некомпетентных. Именно для анализа таких складок, образующих сложные складчато-разрывные комплексы в мощных толщах осадочного чехла, предназначена методика «складчатых доменов».

Проблема включения крупных складок «параллельного» облика в процедуру восстановления разреза состоит в том, что толща на крыле такой складки подвергается смещениям вдоль слоев (рис. 59, В). Как было указано выше (часть 5.3, стр. 21, рис. 20, Б) смена уровня глубины слоя при переходе от домена к домену в складках «подобных» проходит в доскладчатой структуре по вертикальной линии, которая в складчатой структуре параллельна осевым плоскостям. Поскольку на крыле крупной параллельной складки эта бывшая вертикаль остается неопределенной из-за смещений вдоль слоистости (под действием механизма flexural flow), то такой способ перехода от домена к домену в этой ситуации нельзя использовать – он приведет к ошибкам. Поэтому нет возможности разбить такую складку на несколько доменов, замерить в каждом из них наклон осевой поверхности, величину сокращения и восстановить эти домены по отдельности. Для таких случаев можно предложить дорисовывать складку по какому-то одному слою и измерять длину этого слоя. Для измерения длины слоя можно использовать курвиметр или разбивать слой на серию прямых отрезков. Соотнося данную суммарную длину с горизонтальным проложением соответствующего отрезка линии профиля, можно определить величину сокращения. Разумеется, это должно делаться в виде отдельных операций, за пределами работы компьютерной программы. В этом случае окончательная версия профиля будет состоять из трех частей – двух, составленных в результате работы программы, и третьей между ними, вычерченной вручную по результатам замеров большой «параллельной» складки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит проф. **Стефана Шмалхольца** (Stefan Schmalholz, Lausanne, Switzerland), который в апреле 2015 года предложил автору описать методику балансирования складчатой структуры в отдельной брошюре. Исследователь **Марта Адамусик** (Marta Adamuszek, Poland) прочитала один из первых вариантов настоящего издания на английском языке и предложила дополнить его несколькими методическими уточнениями. Доцент **Вячеслав Николаевич Войтенко** (Санкт-Петербургский Государственный Университет) внимательно прочитал рукопись данного исследования и сделал ряд полезных замечаний, в том числе – относительно необходимости введения поправок в случае участия клиноформ в осадочном чехле и описания действий при наличии в структуре крупных «параллельных» складок.

Приложение 1. Содержание компакт-диска (файлы), адреса Интернет-ресурсов

Прилагаемый к брошюре компакт-диск содержит все программы и файлы, упомянутые в тексте исследования. Кроме этого, в состав диска включены изображения профилей, геологическая карта и схема расположения профилей, а также файлы текста книги на русском языке (официальное издание) и на английском языке (неофициальный перевод).

Вся информация на компакт-диске распространяется свободно в целях ознакомления с методом как можно большего числа специалистов. Ссылки на официальную публикацию обязательны в случае использования методики и материалов в исследовательских целях, научных публикациях или в преподавании.

Программы

DOSBox0.74-win32-installer.exe – файл инсталляции программы *DOSBox*; запускается один раз, в результате на диске «C:» устанавливается программа *DOSBox*.

CROSS-B4.EXE – основная программа, позволяющая проводить балансирование структурного разреза.

instruction dos.txt – инструкция на английском языке по запуску программы *CROSS-B4.EXE* в среде *DOSBox*.

На момент завершения издания книги (июль-август 2017) были предприняты усилия создать версию программы и исполняемый модуль для операционной системы *Windows-7* и моложе с помощью программы *QBasic (64bit)*, которая не будет требовать запуска «*DOSBox*». В случае успеха написания такой программы версия *CROSS-B5.EXE* будет дополнительно выложена по адресам, указанным ниже.

Структурные материалы (исходные)

section-11a.bmp, *section-11b.bmp* – файлы структурного пересечения 11, «Мамисон», с разбиением на домены и без разбиения.

section-12a.bmp, *section-12b.bmp* – файлы структурного пересечения 12, «Кешельта», с разбиением на домены и без разбиения.

section-13a.bmp, *section-13b.bmp* – файлы структурного пересечения 13, «Лиахва», с разбиением на домены и без разбиения.

Файлы для программы CROSS-B4.EXE

Выложены файлы замеров структурных признаков, скорректированные в результате проведения процедур балансирования. Поскольку точность замеров в поле, отбор объектов для замеров и сами замеры на изображении профилей могут давать отклонения, то разница между исходными замерами и скорректированными не является дефектом. Файлы *.BCS используются как данные для работы с программой *CROSS-B4.EXE*; *.DCS – файлы окончательного отчета о расчетных параметрах.

MAMISN11.BCS, *MAMISN11.DCS* – файлы для пересечения 11, «Мамисон».

KESH-12.BCS, *KESH-12.DCS* – файлы для пересечения 12, «Кешельта».

LIAKH-13.BCS, *LIAKH-13.DCS* – файлы для пересечения 13, «Лиахва».

ВН! Названия файлов *.BCS для *Dos*-программ не должны превышать 8 знаков в длину.

Файлы таблиц Excel для расчета ряда промежуточных данных для программы *CROSS-B4.EXE* и окончательных параметров структурных ячеек.

DOMAIN-1.xls – файл для сбора и осреднения замеров структурных признаков, а также подготовки файла данных для программы *CROSS-B4.EXE*

SECTION-2.xls – файл, в котором собираются результаты вычислений по программе *CROSS-B4.EXE* и вычисляется величина сокращения для всего профиля.

CELL-3.xls – файл, в котором вычисляется величина сокращения для выбранных структурных ячеек.

CELL-4.xls – файл, в котором вычисляются: средняя «стратиграфическая» глубина линии профиля, средняя топографическая высота линии профиля и амплитуда неотектонического поднятия для выбранных структурных ячеек.

2D-CELL-5.xls – файл, в котором рассчитываются постскладчатые мощности и глубины подошвы стратиграфических подразделений на стадии 2, а также современные пост-орогенные глубины подошвы стратиграфических подразделений.

Файлы дополнительных геологических материалов

Chiaur-geol-map.bmp – копия участка геологической карты на район Чиатурской тектонической зоны и окружающих структур [Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500000 // Под ред. Д.В. Наливкина и др. Министерство Геологии СССР. ВСЕГЕИ. М.: Аэрогеология, 1978].

Chiaur-sections-map.bmp – космический снимок (*Google Earth*) района Чиатурской зоны и окружающих структур. Показаны расположение линий профилей, границы тектонических зон, основные населенные пункты.

Yakovlev-МНГР-1 (1997).pdf – небольшая монография о методах исследования механизмов складкообразования, в которой есть короткое геологическое описание структур Юго-Восточного Кавказа и Чиатурской тектонической зоны (на русском).

Yakovlev-dokt-diss-2015.pdf – полный текст докторской диссертации, в котором описано геологическое строение ряда складчатых структур Большого Кавказа.

Файлы текста настоящей брошюры на русском языке (официальная версия) и английском языке (неофициальная)

Реконструкция-складчатости-Яковлев-2017.pdf

Reconstruction-of-folding-Yakovlev-2017-en.pdf

Дополнительный **файл** «equipment.doc» содержит фотографии основных инструментов, удобных для измерения параметров структурных доменов в структурных профилях на бумаге, и пояснения о приемах их использования.

Адреса интернет-ресурсов, в которых находятся файлы книги и компакт-диска.

1) Облако на ресурсе *MAIL.RU*, в котором находятся файлы (на 30-08-2017):

<https://cloud.mail.ru/public/6JGP/knqqR5NAs>

2) адреса страницы автора на сайте Института физики Земли

<http://yak.ifz.ru/> – начальная страница

<http://yak.ifz.ru/Yak-publ-fold-r.html> – страница публикаций с загрузкой файлов

<http://yak.ifz.ru/Yak-folding-publ.html> – англоязычная версия страницы публикаций

3) адреса страницы автора на ресурсе ResearchGate:

https://www.researchgate.net/profile/Fedor_Yakovlev

https://www.researchgate.net/profile/Fedor_Yakovlev/publications

Приложение 2. Использование «DOSBox» и запуск программы «CROSS-B4.EXE».

В приложении указан порядок установки на компьютере программы «DOSBox» и порядок ее запуска. В отличие от современных операционных систем, все команды в дисковой операционной системе (DOS) выполняются только набором текста с клавиатуры и нажатием ENTER.

1) Запустите файл «DOSBox0.74-win32-installer.exe» один раз. В результате «DOSBox» будет распакован и установлен на диске «C:». После этого он готов к работе.

2) Создайте на диске «C:» новую папку \1\. Все необходимые файлы (CROSS-B4.EXE; *BCS; и другие) поместите в эту папку (рис. Пр-1).

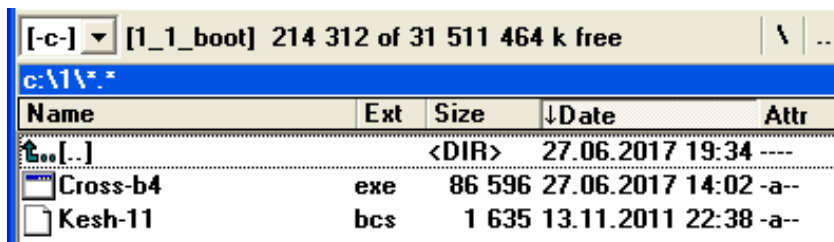


Рис. Пр-1. Содержание директории «\1\»: исполняемый файл программы и файл данных.

3) Запустите работу иконкой DOSBox и выполните другие операции в соответствии с «INSTRUCTION DOS.TXT». Результат показан на рис. Пр-2. Назначения команд: А) команда (*mount c c:\1*) – виртуальный диск (z:) логически присоединяется к существующему диску (c:) и директории (1\); Б) команда (c:) – система переключается на диск c:\1, все файлы этой директории становятся доступны; В) (*dir*) – команда показывает содержимое директории (для справки).

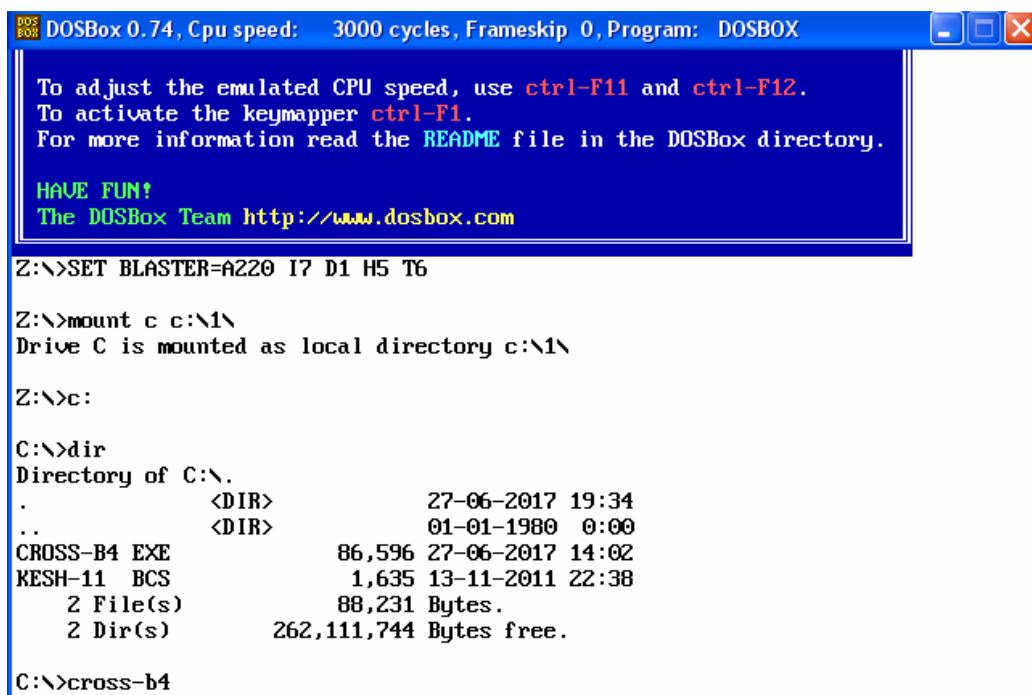


Рис. Пр-2. Копия экрана окна «DOSBox» на экране Windows 7. Были выполнены все предварительные командные строки (см. «INSTRUCTION DOS.TXT»). Командная строка для исполнения «CROSS-B4.EXE» готова к нажатию «Enter». (Центральная часть изображения для удобства чтения дана в инверсии цвета: на экране пользователя реально будут видны белые цифры на черном поле).

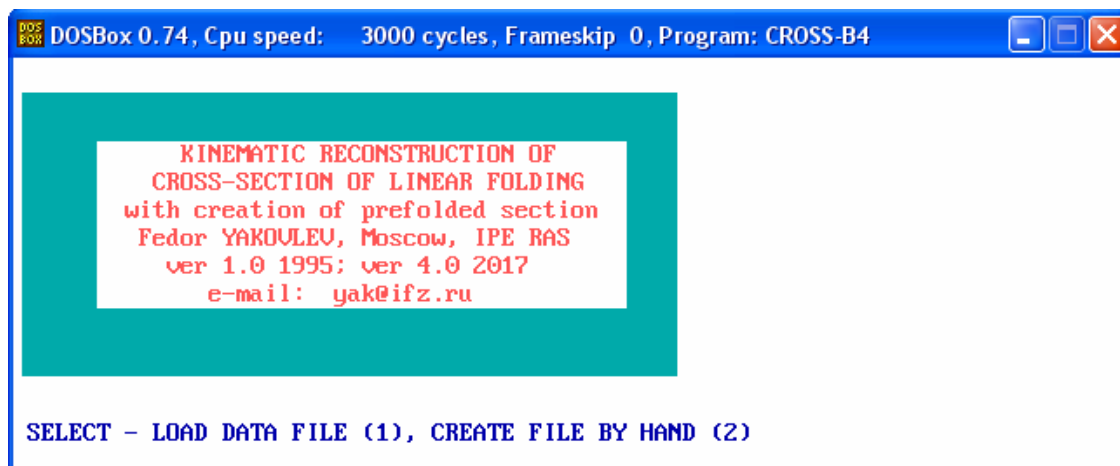


Рис. Пр-3. Копия экрана запущенной программы «CROSS-B4.EXE» в Windows 7 в окне «DOSBox» (после команды «Enter»). Это и другие изображения в окне «DOSBox» могут копироваться стандартной функцией *copy-screen*, которое захватывает весь экран Windows 7.

4) Запустите CROSS-B4.EXE в окне DOSBox. Для этого наберите (*cross-b4*), это вызов исполняемой программы (Рис. Пр-2). Нажмите ENTER, программа будет запущена, результат показан на рис. Пр-3.

5) Дальнейшая работа идет в обычном порядке, описанном в разделе 5.

ЛИТЕРАТУРА

- Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246 с.
- Войтенко В.Н. Количественная оценка деформаций разномасштабных структур Таласского Алатау, Кыргызстан / Диссертация к.г.-м.н. М.: ИФЗ РАН, 2007. 142 с. (<http://search.rsl.ru>)
- Коннов А.Г., Войтенко В.Н. Оценка горизонтального сокращения Бодайбинского синклинория методом восстановления геометрии структурных доменов / Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы третьей молодежной школы-семинара. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2013. т.1. С. 126-128.
- Леонов Ю.Г. (Ред.) Большой Кавказ в альпийскую эпоху. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.
- Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд-во МГУ, 1963. 357 с.
- Нилов С.П., Войтенко В.Н. Определение структурного положения золоторудного участка Копыловский по результатам построения сбалансированного разреза через восточную часть Бодайбинского синклинория / Стендовый доклад на международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина «Современное состояние наук о Земле», МГУ, 2011.
- Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика): Учеб. пособие. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. 148 с.
- Рогожин Е.А. Палеозойская тектоника западной части Туркестанского хребта. М.: Наука, 1977. 98 с.
- Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л. Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника. 1983. № 3. С. 87-98.
- Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, 1978. 176 с.
- Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров. М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.
- Яковлев Ф.Л. Оценка деформаций в складчатой области по дисгармоничным складкам // Бюлл. МОИП, отд. геол. 1978. Т.53(5). С. 43-52.
- Яковлев Ф.Л. Две методики определения размера горизонтального сокращения по морфологии складок / Математические методы анализа геологических явлений: сб. науч. работ. М.: Наука, 1981. С. 70-76.
- Яковлев Ф.Л. Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) // Геотектоника. 1987. № 4. С. 31-48.
- Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: ОИФЗ РАН, 1997. 76 с.
- Яковлев Ф.Л. Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости // Доклады Академии Наук. 2008а. т. 422, № 3. С. 371-376.
- Яковлев Ф.Л. Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизические Исследования. 2008б. т. 9, № 1. С. 56-75.
- Яковлев Ф.Л. Количественные методы анализа природных механизмов формирования складок и систем линейной складчатости / Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Изд-во ИФЗ РАН. 2008в. С. 149 – 188.

- Яковлев Ф.Л. Реконструкция структур линейной складчатости с использованием объемного балансирования // Физика Земли. 2009а. №. 11. С. 1023-1034.
- Яковлев Ф.Л. Квазитрехмерная трехстадийная модель альпийского развития складчатого осадочного чехла Северо-Западного Кавказа по данным о величинах деформаций / «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН»: материалы конференции. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2009б. Т. 1. С. 439-448.
- Яковлев Ф.Л. Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. С. 191-214.
- Яковлев Ф.Л. Многограновый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа / Диссертация на ученую степень д.г.-м.н. по специальности 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика». ИФЗ РАН, 2015а. 472 с. рукопись http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Yakovlev-doct_diss_2015-russ-full.pdf
- Яковлев Ф.Л. Многограновый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа. / автореферат диссертации на ученую степень д.г.-м.н. по специальности 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика» / ИФЗ РАН, 2015б. 44 с. <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Yakovlev-Doctoral%20thesis%20abstract-Russ.pdf>
- Яковлев Ф.Л., Горбатов Е.С. Выявление основных процессов формирования альпийского Большого Кавказа по параметрам сбалансированной модели его структуры (факторный анализ) / Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции – в 2-х томах. Т. 1. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2016. С. 304-313.
- Яковлев Ф.Л., Сорокин А.А. Сопоставление геодинамических моделей развития альпийского Большого Кавказа по параметру «объем размытых пород» / Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции – в 2-х томах. Т. 1. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2016. С. 314-322.
- Hudleston P.J., Stephansson O., 1973. Layer shortening and foldshape development in the buckling of single layers // Tectonophysics. v. 17, 4. pp. 299-321.
- Ramsay J.G., Huber M., 1987. The techniques of modern structural geology. v. 2. Fold and fractures. London: Acad. Press. pp. 308-700.
- Saintot A., Brunet M.-F., Yakovlev F., Sébrier M., Stephenson R., Ershov A., Chalot-Prat F., Mccann T., 2006. The Mesozoic–Cenozoic Tectonic Evolution of the Greater Caucasus. In: Gee, D.G., Stephenson, R.A. (Eds.). European Lithosphere Dynamics. Geological Society, London, Memoirs 32, pp. 277-289.
- Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., 2014. Late Cenozoic Tectonic Uplift Producing Mountain Building in Comparison with Mantle Structure in the Alpine-Himalayan Belt. International Journal of Geosciences, 5, pp. 497-518. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.55047>
- Yakovlev F.L., 2012. Identification of geodynamic setting and of folding formation mechanisms using of strain ellipsoid concept for multi-scale structures of Greater Caucasus // Tectonophysics. 581. pp. 93-113.
- Yakovlev F.L., Voitenko V.N., 2005. Application of the deformation tensor conception for the estimation of deformations in different-scale folded structures / Proceedings of VII International Interdisciplinary symposium and International Geoscience Programme (IGCP-476) “Regularity of structure and evolution of geospheres”, Vladivostok, 20-25 September pp. 66-69. [in English]

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	3
2. Требования, предъявляемые к первичному структурному материалу	3
3. Главные стадии получения результатов – составление сбалансированного разреза и создание трехмерных моделей деформированного осадочного чехла	4
4. Основные особенности метода на подготовительных стадиях работы	5
4.1 Сбор структурного материала в регионе	5
4.2 Выбор границ доменов в поперечном сечении	6
4.3 Сбор измерений параметров геометрии доменов и их усреднение при помощи таблицы EXCEL («DOMAINS-1.XLS»)	8
4.4 Сбор материалов о стратиграфических подразделениях	13
4.5 Ядро компьютерной программы: преобразования параметров домена во время операций восстановления от фактического состояния к доскладчатому	14
5. Инструкции по работе с компьютерной программой	15
5.1 Начало работы программы. Первая страница экрана	15
5.2 Процедуры загрузки файла с данными с диска, заполнения или исправления данных с клавиатуры, запись обновленного или исправленного файла с данными на диск	17
5.3 Выбор дальнейших действий, пошаговое построение структуры	18
5.4 Главный экран программы, демонстрация исходных данных, внесение изменений данных, построение современной/фактической складчатой структуры и доскладчатой структуры, демонстрация результатов вычислений	18
5.5 Переход от экрана N к экрану N+1 для структурного пересечения, имеющего более 6 доменов	23
5.6 Формирование полного структурного пересечения в доскладчатом состоянии	33
5.7 Процедуры балансирования структуры	33
5.8 Способы внесения исправлений в файл исходных данных («*.BCS»)	35
6. Инструкция по формированию структуры, сбалансированной по объему осадочного чехла. Использование материалов, полученных при подсчетах по программе «CROSS-B4.EXE»	36
6.1 Формирование таблицы EXCEL с результатами вычислений (на основе файлов копий экрана; файл «SECTION-2.XLS»)	36
6.2 Выбор структурных ячеек в доскладчатом состоянии структурного пересечения	36
6.3 Вычисление значения сокращения для выбранных структурных ячеек (преобразование таблицы «SECTION-2.XLS» до таблицы «CELL-3.XLS»)	39
6.4 Вычисление средней «стратиграфической» глубины линии профиля, средней топографической высоты и амплитуды неотектонического поднятия для структурной ячейки; формирование файла CELL-4.XLS на основе копий экрана	40
7. Проверка точности вычислений программы, сравнение результатов балансирования с другими данными по величине сокращения складок	46
8. Дискуссионные вопросы метода балансирования складчатых структур	49
Благодарности	52
Приложение 1. Содержание компакт-диска (файлы), адреса Интернет-ресурсов	53
Приложение 2. Использование «DOSBox» и запуск программы «CROSS-B4.EXE»	55
Литература	57

Научное издание

Яковлев Федор Леонидович

**Реконструкция складчато-разрывных структур
в зонах линейной складчатости
по структурным разрезам**

*Рекомендовано к печати Ученым Советом
Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта
Российской академии наук
(решение от 14 июня 2017 г.)*

**Ответственный редактор
редактор**

**д.г.м.н. А.М. Корженков
к.ф.м.н. Р.Ю. Стаховская**

Рецензенты:

д.г.-м.н. **Е.А. Рогожин,**

профессор, зам. директора по науке ИФЗ РАН, Москва

к.г.-м.н. **В.Н. Войтенко,**

доцент, Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург

к.г.-м.н. **А.В. Прокопьев,**

зам. директора по научной работе ИГАБМ СО РАН, Якутск

Подписано в печать 14.07.2017

Усл. печ. л. 7.5; Формат 60x90/8

Тираж 60 экз.

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН