

УДК 551.24.035

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЕМНОГО БАЛАНСИРОВАНИЯ

© 2009 г. Ф. Л. Яковлев

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

Поступила в редакцию 15.05.2009 г.

Структура зон линейной складчатости рассматривается как совокупность объектов нескольких иерархических уровней, имеющих специфические кинематические модели формирования. На основе этих представлений, используя в качестве примера складчатость Северо-Западного Кавказа, было выполнено восстановление доскладчатой структуры и дан прогноз по современным глубинам подошвы осадочного чехла. В качестве основного объекта были использованы складчатые домены. Замеряемые в природных структурах основные параметры их геометрии (наклон осевых поверхностей, наклон зеркала складок и величины укорочения) отождествлялись с эллипсоидом деформаций. Описаны три кинематические операции – поворот, простой горизонтальный сдвиг и растяжение – которые позволяли восстановить горизонтальную слоистость и положение отрезка линии профиля для каждого домена. Последовательным объединением доскладчатых состояний доменов были восстановлены 11 профилей. Были получены величины складчатого укорочения для этих профилей и их 42-х частей. Полученная квази-трехмерная модель природной структуры показывает особенности, важные для проверки геодинамических моделей.

PACS: 91.55.Hj; 91.45.-c

ВВЕДЕНИЕ

В проблеме образования структур линейной складчатости, которая существует уже более двухсот лет, есть стороны, как тесно связанные друг с другом, так и независимые. Разумеется, одна из важнейших – это построение геодинамических моделей таких структур, которые традиционно в рамках тектоники плит связываются с конвергентными границами. В данном исследовании основное внимание уделяется аспектам структурной геологии и механики. Обычно структуры линейной складчатости рассматриваются как совокупность складок нескольких порядков, возникших в результате продольного изгиба. С позиций структурной геологии полная линейная складчатость является сложным объектом, поскольку восстановить (достроить) структуру на большую глубину или в размытую ее часть в точном виде не удастся. Существуют два предельных возможных варианта (например, [Ярошевский, 1981]): 1) использование закономерностей “параллельной” складчатости, которая ограничена мощностью всего чехла и имеет сверху свободное пространство, а внизу – общий детачмент, 2) достраивание структуры на основе законов “подобной” складчатости, при котором наблюдаемая в полосе обнажений форма мелких складок распространяется неограниченно вверх и вниз. Спектр промежуточных вариантов широк, и выбор какого-то одного или их некоторой комбинации обычно делается на основе уже существующей теоретической позиции исследователя. С по-

зиций механики есть две модели, которые в принципе могут быть использованы для описания деформаций линейной складчатости: 1) концепция описания изометричных структур через эллипсоид деформаций для больших деформаций и 2) описание потери устойчивости и напряженного состояния слоев для вариантов продольного изгиба и поперечного изгиба. Первая модель используется в рамках стрейн-анализа [Ramsay, Huber, 1987], вторая успешно реализована для простых структур – складок единичного вязкого слоя (например, [Hudleston, Stephansson, 1973]). Теоретических описаний больших деформаций для многослойных структур не существует (за частными исключениями, например [Ребецкий, Гуценко, 1995]).

Характерной чертой современных исследований является использование хорошо известного тектонотипа форланда с его складчато-надвиговыми структурами для интерпретации внутренних частей складчатых сооружений (хинтерланда). Заметим, что такая операция сомнительна, поскольку слоистая среда последних существенно другая по своим механическим свойствам. Известно, что основные методы определения величины укорочения, такие как стрейн-анализ, метод “избыточной” длины слоя, построение сбалансированных профилей, учет “F-фактора” Дж. Рамсея (J.G. Ramsay), палеомагнитные данные и др. либо касаются только небольших структур, либо не дают нужной точности, либо не могут быть использованы в структурах хинтерланда.

Таким образом, в исследованиях линейной складчатости в области восстановления структуры и оценки укорочения существуют серьезные проблемы в постановке задачи, связанные с выделением объектов и подбором для них теоретической модели на основе механики. Новая постановка этих задач и первые решения предлагаются в данной статье.

ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

Поскольку один из важных аспектов решения проблемы образования линейной складчатости связан с восстановлением (прогнозом) современной структуры на глубину и в размытую ее часть, очевидно, что это можно сделать только при использовании данных о действовавших механизмах и о величинах деформаций в самих природных структурах. При этом опираться следует именно на детальные природные данные, а не на общие модели. То есть, в процедурах получения результата предпочтительно движение от мелких структур, механизм формирования которых и величина деформации известны лучше, к структурам крупным, выявление современной структуры и механизма формирования которых и является целью исследования. Разумеется, предпочтительно опираться на модели формирования структур в рамках динамики, однако, поскольку основные параметры (структура объекта, внутренние и внешние силы, реология и длительность нагрузок) в этом случае остаются неизвестными, в качестве первого шага можно использовать модели кинематические, в которых измеряемые геометрические параметры структуры определенным образом связаны с “количеством” механизма. Геометрические свойства каждой, даже небольшой складки, с этой точки зрения могут содержать достаточно информации для решения таких задач.

Одна из наиболее существенных частей постановки любой задачи – выбор объекта исследования, точнее – определение его границ. Как уже было ранее показано [Яковлев, 2008а], использование общепринятых представлений структурной геологии, которые были разработаны в целях картирования, в данном случае не является перспективным, поскольку объекты такого рода отвечают именно этим целям, а не определению типа и величины деформаций. В нашем случае следует использовать систему иерархии структур линейной складчатости [Яковлев, 1997; Ребецкий и др., 2004], семь уровней которой соответствуют разным объемам слоистой среды. Самым важным является то, что при описании каждого объекта нужно стремиться дать такие необходимые и достаточные параметры его геометрии, которые позволяют составить полное описание его деформированного состояния. Такие кинематические модели устанавливают взаимные связи парамет-

ров геометрии объекта с типом и величиной деформации (“количеством” механизма). Это следующие семь уровней: 1) внутрислойные деформации (искажение формы зерен и включений, предмет стрейн-анализа), 2) отдельная складка (отдельные слои и пары слоев), 3) складчатый домен (серия складок в пачке слоев, крупные части осадочного чехла), 4) структурная ячейка (структуры от ядра локального антиклинория до ядра локального синклинория, осадочный чехол целиком), 5) тектоническая зона (традиционная структура, охватывает часть коры или всю кору), 6) крупная складчатая система (например, мегантиклинорий Большого Кавказа, уровень охватывает всю литосферу), 7) весь складчато-разрывной пояс (глубина охвата, вероятно, превышает толщину литосферы). Для решения обсуждаемой задачи восстановления (прогноза) структуры складчатого сооружения (впервые предложена в [Яковлев, 2007]) будут привлекаться структуры четырех уровней: домены, структурные ячейки, тектонические зоны, складчатая система (частично). Метод будет описан в виде алгоритма и по мере необходимости будут даваться краткие описания этих структур.

В качестве объекта, на котором может быть опробован новый подход, была выбрана структура Северо-Западного Кавказа. Важным ее преимуществом является то, что для этой структуры Т.В. Гиоргобиани и Е.А. Рогожиным [Гиоргобиани, Закарая, 1989; Шолпо и др., 1993] ранее в результате специальных полевых работ были составлены детальные структурные профили (рис. 1). Заметим, что по степени достоверности в передаче структуры такие пересечения являются наиболее достоверными. Обычные “геологические” пересечения, которые составляются по материалам геологической карты с целью ее иллюстрации, отражают только наиболее общие черты структуры, а совсем уже недостоверными являются “концептуальные профили”, которыми, как правило, и иллюстрируется строение складчатых сооружений [Дотдугев, 1986; Robinson et al., 1996].

СКЛАДЧАТЫЙ ДОМЕН, ЕГО ГРАНИЦЫ И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Шаг 1: выделение доменов, измерение всех параметров. Основным исходным материалом в предлагаемом методе являются геометрические параметры доменов – частей структурного пересечения, занимающих определенный изометричный в разрезе объем деформированной слоистой среды (рис. 2). При описании деформации доменов мы будем использовать понятие эллипсоида кратности, главные оси которого совпадают (постулат метода) с линией, перпендикулярной к осевой плоскости складок, шарниром складок и перпендикуляром к шарниру, лежащим в осевой плоскости. Осевая плоскость определяется как поверхность, проходя-

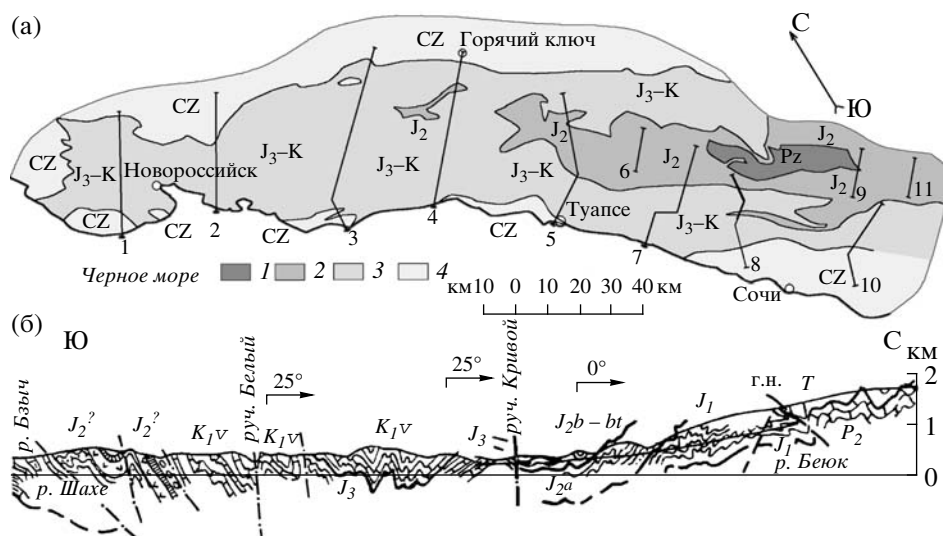


Рис. 1. Карта-схема Северо-Западного Кавказа (а) и пример детальной структуры (б) для северной половины профиля № 8 (материал Е.А. Рогожина [Шолпо и др., 1993]).

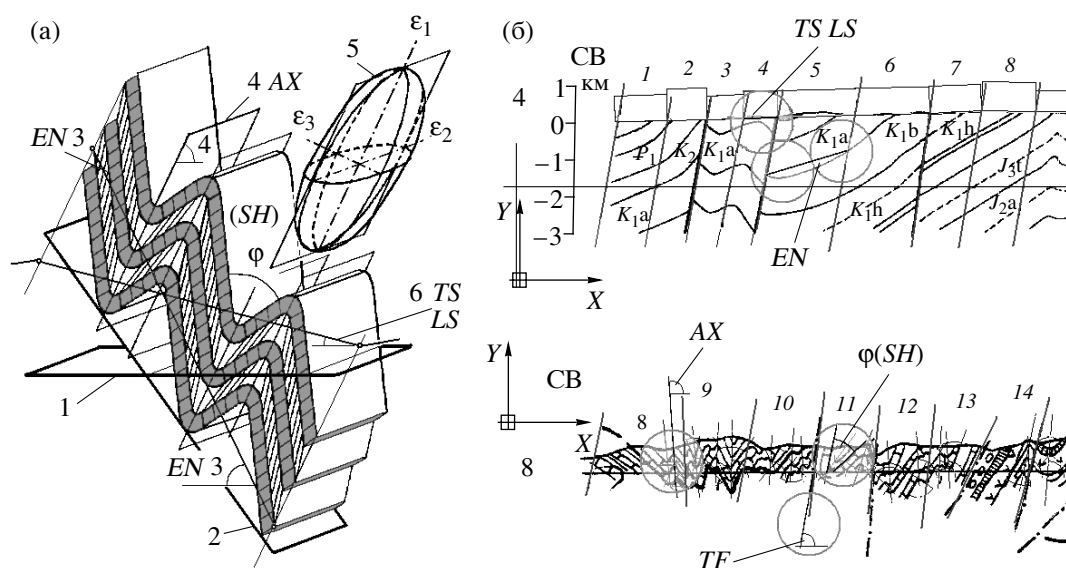


Рис. 2. Основные параметры геометрии домена и их измерение: (а) – основные параметры (по [Yakovlev, Voitenko, 2005], с изменениями): 1 – горизонтальная плоскость; 2 – зеркало складок (поверхность, огибающая замки складок); 3 – линия первичной слоистости и ее наклон (EN); 4 – осевая плоскость складки и ее наклон (AX); 5 – эллипсоид кратности (величина укорочения складок в направлении перпендикуляра к осевой плоскости); 6 – отрезок линии профиля, его длина (LS) и наклон (TS); φ – угол схождения крыльев складок, используемый для определения величины укорочения (SH); (б) – замеры параметров в природных структурах в программной среде ACAD. Показаны: профиль 4 (вверху) – материалы Т.В. Гиоргобiani, профиль 8 – материалы Е.А. Рогожина, по техническим причинам – в зеркальном состоянии, север слева. Серые цифры и серые субвертикальные линии – выделенные домены и их границы. На сером фоне в доменах 4 и 5 показаны замеры параметров TS , LS и EN , в доменах 9 и 11 – AX , φ (SH), между 10 и 11 – наклон плоскости разрыва TF .

щая через места наибольшего перегиба слоев в складке “подобного” типа. Перпендикуляр к осевой плоскости и есть ориентировка оси максимального укорочения эллипсоида кратности, промежуточная ось в общем случае располагается

вдоль шарнира. Ось удлинения лежит перпендикулярно к шарниру и вдоль осевой плоскости, наклон которой, таким образом является важным деформационным параметром. Компоненты эллипсоида кратности определяются как $e = L_1/L_0$ и связаны с

эллипсоидом деформаций $\varepsilon = \ln(L_1/L_0)$ [Работнов, 1979]. Подобное описание деформационного состояния складок в принципе встречается в литературе [Николя, 1992, с. 120], но не является распространенным и никак не используется. Соотношение величины укорочения и самого эллипсоида деформаций домена с эллипсоидами для объемов внутри компетентного и некомпетентного слоев описано в работах [Яковлев, 2002; Yakovlev, Voitenko, 2005].

В пределах домена в природной структуре должны объединяться складки примерно одного облика (рис. 2): по возможности с одинаковой ориентацией осевых поверхностей, относительно общим наклоном зеркала складок и с относительно одинаковой величиной укорочения. Любое значительное изменение одного из параметров вдоль профиля является поводом провести границу домена. Важно также следить, чтобы размер доменов вдоль линии профиля был примерно одинаковым. В доскладчатом состоянии соседние домены должны соприкасаться по вертикальным границам. Поскольку в общем случае осевые поверхности зарождаются перпендикулярно горизонтальной слоистости, то границы доменов в природных структурах проводятся в виде линий, параллельных осевым поверхностям. Домен привязывается к тому пространству, где он лучше всего виден – к линии профиля, которая проходит вдоль рельефа. Для этого находятся точки пересечения линии профиля и линий, ограничивающих домен. Поэтому первые два параметра, измеряемые в домене, это: 1) – длина прямого отрезка профиля LS в пределах домена от его входной точки до выходной и 2) – наклон этого отрезка TS ($\pm 45^\circ$), отсчитываемый от горизонтальной направления, выбранного для нескольких параллельных пересечений (рис. 2б, профиль 4). В пределах природного домена измеряются наклоны нескольких осевых плоскостей складок (от выбранного направления, соответственно от 0 до 180°) и полученные величины осредняются. Это параметр 3) – наклон осевой плоскости AH . Далее на прорисованной в пределах домена структуре выбирается слой, который либо уже пересекает обе его границы, либо который легко дорисовать до таких границ. Через две точки, образованные пересечением этого слоя и границ домена, проводится прямая линия, ее наклон (от выбранного направления) является следующим измеряемым параметром: 4) – наклон линии исходной слоистости EN (аналог зеркала складок, $\pm 90^\circ$). Заметим, что для определения величины укорочения складок в принципе следует использовать специальные методы, основанные на моделях механики (или на кинематических), и использующие параметры геометрии слоя в качестве измеряемых параметров [Яковлев, 1978; Яковлев, 2008б]. Однако если специальные полевые работы не проводились, то можно использовать самый простой метод – определение величины

укорочения по углу между крыльями складок φ (рис. 2б, профиль 8).

$$SH = \sin(\varphi/2). \quad (1)$$

На основании опыта использования специальных методик на Кавказе можно утверждать, что в самом первом приближении такая оценка будет достаточно точной. Для природной структуры такой угол измеряется в нескольких складках, определяются величины укорочений для них, и результат их осреднения будет последним параметром, характеризующим эллипсоид: 5) – величина укорочения SH в направлении перпендикуляра к осевой плоскости. В терминах механики этот параметр соответствует “эллипсу кратности”.

Важным моментом является наличие разрывов. Разумеется, если складчатая среда нарушена разрывом со смещением, то граница доменов должна проходить через точку пересечения линии профиля и разрыва. Это будет дополнительный параметр, который потребует при балансировании профиля: 6) – наклон плоскости такого разрыва TF , который измеряется по правилу замеров наклона осевой плоскости (рис. 2б, профиль 8).

Обозначим некоторые проблемы и принятые допущения. Прежде всего, это постулат постоянства объема в пределах домена, без учета которого вычислить деформации невозможно, а также постулат существования двумерной деформации или постоянства площади в плоскости структурного разреза. Несомненно, существует такое явление как уплотнение осадков в процессе литогенеза, и встает вопрос – не будет ли оно влиять на результат. Поскольку при подсчетах мощностей толщи используются именно те мощности, которые могут быть измерены сейчас, то есть – существующие уже после окончания литогенеза пород, то этот процесс не влияет на точность результата. В геологической литературе активно обсуждаются два похожих вопроса – каковы масштабы привноса и выноса вещества, и какова роль тектонического течения. Поскольку предлагаемый в данной статье метод является численным (в нем используются замеры параметров природных структур и точные процедуры их преобразований), то любые дополнительные параметры можно включать в процедуры только при условии возможностей их измерения. Автору статьи неизвестны опубликованные результаты таких попыток, а тем более – детальные данные для Северо-Западного Кавказа, структура которого анализируется. Не подвергая сомнению существование самого явления “растворения под давлением” для зерен кальцита и кварца, заметим, что, как правило, растворенное вещество переносится на короткие расстояния в первые метры, поэтому в масштабах домена (линейные размеры 0.3 – 2 км примерно) баланс вещества не должен измениться. Для этого же района обсуждается действие “тектонического течения” для структур в

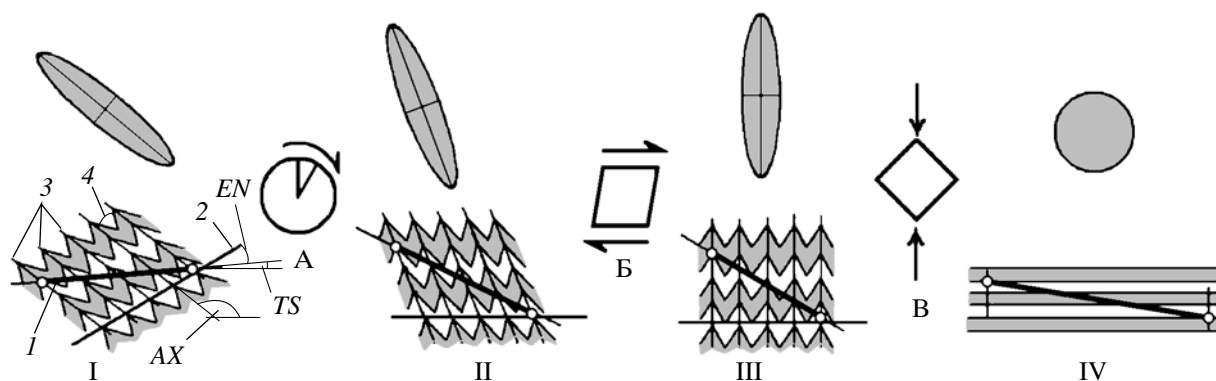


Рис. 3. Кинематические операции восстановления доскладчатого состояния домена (по [Яковлев, 2008в], с изменениями). Показаны символические изображения складчатой структуры домена для состояний от современного (I) к доскладчатому (IV), эллипсы деформаций, соответствующие тем же состояниям домена и виды операций: А – поворот (от состояния I к состоянию II), Б – горизонтальный простой сдвиг (от II к III), В – горизонтальное удлинение (вертикальный чистый сдвиг, от III к IV); 1 – отрезок линии профиля; 2 – линия исходной слоистости (зеркало складок); 3 – осевые поверхности складок; 4 – угол схождения крыльев.

первые километры, как по простиранию, так и в вертикальном направлении [Маринин, Расцветаев, 2008], однако не было предъявлено надежных данных о широком развитии признаков, которые могли бы свидетельствовать о реальности развития таких процессов.

Несколько забегаая вперед, заметим, что определенной оцифровке подвергается также вертикальная позиция слоистости: создается “стратиграфическая” модель осадочного чехла для каждого домена, в которой каждый слой имеет “глубину” залегания. Соответственно, линия профиля, в зависимости от наклона рельефа, наклона линии исходной слоистости и других параметров, будет смещаться от одной глубины к другой. При переходе линии профиля через разрыв потребуется заново определять “глубину” слоя в следующем домене.

ОПЕРАЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДОСКЛАДЧАТОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДОМЕНА

Шаг 2: описание кинематических операций восстановления доскладчатого положения домена. Совокупность геометрических признаков и постулат постоянства площади поперечного сечения обеспечивают однозначность описания эллипса кратности. Известна также ориентировка зеркала складок как элемента исходного положения слоистости. Используя три простых кинематических преобразования, можно найти положение отрезка линии профиля в исходной горизонтально слоистой среде для нулевой конечной деформации (эллипс кратности при этом преобразуется в круг).

Исходные параметры обозначим как: AX_0 – угол наклона осевой плоскости; EN_0 – угол наклона линии исходной слоистости; SH_0 – величина укорочения складок в направлении перпендикуляра к

осевой плоскости; LS_0 – длина отрезка профиля; TS_0 – угол наклона отрезка профиля; D_1 – глубина слоя во входной точке домена (остается неизменной, вычисляется глубина “выходной точки” D_2).

Проследим изменения параметров при последовательности трех кинематических операций: 1) поворот до горизонтального положения линии профиля, 2) простой сдвиг вдоль горизонта до вертикального положения осевой плоскости, 3) максимальное удлинение вдоль горизонта до приведения эллипса кратности к кругу (полученное чистым сдвигом).

Операция поворота (рис. 3, А) для угла поворота $\Delta\alpha = -EN_0$:

$$AX_1 = AX_0 + \Delta\alpha, \quad (2)$$

$$TS_1 = TS_0 + \Delta\alpha. \quad (3)$$

Укорочение складок и длина отрезка профиля остаются неизменными: $SH_1 = SH_0$ и $LS_1 = LS_0$.

Операция простого горизонтального сдвига (рис. 3, Б) для угла сдвига $\Delta\gamma = 90^\circ - AX_1$:

$$SH_2 = SH_1 / \sin(AX_1); \quad (4)$$

$$\text{tg}(TS_2) = \text{tg}(AX_1) \text{tg}(TS_1) / (\text{tg}(AX_1) - \text{tg}(TS_1)), \quad (5)$$

$$LS_2 = (LS_1 \sin(TS_1)) / \sin(TS_2). \quad (6)$$

Операция горизонтального удлинения (рис. 3, В) для величины растяжения (укорочение складок) SH_2 :

$$\text{tg}(TS_3) = \text{tg}(TS_2) \times SH_2^2, \quad (7)$$

$$LS_3 = LS_2 \times SH_2 \sin(TS_2) / \sin(TS_3). \quad (8)$$

Отрезок профиля в доскладчатой среде тогда занимает позицию:

$$\text{горизонтальное проложение } L_h = LS_3 \cos(TS_3), \quad (9)$$

$$\text{вертикальное проложение } L_v = LS_3 \sin(TS_3). \quad (10)$$

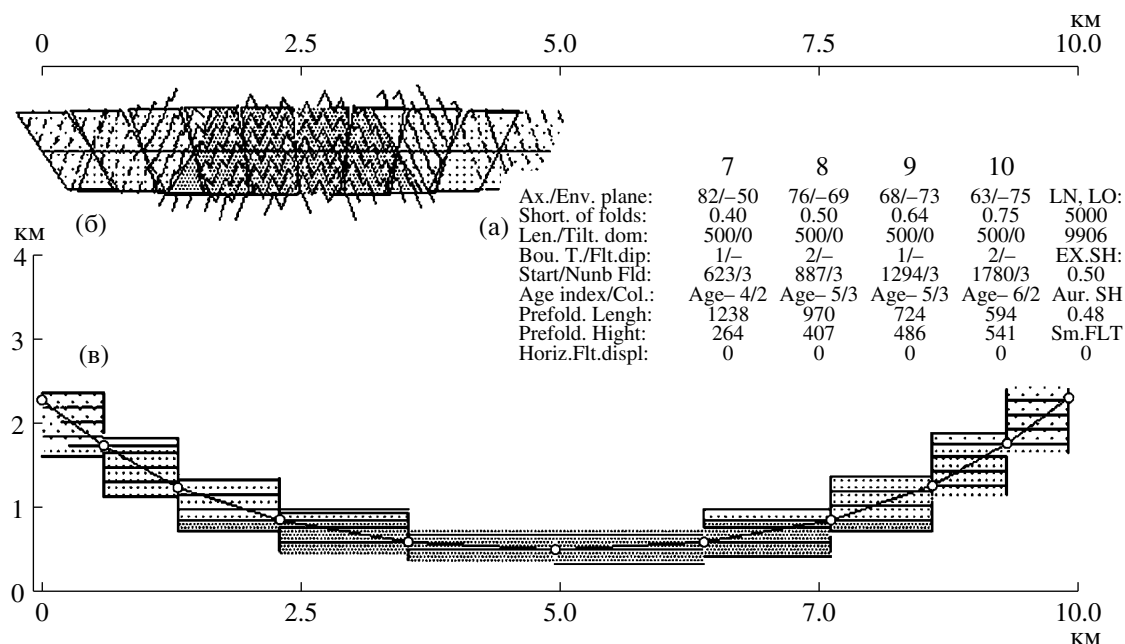


Рис. 4. Компьютерная программа восстановления доскладчатой структуры пересечения, работающая в среде DOS (собственная), которая имеет на экране три информационных поля (по [Яковлев, 2008в], с изменениями): (а) – таблица текущих значений измеренных (первые шесть строк) и вычисленных (нижние три строки) параметров доменов, показаны последние 4 домена, а также общий результат (последняя колонка); (б) – модель складчатой структуры, построенная по замерам параметров; (в) – восстановленная доскладчатая структура всего пересечения. Ошибка вычислений составляет около 1%. Рисунок скомпилирован по нескольким копиям экрана. Разный крап в доменах подчеркивает стратиграфические уровни слоистой толщи, расстояния условные.

Соответственно, глубина слоя в выходной точке составит:

$$D_2 = D_1 + L_v \quad (11)$$

Выбранная последовательность операций не является единственно возможной. Другие варианты могут отличаться величинами поворота, простого сдвига и удлинения, а также ориентировками этих движений, но при любой последовательности результат будет неизменным: для горизонтальной слоистости и отсутствия складок доскладчатые наклон и длина отрезка профиля будут теми же, что и в приведенном выше варианте.

Шаг 3. Восстановление наклона и амплитуды смещения по разрывам. Если входная точка домена совпадает с разрывом, то измеренный наклон разрыва TF подвергается преобразованиям. Если $TF < 90^\circ$, то рабочее значение наклона F равно TF , а если $TF > 90^\circ$, то $F = TF - 180^\circ$. После этого наклон плоскости сместителя разрыва будет выражен так же, как наклон отрезка линии профиля. Соответственно, все три кинематические операции могут быть повторены для ориентировки сместителя по формулам (3), (5), (7), в которых TS заменяется на F . В результате вычисляется исходный доскладчатый наклон сместителя. Вертикальное смещение задается глубиной слоя в выходной точке предыдущего домена и глубиной слоя во входной точке те-

кущего, затем через тангенс наклона определяется горизонтальное смещение.

Шаг 4: объединение доскладчатых состояний доменов для всего профиля. Имея отдельные доскладчатые состояния всех доменов, и учитывая смещения по плоскостям разрывов, несложно осуществить их последовательную стыковку, что создает специфическую структуру – горизонтально слоистую среду, в которой вполне определенное положение занимают отрезки линии профиля для каждого домена. Соответственно, можно подсчитать величину горизонтального укорочения SH_{sec} всего профиля (или его частей) как отношение проложения современного профиля LF к доскладчатому LP .

$$SH_{sec} = LF/LP, \quad (12)$$

где $LF = \sum LS_{0i} \cos(TS_{0i})$, а $LP = \sum L_{hi}$.

Для построения исходной структуры по замерам геометрии доменов, а также для визуализации результатов реконструкции нами используется компьютерная программа, работающая в среде DOS (рис. 4). Общая картина современной и доскладчатой структуры может быть скомпилирована в графическом редакторе из соответствующих “копий экрана”. Модель имела два этапа формирования: 1) конвективный, образовавший крупную структуру и 2) однородное 2-х кратное укорочение. Результат восстановления для 10 доменов показал

вычислительную ошибку около 1%. Заметим, что на этапе вычислений можно вносить некоторые поправки для большего соответствия полученной картины “стратиграфической модели”, поскольку отклонения от природных значений ориентировок в 3° – 5° (или до 5% для укорочения) могут существовать по самым разным причинам: от неточностей при замерах в поле до погрешностей при усреднениях. Такие уточнения напоминают подбор вариантов структуры при стандартном балансировании структурных пересечений в пределах форланда.

СТРУКТУРНАЯ ЯЧЕЙКА И ВЕЛИЧИНА ТЕКТОНИЧЕСКОГО УКОРОЧЕНИЯ

Шаг 5: “стратиграфическая модель” домена и использование объектов иерархического уровня структурной ячейки. Одним из важнейших этапов реконструкции доскладчатого состояния как одного структурного профиля, так и всей структуры, является сбор материала и формирование “стратиграфической модели” для каждого домена. Для этого используются в основном два источника: литературные данные и непосредственные замеры мощностей стратиграфических подразделений в разрезах на крыльях крупных складок. В качестве конечного результата формируется таблица, в которой сверху вниз расположены строки, отражающие для каждого домена мощность каждого стратиграфического подразделения (от молодых к древним) и накопленную глубину (табл. 1). Самыми древними отложениями, которые принимаются как распространенные во всем анализируемом объеме, на Северо-Западном Кавказе являются отложения тоарского яруса нижней юры. За ноль принята верхняя часть осадочного чехла – подошва олигоцена (подошва майкопской серии), поскольку именно к границе эоцена и олигоцена в первом приближении приурочены основная складчатость и горизонтальное укорочение структуры. Мощность осадочного чехла составляла до 17 км (при минимуме в 7–9 км).

Для определения тектонически обусловленного укорочения следует предпринять действия по учету возможного влияния дисгармонии, связанной с отклонениями поля деформаций в локальных структурах. Для этого исследуем поле деформаций в “структурной ячейке” (термин М.А. Гончарова [1988]). Эту модель легко трансформировать в модель продольного квази-изгиба, если наложить внешнее однородное укорочение (рис. 5). Горизонтальное укорочение приводит к увеличению вертикального размера ячейки и размер укорочения можно подобрать так, чтобы длина среднего слоя оставалась неизменной. Проследим укорочение структур в этой квази-изгибной модели на примере нескольких отрезков, отложенных в исходном недеформированном положении двух смежных ячеек. Структуры (отрезки),

Таблица 1. Вычисление мощности осадочного чехла для конца осадконакопления (стадия 1) двух доменов профиля 8, увеличения средней мощности при укорочении 0.66 (стадия 2) и глубины (высоты) после поднятия на 12257 м при высоте рельефа 309 м (стадия 3). Показаны выборочно мощность подразделений и глубина их подошвы в метрах

Подразд.	Домен 9	Домен 10	Стадия 2	Стадия 3
мощн.	0	0	0	
Pg ₂₋₁₊₂	0	0	0	11948
мощн.	150	150	227	
Pg _{1-il}	-150	-150	-227	11721
мощн.	150	150	227	
K _{1-al}	-4850	-4850	-7348	4600
мощн.	650	650	985	
K _{1-ap}	-5500	-5500	-8333	3615
мощн.	600	600	909	
J _{3-t}	-8600	-8600	-13030	-1082
мощн.	900	900	1364	
J _{3-km}	-9500	-9500	-14394	-2446
мощн.	800	800	1212	
J _{1-toar}	-15100	-15100	-22879	-10931
мощн.	1000	1000	1515	
J _{1-plin}	-16100	-16100	-24394	-12446
фундамент	-16100	-16100	-24394	-12446

расположенные в разных ситуациях, имеют разное укорочение. “Тектоническое” укорочение имеет именно тот отрезок (№ 3), который опирается на границы ячейки. Это означает, что влияние дисгармонии складчатости можно минимизировать, если для определения тектонически обусловленного укорочения выделить “структурные ячейки”, примерно изометричные в разрезе, и измерять именно их укорочение.

Для решения стоящей перед нами задачи надо выделить структурные ячейки, ширина которых вкрест простирания должна быть примерно равна мощности всего слоя (чехла). Технически это выполняется в таблице, в которой суммируются доскладчатые проложения отрезков профиля с учетом смещения по разрывам. Когда накопленная доскладчатая длина пересечения примерно совпадает с мощностью слоя (табл. 2), следует посмотреть, нет ли крупного разрыва или смены общего наклона зеркала складчатости – в таком месте надо провести границу ячейки. Сопоставляя суммарное проложение длин отрезков профиля в современной структуре с длиной доскладчатого профиля, определяем величину укорочения. С остальными доменами операция повторяется необходимое число раз

до формирования нескольких ячеек, в зависимости от общей мощности чехла и общей длины профилей.

Амплитуды разрыва учитываются следующим образом. Если они находятся внутри ячейки, амплитуда их горизонтального смещения суммируется с общим укорочением. Если же разрыв с существенным смещением находится на границе двух ячеек, то либо смещение относится к какой-то одной ячейке, либо делится поровну между соседними. Поскольку на границах тектонических зон происходит резкая смена мощностей осадков, то определение амплитуды смещения прямо связано с двумя соседними моделями осадочного чехла (рис. 6). В этом случае, например, молодые осадки в висячем крыле (для чехла большой мощности в хинтерланде) могут соответствовать не сбросу, а надвигу на структуру срединного массива с сокращенным разрезом. Кроме того, если смещения имеют большую амплитуду, нет гарантии того, что, делая расчеты по замерам в локальной структуре (домен 0.3 км), мы не исказим структуру общую (ячейка 7 – 10 км).

Шаг 6. Построение карты укорочений. После получения цифр укорочения для всех выделенных ячеек можно перейти к построению карты укорочений и проверки равномерности распределения этого параметра по простиранию всей структуры Северо-Западного Кавказа. Для этого в одних и тех же координатах закрепляются северные части пересечений, поскольку здесь расположен Ахтырский разлом, по которому складчатое сооружение граничит с платформенной структурой – Кубанской депрессией. На карте (аксонометрическая проекция) нанесены два варианта пересечений – в современных координатах и в доскладчатых (рис. 7). Сообразуясь с геологической картой и границами тектонических зон, была также проведена интерполяция границ всех 42 структурных ячейки.

Комментарий к последующим шагам алгоритма. Поскольку был собран материал по мощностям всего осадочного чехла (для всех 42 ячеек) и известна доскладчатая ширина всех ячеек, можно построить модель доскладчатой стадии развития Северо-Западного Кавказа (стадия 1). Для стадии 1 мы считаем, что верхи эоцена находятся на уровне моря. По основному угловому несогласию [Милановский, Хаин, 1963] возраст складчатости был определен как рубеж эоцена и олигоцена (36 млн. лет). Известно также, что только в сарматских отложениях (14 млн. лет) появляются первые конгломераты, свидетельствующие о начале этапа воздымания горного сооружения. В связи с этим выдвигается в виде предельно упрощенного варианта такая модель, в которой все укорочение пространства в ячейках осуществляется за счет погружения подошвы колонны осадков новой мощности (стадия 2). После определения масштабов размыва и соответствующей амплитуды поднятия этой колонны осадков можно установить со-

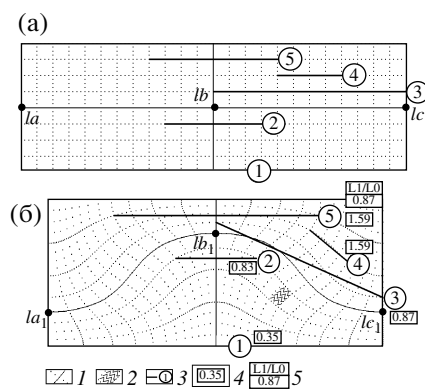


Рис. 5. Структурная ячейка как минимальная структура, укорочение которой совпадает с тектонически обусловленным горизонтальным сокращением осадочного чехла (по [Яковлев, 2008а], с изменениями). (а) – две смежные ячейки в начальном состоянии; (б) – те же две ячейки после действия квази-изгиба. 1 – первоначальная сетка и ее искажение, сплошная линия, соединяющая точки la, lb, lc , сохранила свою длину; 2 – символическое изображение складки в пределах условного домена; 3 – отрезок и его номер; 4 – величина горизонтального укорочения для отрезка; 5 – величина общего укорочения для ячеек

временные глубины подошвы осадочного чехла в пределах 42 ячеек. Это современная посторогенная стадия (стадия 3).

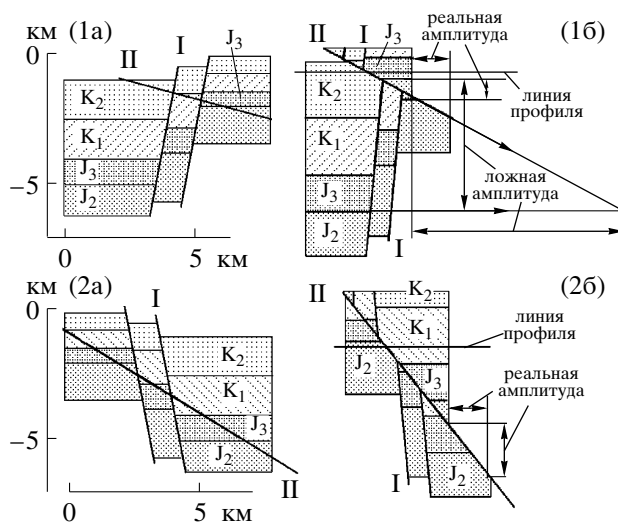


Рис. 6. Определение величины укорочения по разломам на границах фациальных двух зон на примере теоретических структур: 1 – вариант с ложной большой амплитудой, 2 – вариант с ложным сбросом: а – исходное доскладчатое состояние, б – постскладчатое состояние с развитым надвигом; I – разрывы конседиментационные, II – разрывы соскладчатые. Показаны условные толщи разного возраста, линия современного профиля, ложные и реальные амплитуды.

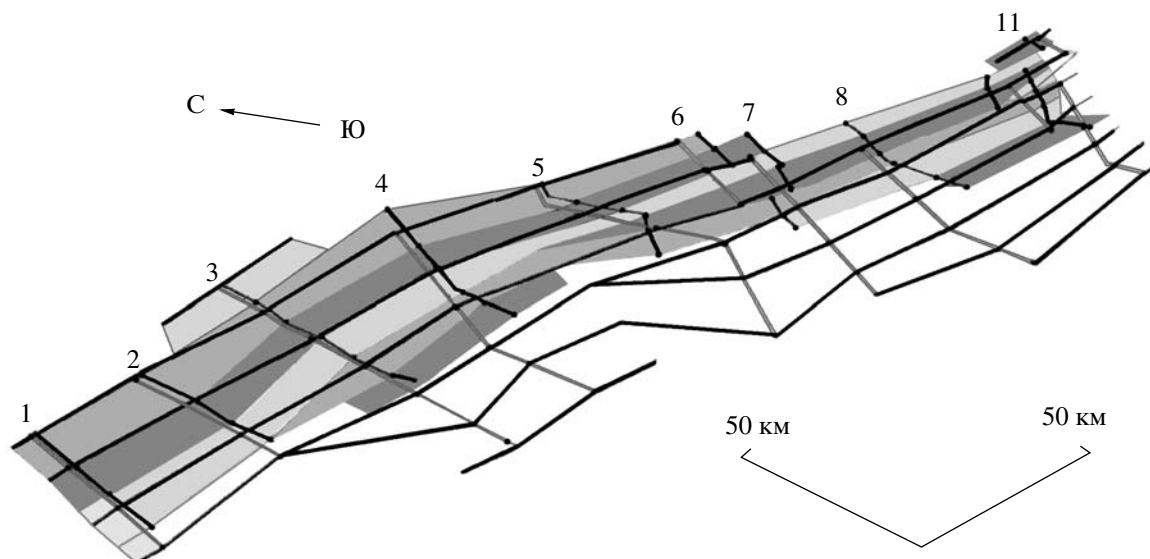


Рис. 7. Карта доскладчатого (стадия 1) и современного (стадии 2 и 3) положения границ структурных ячеек в аксонометрической проекции. Черные линии с номерами – современное положение структурных пересечений, серые (большей длины) – соответствующие доскладчатые пересечения. Точки на пересечениях и соединяющие их субпараллельные линии – границы ячеек в доскладчатых и современных координатах. Заливка различной тональности, выполненная для современных координат границ ячеек подчеркивает их конфигурацию и выбранный вариант интерполяции.

Таблица 2. Процедуры выделения ячеек для профиля 8 (выборочно) и определения величины укорочения. Величины доскладчатых длин домена и смещений по разрывам (колонки 2–3) суммируются и когда они достигают примерного значения мощности чехла (9 км для ячейки 8А и 11 км для 8Е) проводится граница ячейки. Подсчитывается суммарная длина современного пересечения (колонки 5 и 6), отношение длин для ячейки (колонка 6) дает величину укорочения

	Ампл.	Расст.	Накопл	Домен	Кумул.	Велич.
домен	разрыва	домен	сумма	длина	длина	укороч.
1	0	1377	1377	762	762	8А
2	-147	2731	3961	1199	1961	
3	0	1538	5499	988	2949	
4	0	2859	8358	881	3830	
5	0	979	9337	695	4525	
6	0	1171	10508	1102	5627	0.54
23	0	2390	47300	1240	27498	0.77
24	0	2196	49496	1877	29375	8Е
25	0	1774	51270	1613	30988	
26	0	2153	53423	1672	32660	
27	0	2183	55606	1800	34460	0.84

ТРЕХСТАДИЙНАЯ КВАЗИ-ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ СЕВЕРО- ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Шаг 7: построение доскладчатой постседиментационной модели осадочного чехла СЗ Кавказа (стадия 1). В соответствии с данными о накопленных мощностях осадочного чехла, осредненными для каждой ячейки, и шириной доскладчатой структуры в пределах этих ячеек строились доскладчатые профили для всех пересечений, включая границы “фундамент/подошва юры”, “юра/мел” и “мел/палеоген” (рис. 8а). Затем в соответствии с картой доскладчатых границ ячеек эти пересечения объединялись в виде квази-трехмерной модели. Модель позволяет увидеть характер распределения амплитуд прогибания коры – это максимальные прогибания до 17 км в западной части региона с намечающейся центральной осью (южный борт структуры не виден) и меньшие прогибания, до 10–15 км, по центральной оси в восточной части, которые обрамляются значениями 7–9 км по краям структуры.

Шаг 8: определение постскладчатой высоты (глубины) колонны и построение постскладчатой доорогенной модели (стадия 2). По данным об исходной мощности осадочного чехла и величине укорочения для ячеек были определены новые постскладчатые мощности чехла для всех ячеек. По этим данным и современным координатам границ ячеек были построены доскладчатые профили для всех пересечений, включая те же границы стратиграфических подразделений (рис. 8.). Далее в пределах карты эти пересечения объединялись в виде квази-трехмерной модели. В рамках сделан-

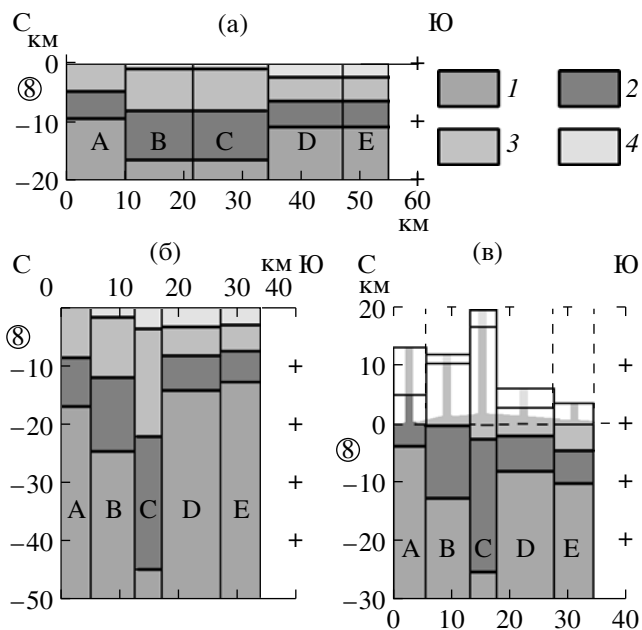


Рис. 8. Расчетная структура поверхности фундамента и основных стратиграфических границ на примере пересечения № 8 для пяти ячеек (А–Е). Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковые: (а) – структура для доскладчатого состояния (стадия 1); (б) – структура для постскладчатого доэрозионного состояния (стадия 2); (в) – структура для постэрозионного современного состояния (стадия 2), тонкими колоннами показаны мощности размытых отложений. На разрезах серым цветом разной плотности показаны: 1 – палеозойский метаморфический фундамент, 2 – юрские отложения, 3 – меловые отложения; 4 – палеоценовые и эоценовые отложения.

ных для стадии 2 предположений максимального значения (49 км) погружение кровли фундамента имело в ячейке 5D при исходной мощности 16.1 км и величине укорочения 67%.

Шаг 9: определение “стратиграфической глубины” современного разреза. Поскольку в каждом домене определяется глубина слоев во входной точке и в точке выхода, то можно определить среднюю глубину для отрезка линии профиля, а также среднюю глубину профиля для ячейки. Кроме этого, известна высота рельефа начальной точки каждого профиля и, соответственно, легко вычисляются средние высоты каждого домена и всей ячейки. Таким образом, в рамках сделанных предположений может быть определена та амплитуда поднятия, которая выведет на высоту современного рельефа в данной ячейке те отложения, которые там наблюдаются. Среднее поднятие составило около 10 км.

После проведения всех вычислений для всех 42-х структурных ячеек (табл. 3) была получена современная расчетная структура поверхности фундамента на пересечениях для всех отслеживаемых стратиграфических границ (рис. 8, В) и построена квази-трехмерная модель всей структуры (рис. 9). Полученная поверхность фундамента образует сложную, но вполне закономерную картину. Значения глубин подошвы варьируют от 2–5 км до 25–30 км, составляя 13 км в среднем по структуре.

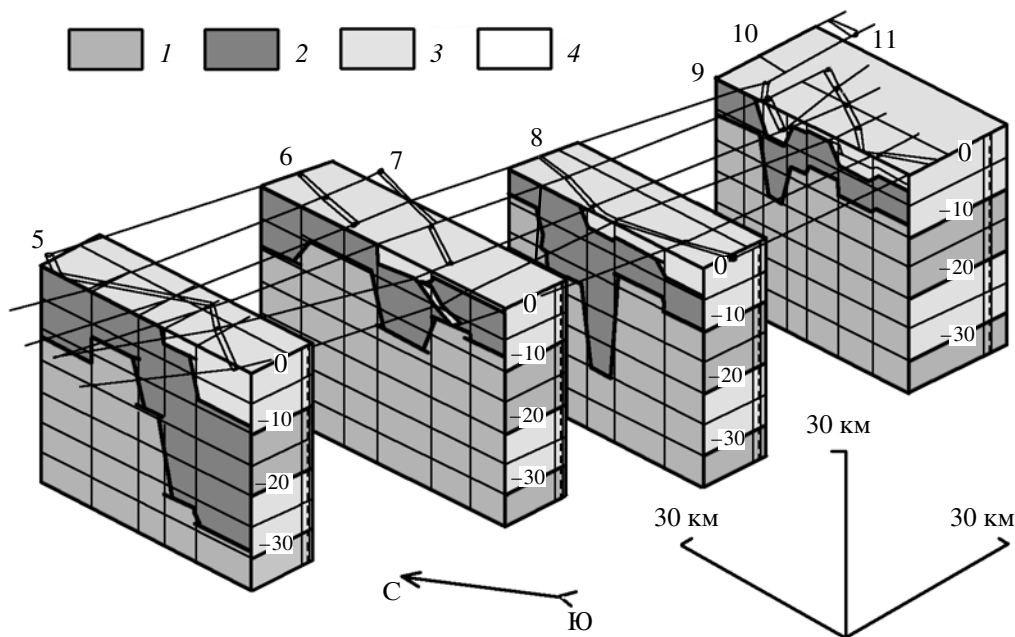


Рис. 9. Постэрозионная современная структура мезо-кайнозойского осадочного чехла Северо-Западного Кавказа (стадия 3), показанная в виде квазитрехмерной модели в аксонометрической проекции для восточной части района. Условные знаки см. на рис. 8.

Таблица 3. Данные о величинах укорочения (колонки 2–4), исходных мощностях осадочного чехла (стадия 1, колонка 5) и глубинах кровли фундамента (стадия 3, колонка 6) для 42-х структурных ячеек (индексы в колонке 1 – номер пересечения и индекс ячейки с севера на юг). Отдельными строками (жирный шрифт) показаны длины и величина укорочения для соответствующих пересечений

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	Доскладчатая длина	Современная длина	Величина укорочения	Подощва J	Подощва J		Доскладчатая длина	Современная длина	Величина укорочения	Подощва J	Подощва J		Доскладчатая длина	Современная длина	Величина укорочения	Подощва J	Подощва J
1A	13.6	14.5	1.07	-17.0	-13.3	4D	9.7	4.7	0.48	-16.2	-20.7	8A	10.5	5.6	0.54	-9.1	-3.6
1B	18.8	11.7	0.62	-17.0	-22.7	4E	16.6	8.0	0.48	-16.3	-27.3	8B	11.4	7.5	0.66	-16.1	-12.4
1C	17.4	15.4	0.88	-17.0	-17.1		71.7	48.7	0.68			8C	12.7	4.6	0.36	-16.1	-25.1
	49.8	41.6	0.84			5A	14.4	9.7	0.67	-12.8	-11.2	8D	12.7	9.8	0.77	-10.8	-7.9
2A	13.5	14.9	1.10	-15.2	-12.4	5B	16.3	10.0	0.61	-12.8	-7.0	8E	8.3	7.0	0.84	-10.8	-10.0
2B	16.1	11.1	0.69	-16.7	-18.8	5C	15.1	5.9	0.39	-12.7	-14.2		55.6	34.5	0.62		
2C	11.2	10.0	0.89	-17.3	-15.9	5D	13.2	4.4	0.33	-16.1	-26.6	9A	6.6	3.2	0.49	-8.8	-5.6
	40.9	36.1	0.88			5E	23.3	9.3	0.40	-16.1	-29.0	9B	11.5	7.9	0.69	-8.8	-2.2
3A	13.1	10.1	0.77	-14.2	-16.7		82.4	39.4	0.48				18.1	11.1	0.61		
3B	13.7	10.7	0.78	-14.7	-12.6	6A	12.6	6.1	0.49	-12.8	-9.4	10A	10.1	3.7	0.37	-9.8	-15.2
3C	15.2	9.6	0.63	-17.1	-16.8	6B	14.4	7.1	0.49	-12.3	-5.7	10B	6.7	4.4	0.65	-10.8	-8.3
3D	15.1	9.7	0.64	-17.1	-18.2		27.0	13.2	0.49			10C	6.9	5.5	0.80	-10.8	-6.9
3E	15.7	10.8	0.69	-17.1	-19.0	7A	13.3	7.5	0.56	-8.5	-4.4	10D	8.9	7.3	0.82	-7.6	-9.1
3F	9.5	4.4	0.47	-17.1	-31.7	7B	8.7	6.3	0.73	-11.5	-4.6	10E	7.6	6.3	0.83	-7.3	-8.6
	82.3	55.3	0.67			7C	14.6	9.6	0.66	-15.1	-13.2		40.1	27.2	0.68		
4A	15.9	15.5	0.98	-13.6	-11.6	7D	12.7	7.0	0.55	-9.8	-6.9	11A	8.3	4.9	0.59	-8.8	-5.4
4B	13.7	8.7	0.63	-16.2	-8.7	7E	9.2	4.5	0.49	-9.8	-7.7						
4C	15.8	11.8	0.75	-16.2	-12.7		58.4	34.9	0.60								

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим, насколько материалы построенной трехмерной модели современной структуры осадочного чехла (стадия 3) соответствуют данным других исследователей и геофизическим материалам. Данные по рельефу подошвы осадочного слоя в материалах современной интерпретации комплексного геофизического пересечения по профилю Туапсе–Хадзыженск [Шемпелев и др., 2001] почти совпадают с полученными нами цифрами для того же пересечения (табл. 3, профиль 5): с севера на юг эта граница понижается с 7–8 км до 25–30 км. В то же время “концептуальная” структура для этого же пересечения обсуждаемую границу показывает как поверхность общего детачмента на глубине 5–7 км [Robinson et al., 1996]. Надо заметить, что последнее пересечение является крайне схематичным, авторы при его составлении явно не задавались целью учитывать баланс объе-

мов пород осадочного чехла и добиться его соответствия конкретной природной структуре.

Один из прогрессивных результатов, который может быть получен на основе предложенного алгоритма – это сопоставление геометрии предлагающихся геодинамических моделей формирования регионов с полученной достаточно достоверной трехмерной структурой зон складчатости. Это позволяет сразу отсекавать, как невозможные, те модели, геометрия которых прямо противоречит сбалансированной структуре, получаемой на основе понятного алгоритма и на основе замеров природной геометрии складок. Опираясь на полученную геометрию кровли фундамента, было определено, что для возникновения складчатости необходимо опускание на большую глубину крупных блоков коры, что позволило предложить новую геодинамическую модель развития Кавказа [Яковлев, 2008в].

Вопрос о точности построений сложно коротко осветить в одной статье. Связано это с тем, что в предложенном алгоритме есть много шагов, и ошибки могут как накапливаться, так и нивелироваться. Например, при субпараллельности крупного разлома и слоистости в одном из блоков точность замеров элементов геометрии структуры в поле должна быть очень высокой, поскольку малые отклонения существенно влияют на получаемый доскладчатый угол наклона плоскости сместителя, а значит и на амплитуду смещения. Важным аспектом является точность стратиграфической модели: от этого параметра зависит результат вычислений глубины подошвы чехла, объема размытых пород, а на границах тектонических зон – вычисленные амплитуды смещения по надвигам. Но, в целом, можно предположить, что полученные данные о глубинах горизонтов могут отличаться на 10–15% при тех или иных небольших отклонениях замеров геометрии доменов и их стратиграфических моделей при несомненном сохранении общего характера структуры и средних по структуре величин параметров.

Предложенный подход с позиций механики последовательно комбинирует две разных концепции описания деформаций для структур разного размера: эллипсоид для структур внутрислойных, изгиб для складок, эллипсоид для доменов, изгиб для всего осадочного чехла в структурных ячейках. Это позволяет расшифровывать на уровне кинематических моделей те структуры, которые пока не получают описания на уровне динамики.

ВЫВОДЫ

Метод восстановления доскладчатой структуры по геометрии доменов позволил впервые построить модель складчатости хинтерланда (внутренней части складчатых сооружений), сбалансированную по объему всей осадочной толщи. Для этого используется полное описание деформаций в максимально возможных по детальности объемах.

Предложенный подход к проблеме складкообразования, основанный на системе иерархии объектов линейной складчатости, каждый из которых имеет специальные кинематические модели формирования, позволяет решать эту сложную проблему по частям. Последовательное увеличение линейных размеров исследуемых объектов на разных этапах анализа позволяет получать количественные данные о крупных структурах, которые не связаны с какой-либо интерпретацией на основе геодинамических моделей. Полученная структура поверхности “осадочный чехол/метаморфический фундамент” вполне согласуется с последними данными геофизических исследований. Квазитрехмерное распределение глубин этой поверхности показывает сильные, но вполне закономерные изменения. Поскольку наиболее распространен-

ная схема пододвигания южных блоков коры под Большой Кавказ противоречит этим результатам, очевидно, что полученные более достоверные данные о реальной структуре будут способствовать разработке новых геодинамических моделей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецкого, Л.А. Сим, А.В. Маринина и А.В. Михайлову, которые в недавно проведенной серии рабочих семинаров подробнейшим образом разобрали большую часть аспектов обсуждаемой методики, что позволило существенно улучшить изложение всех материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П.* Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба. 1989. 61 с.
- Гончаров М.А.* Механизм геосинклинального складкообразования. М.: Недра. 1988. 264 с.
- Дотдугев С.И.* О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника. 1986. № 5. С. 94–106.
- Маринин А.В., Расцветаев Л.М.* Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа. Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН / Под ред. Ребецкого Ю.Л. М. 2008. С. 191–224.
- Милановский Е.Е., Хаин В.Е.* Геологическое строение Кавказа. Очерки региональной геологии СССР. М.: изд-во МГУ. 1963. Вып. 8. 358 с.
- Николя А.* Основы деформации горных пород. Пер. с англ. М.: Мир. 1992. 167 с.
- Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. 744 с.
- Ребецкий Ю.Л., Гуценко О.И.* Уравнения состояния и особенности эволюции деформационной анизотропии слоистых массивов в процессе складкообразования (математическое моделирование) // Физика Земли. 1995. № 8. С. 13–31.
- Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л.* Тектонофизика. Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том “Тектоника и геодинамика” / Под ред. Красного Л.И., Петрова О.В., Блюмана Б.А. СПб. 2004. С. 121–134.
- Шемпелев А.Г., Пруцкий Н.И., Фельдман И.С., Кухмазов С.У.* Геолого-геофизическая модель по профилю Туапсе–Армавир. Тектоника неоген: общие и региональные аспекты. М.: 2001. Т. 2. С. 316–320.
- Шолло 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. МОИПа. отд. геол. 1978. Т. 53(5). С. 43–52.
- Яковлев Ф.Л.* Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: Изд-во ОИФЗ РАН. 1997. 76 с.

Яковлев Ф.Л. Исследования процессов и механизмов развития пликативных деформаций в земной коре (обзор существующих методических подходов). Тектонофизика сегодня / Под ред. Страхова В.Н., Леонова Ю.Г. М.: изд-во ОИФЗ РАН. 2002. С. 311–332.

Яковлев Ф.Л. Первый опыт построения трехмерной модели структуры области линейной складчатости на основе количественных параметров деформации (на примере Северо-Западного Кавказа). Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2 / Отв. ред. Карякин Ю.В. М. 2007. С. 392–396.

Яковлев Ф.Л. Многогранговый деформационный анализ структур линейной складчатости // Докл. РАН. 2008а. Т. 422. № 3. С. 371–376.

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 / Под ред. Ребецкого Ю.Л. М.: 2008б. С. 149–188.

Яковлев Ф.Л. Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизические исследования. 2008в. Т. 9. № 1. С. 56–75.

Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. М.: Недра. 1981. 245 с.

Hudleston P.J., Stephansson O. Layer shortening and fold-shape development in the buckling of single layers // Tectonophysics. 1973. V. 17. № 4. P. 299–321.

Ramsay J.G., Huber M.I. The techniques of modern structural geology. V. 2. Fold and fractures. London: Acad. Press. 1987. P. 308–700.

Robinson A.G., Rudat J.H., Banks C.J. & Wiles R.L.F. Petroleum geology of the Black Sea // Marine and Petroleum Geology. 1996. 13(2). P. 195–223.

Yakovlev F.L., Voitenko V.N. 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", 20–25 September 2005 / Exec. Edit. Akulich V.F. Vladivostok. 2005. P. 66–69.