

УДК 551.24:004.94+55(8)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-39-50

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА СУБАНДИНО (БОЛИВИЯ)

Михаил Олегович Беляев¹, Максим Валерьевич Коротаев²✉

¹ Институт геологии и разработки горючих ископаемых, Москва, Россия; belyaevmo@igirgi.rosneft.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0009-0007-4542-7787>

Аннотация. В данной работе с применением структурно-кинематического моделирования и метода сбалансированных разрезов были построены двухмерные и трехмерная модели структур южной части складчато-надвигового пояса Субандино (Боливия). Выделены основные этапы деформаций. Проведено сопоставление выделенных этапов с историей развития складчатого пояса Анд.

Ключевые слова: сбалансированные разрезы, структурно-кинематическое моделирование, Южная Америка, Анды

Для цитирования: Беляев М.О., Коротаев М.В. Кинематическая реконструкция формирования структур складчато-надвигового пояса Субандино (Боливия) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 39–50.

KINEMATIC RESTORATION OF SUBANDINO THRUST-FOLD BELD (BOLIVIA)

Mikhail O. Belyaev¹, Maksim V. Korotaev²✉

¹ Institute of Geology and Development of Fossil Fuels, Moscow, Russia; belyaevmo@igirgi.rosneft.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru✉

Abstract. 2D and 3D models of geological structures of Subandino thrust-fold beld was done with using structural-kinematic modeling and balanced cross-section method. Main stages of deformation have been identified. These stages were compared with geological history of Andian orogeny.

Keywords: balanced cross-sections, kinematic reconstruction, South America, Andes

For citation: Belyaev M.O., Korotaev M.V. Kinematic restoration of Subandino thrust-fold beld (Bolivia). *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 39–50. (In Russ.).

Введение. Целью данной работы является восстановление додеформационных взаимоотношений слоев и реконструкция истории формирования структур южной части складчатого пояса Субандино (Боливия).

Информация о строении складчато-надвиговых структур пояса Субандино получена путем комплексирования данных сейсморазведки, бурения и полевых геологических наблюдений. На сейсмических профилях можно зафиксировать пологие западные крылья антиклиналей и смежные с ними области пигги-бэк бассейнов, а по скважинным данным восстанавливается строение апикальных частей антиклиналей. Но геологическое строение невозможно описать однозначно, так как на сейсмических разрезах характер волновой картины часто сменяется на хаотический, ухудшается динамическая выраженность отражающих горизонтов и затрудняется корреляция отражений, а скважинные данные носят точечный характер. Поэтому наиболее действенными методами восстановления геологической структуры являются построение геологических разрезов на основе геологических карт, с учетом данных бурения, сейсморазведки и гравиразведки, и проверка

разрезов методом балансировки и кинематического восстановления.

Построение сбалансированных разрезов и объемных моделей проводилось в программном комплексе «Move». Процесс построения восстановленных разрезов (объемов) включал в себя удаление последствий смещений по разломам, распрямление складок, восполнение объема и длины уплотненных или эродированных слоев.

Материалы и методы. *Геология области Субандино.* Южная часть субандийского складчато-надвигового пояса (рис. 1) формирует внешнюю (восточную) часть Анд и расположена на широте от 18 до 13° ю.ш, он имеет протяженность около 500 км [Fuentes et al., 2018]. Зона Субандино — это активный складчато-надвиговый пояс, развивающийся по механизму «толстокожей тектоники», т. е. в деформации вовлечены породы кристаллического фундамента в западных частях пояса. Главный уровень детачмента зафиксирован в ордовикских и силурийских отложениях [Brooks et al., 2011; Weiss et al., 2015].

В южной части пояса Субандино стратиграфический разрез отложений от докембрия до кайнозоя представлен наиболее полно. Надежно установлены

4 осадочных цикла: Таксарианский (объединяет отложения $Cm-O_1$), Кордильерский (O_3-D), Субандский ($C-T$) и Андский ($MZ-KZ$). Отложения последних трех циклов выходят на поверхность и вскрываются скважинами [Dunn et al. 1995; Starck, 1995; Fuentes et al., 2018].

Образование надвигов и складок в области Субандино Сюр началось на западе и постепенно продвигалось на восток, захватывая все новые территории. Большей частью, складки являются концентрическими и округлыми, для них характерна значительная величина межслоевого скольжения. В плане складки линейные и весьма протяженные, от десятков до сотен километров. Подобная геометрия объясняется отсутствием значительных региональных изменений в стратиграфии [Dunn et al., 1995].

В области Субандино выделяются три основные тектонические провинции, разделенные главными региональными разломами: главный Андский фронтальный надвиг отделяет Анды от зоны Субандино; надвиг Мандийюити делит пояс Субандино на западную и восточную провинции; надвиг Мандеяпекуа отделяет складчато-надвиговую зону Субандино от форландового бассейна Чако [Dunn et al., 1995].

Западная и Восточная провинции зоны Субандино различаются между собой по структурному стилю деформаций. К западу от разлома Мандийюити преобладают разломы с ступенчатой геометрией, к востоку — надвиги в большей степени планарные. В западной провинции в состав аллохтона входят ордовикские отложения, тогда как в восточной — нет. В западной части может формироваться локальный уровень срыва внутри формации Ипагуазу (Т-І) там, где в разрезе присутствуют гипсовые породы.

Разрез осадочного чехла можно разделить на три структурных этажа (рис. 2).

Нижний структурный этаж включает в себя отложения силура (в западной провинции — ордовика) и девонские формации Санта Роза, Икла и Хуамампампа. Нижний структурный этаж ограничен подошвенным и кровельным (внутри формации Лос Монос (D)) детачментами, и имеет постоянную мощность около 2500 м [Starck, 1995; Fernandez, Seveso et al., 2000].

Средний структурный этаж включает в себя среднюю часть формации Лос Монос мощностью от 600 до 1000 м. Деформации внутри среднего структурного этажа определяют пространственное строение верхнего структурного этажа и, в частности, особенности залегания слоев, наблюдаемые на дневной поверхности в области Субандино.

Слои верхнего структурного этажа формируют концентрические антиклиналы, с довольно круто падающими крыльями, угол наклона которых зависит от вертикального увеличения мощности пород, т. е. от степени сжатия среднего структурного этажа. Антиклиналы могут быть асимметричными, западные крылья обычно имеют углы наклона от 30° до субвертикальных, восточные крылья падают более

круто, вплоть до опрокинутого залегания [Starck et al., 2002].

Методика построения сбалансированных разрезов. Сбалансированный разрез — разрез, непротиворечиво объясняющий наблюдаемую структурную ситуацию на поверхности, в скважинах и на сейсмических профилях, и допускающий геометрически корректный вариант восстановления первичного горизонтального залегания слоев [Гайдук, Прокопьев, 1999; Геологический..., 2010; Dahlstrom, 1969; Woodward et al., 1985].

Основные ограничения метода:

- объем пород сохраняется при деформации;
- объем пород изменяется только при уплотнении осадка и эрозии;
- доминирующий характер носят хрупкие деформации, складки генетически связаны с разломами;
- потеря объема пород, обусловленная растворением под давлением и тектоническим сжатием, считается минимальной.

Процесс построения сбалансированного разреза, изображенный на рис. 3, представляет собой следующую последовательность действий [Woodward et al., 1985]:

1. Сбор данных.
2. Выбор линии профиля.
3. Нанесение топографической поверхности и геологических данных.
4. Проецирование информации со смежной территории.
5. Реконструкция палеостратиграфического разреза.
6. Оценка глубины до автохтона.
7. Прикидка глубины залегания тыловых краев чешуй.
8. Выбор вертикальной линии отсчета или пин-линии (pin-line).
9. Проецирование поверхностной структуры на глубину.
10. Заполнение «дыр».
11. Измерение длины слоев.
12. Построение восстановленного (палинспастического) разреза.
13. Проверка восстановленного разреза.

Алгоритмы, используемые для выполнения двухмерных и трехмерных палинспастических реконструкций можно разделить на две группы:

1. Распрямление складок (Unfolding) — не учитывается связь между геометрией разломов и конфигурацией слоев, применяется для остаточных деформаций.
2. Перемещение по разломам (Move on fault) — учитывалось влияние геометрии разлома на строение висячего блока, применяется при реконструкции деформаций, связанных с перемещением вдоль поверхности сместителя разлома.

Реконструкции, выполненные в рамках данной работы, были построены в программном комплексе «Move» с использованием следующих алгоритмов.

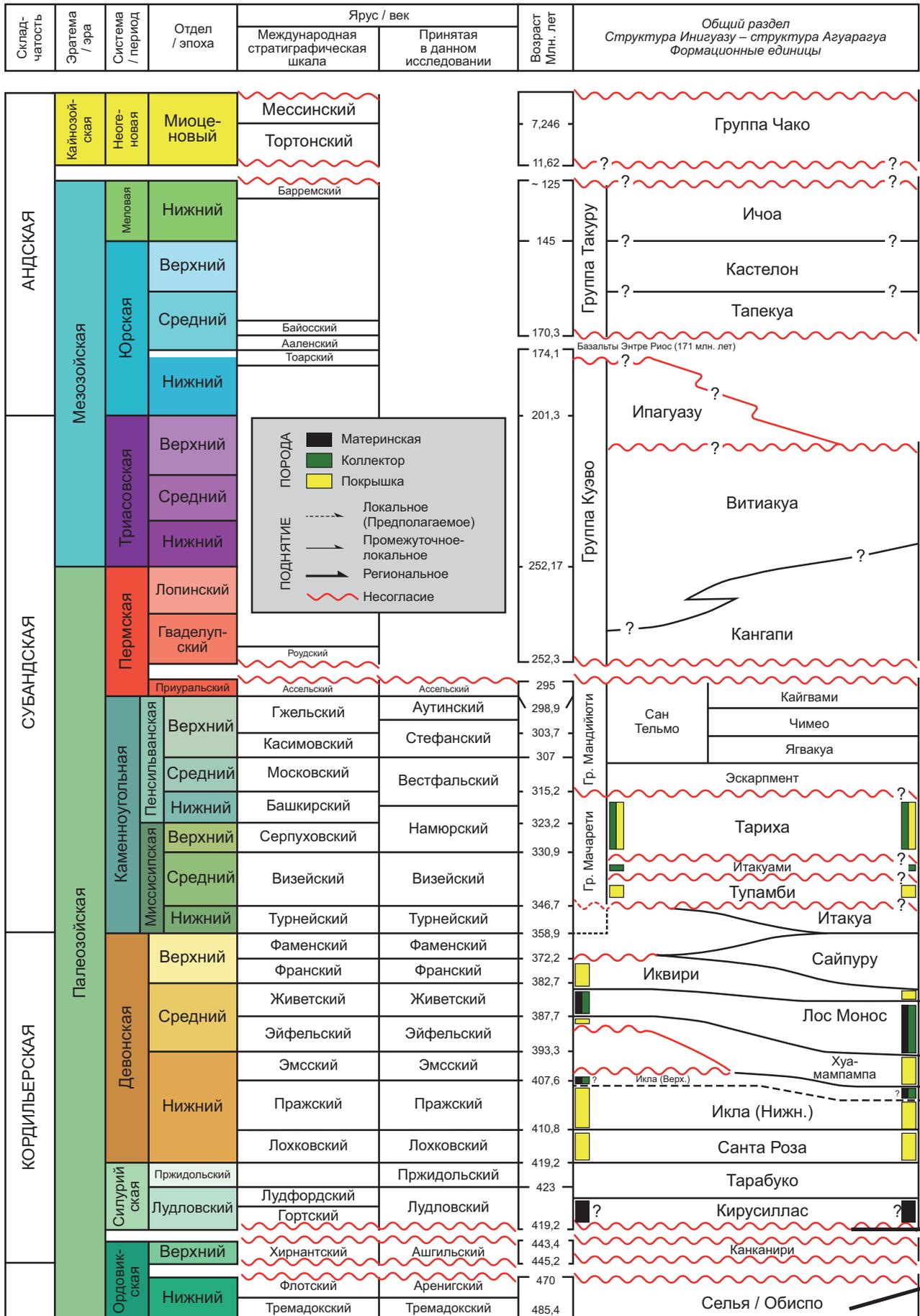


Рис. 2. Общая стратиграфическая шкала для региона Субандино Сюр

Алгоритм «Flexural slip». Данный алгоритм (рис. 4, а) основывается на выборе области с минимальным смещением и последующем распрямлении всех слоев относительно выбранного слоя-шаблона (его роль, как правило, играет слой с наибольшей длиной). При использовании алгоритма «Flexural Slip» сохраняется длина (площадь поверхности) слоя-шаблона в направлении распрямления, сохраняются мощности (объемы) всех слоев по нормали, сохраняются длины слоев (площади поверхности), геометрия которых соответствует слою-шаблону.

Алгоритм «Fault Parallel Flow». Алгоритм «Fault Parallel Flow» (рис. 4, б) основан на принципе дисперсного ламинарного движения вещества над рампом разлома. В данном алгоритме плоскость разлома разделяется на отдельные домены в соответствии с углом наклона плоскости разлома. Породы всяческого блока перемещались вдоль рассчитанных линий, параллельных плоскости разлома. Именно алгоритм «Fault Parallel Flow» является оптимальным для выполнения палинспастических реконструкций области Субандино Сюр, поскольку он наилучшим образом описывает движение всяческого блока вдоль разлома в складчато-надвиговых поясах, и может быть использован для разломов со сложной геометрией.

В основе работы алгоритма «Fault Parallel Flow» лежат следующие основные принципы. Лежащий блок не подвержен процессам деформации и перемещения, длина слоя (площадь поверхности слоя) сохраняется при его перемещении в направлении тектонического транспорта, длина слоя и площадь поверхности слоя сохраняется в случае корректного выбора угла сдвига. Проверка выполнения реконструкций производится путем решения обратной задачи — построением прямой модели сжатия вдоль реконструируемого профиля с использованием алгоритма Fault Bend Fold.

Алгоритм «Trishear». Алгоритм «Trishear» был использован для восстановления структур, образующихся в треугольной зоне пластических деформации (рис. 4, в), начинающейся в конце разрывного нарушения.

Алгоритм «Trishear» осуществляет деформацию слоев в одной (или нескольких) треугольных зонах пластических деформаций. Величина сдвига в этих зонах изменяется от определенного заданного значения в верхней части зоны до нуля в нижней части зоны, направление сдвига изменяется от параллельного падению разлома в верхней части зоны, до параллельного основанию зоны на нижней границе зоны. Вне зоны trishear слои в всячем крыле деформируются в соответствии с алгоритмом «Fault Parallel Flow».

Результаты моделирования и обсуждение. Построение кинематической модели структуры Агуарагуэ. На рис. 5 показан сейсмический разрез через структуру Агуарагуэ, расположенный во фронтальной части складчато-надвигового

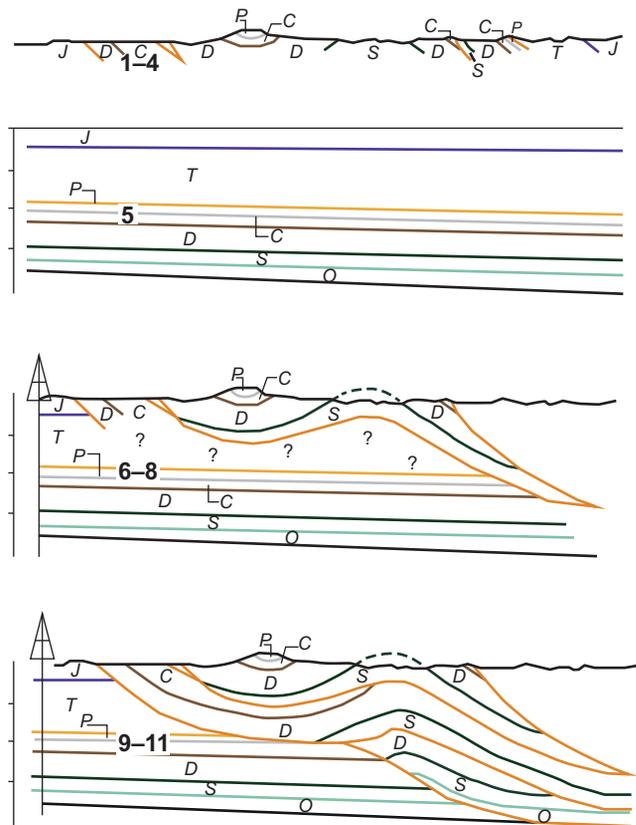


Рис. 3. Последовательность реконструкции структурной модели, шаги 1–11. По [Woodward et al., 1985] с изменениями

пояса Субандино, с нанесенной структурной интерпретацией. Данный профиль лег в основу разработанной авторами кинематической модели формирования структур складчато-надвигового пояса Субандино. Необходимо отметить следующие геологические особенности:

- наличие регионального детачмента в подошве силурийских отложений;
- значительно увеличение толщин формации Лос-Монос в ядрах антиклиналей;
- асимметричное падение крыльев антиклиналей;
- смещение замков антиклиналей к западу с нарастанием глубины;
- нарастание степени сжатия к западу.

При моделировании для слоев нижнего и верхнего структурных этажей предполагается концентрический характер деформаций, и основной сложностью является правильное описание механизма деформаций внутри формации Лос Монос. По данным бурения в ядрах антиклиналей наблюдается увеличение толщин формации до 3000 м. Отложения формации представлены в основном плотными глинами и аргиллитами. Использование простой геометрической модели (пример на рис. 6) не может полностью достоверно описать структурный план антиклинали.

Для описания характера деформаций внутри формации Лос Монос была использована модель «антиформных дуплексов сгущивания», что позволило объяснить увеличение толщин формации Лос

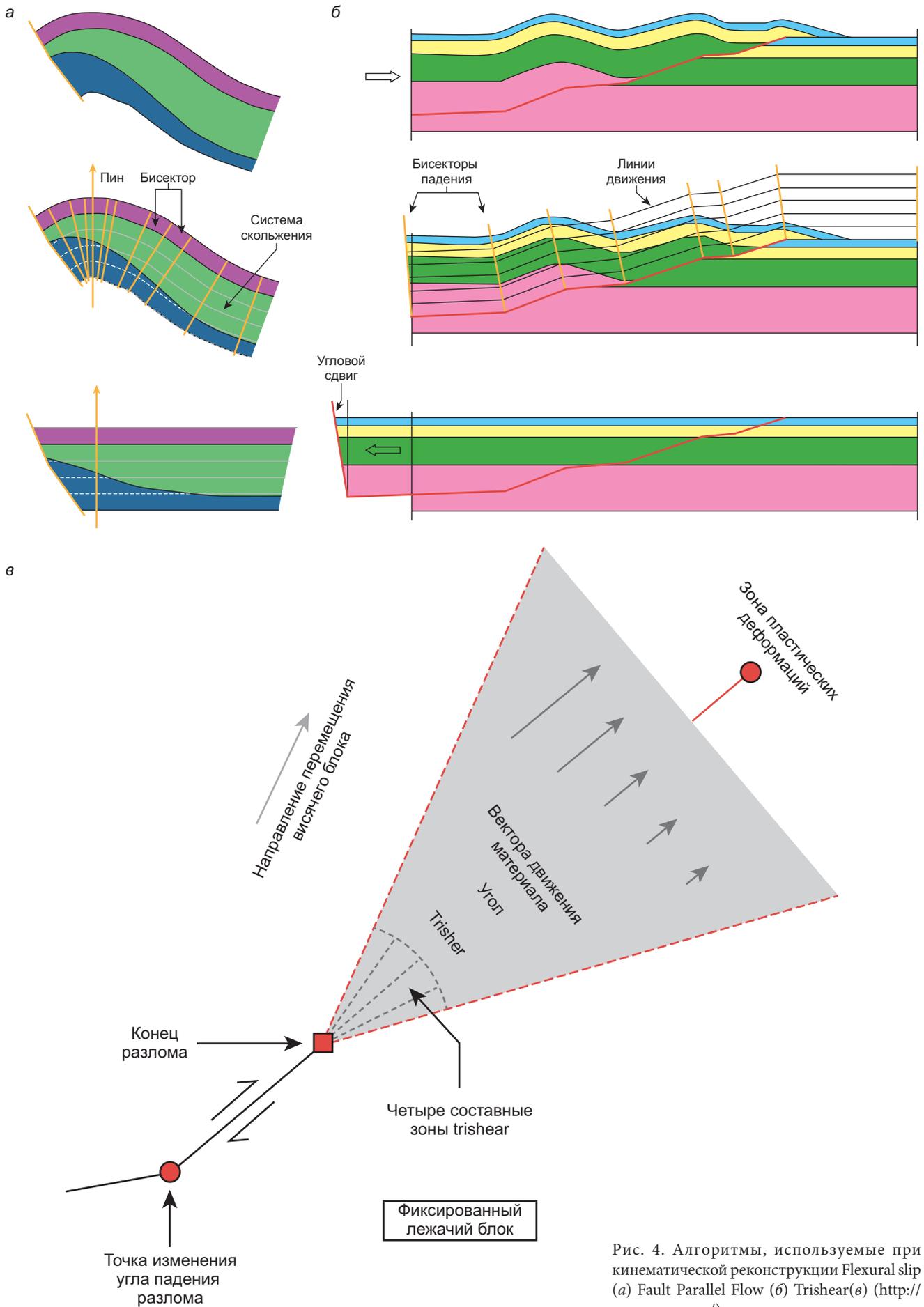


Рис. 4. Алгоритмы, используемые при кинематической реконструкции Flexural slip (а) Fault Parallel Flow (б) Trishear(в) (<http://www.mve.com/>)

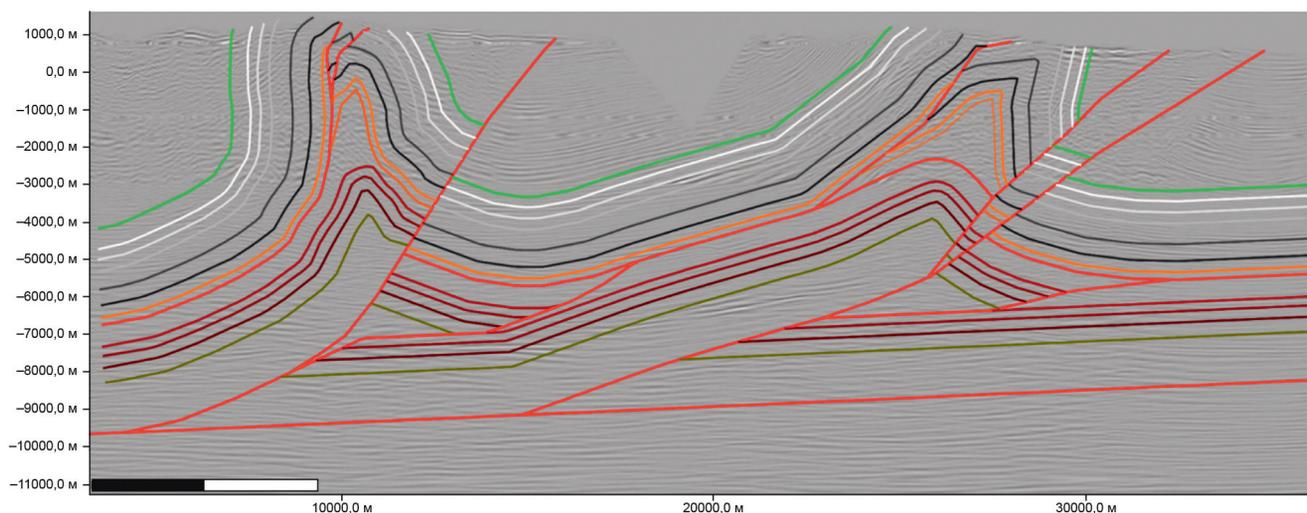


Рис. 5. Фрагмент сейсмического профиля через структуру Агуарагуэ

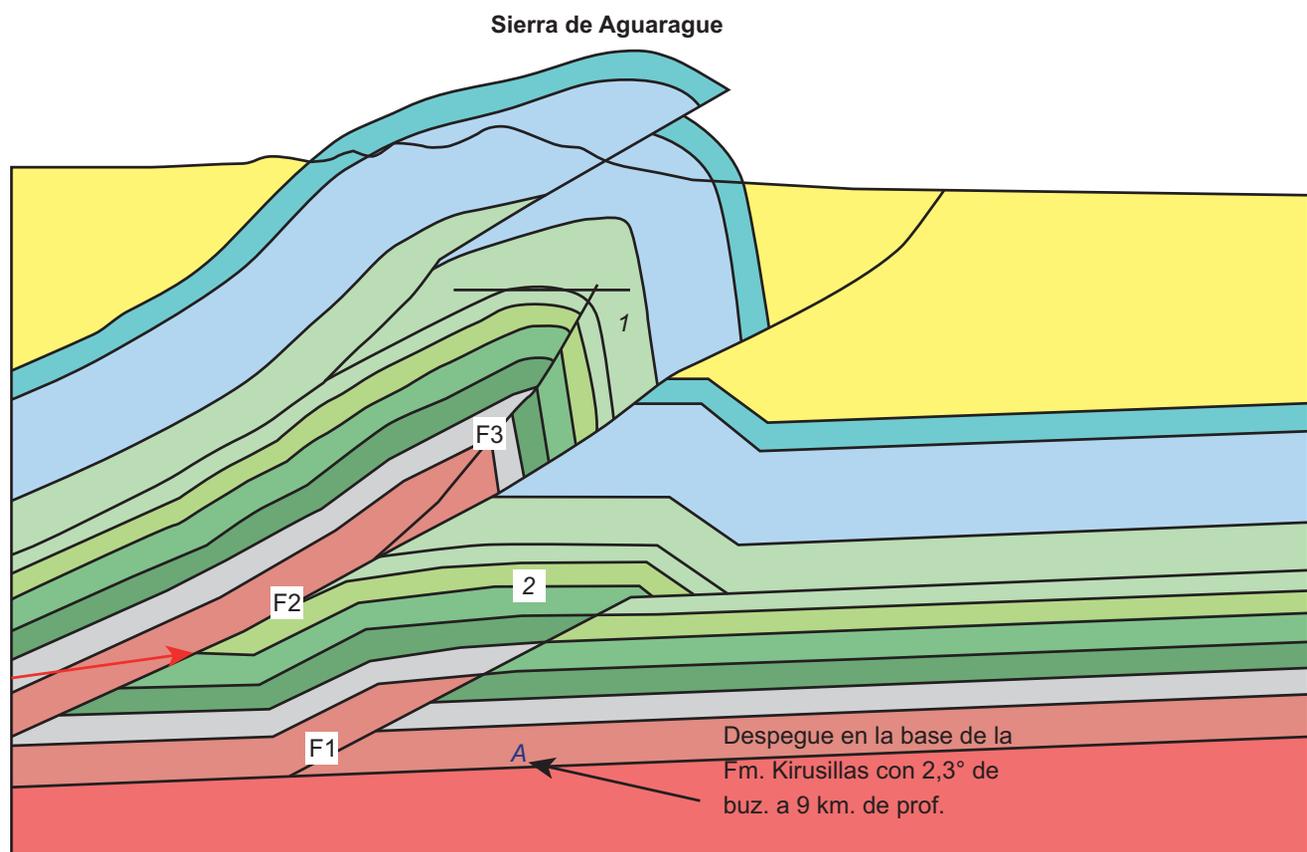


Рис. 6. Структурная модель складки Агуарагуэ (Ramirez, Nunez, 2009)

Монос в ядрах антиклиналей и асимметричность углов падения крыльев складок.

Ниже представлены результаты построения кинематической модели формирования фронтальных складок пояса Субандино (например, Сан Антонио, Агуарагуэ, Мадрехонес). Модель формирования приразломных антиклиналей в фронтальных частях надвиговых поясов предполагает взаимосвязь между структурой слоев на глубине и на поверхности. В ре-

зультате моделирования были выявлены следующие этапы эволюции структурного плана.

Додеформационное состояние — ранее 4 млн лет назад (рис. 7, А). Осадочные слои имеют полого-наклонное залегание, смещение по разломам и складчато-надвиговые деформации отсутствуют. Красными линиями показаны предположительные поверхности разломов, по которым в дальнейшем будет происходить смещение.



Рис. 7. Кинематическая модель эволюции структурного плана антиклинали. Этапы деформации: А — ранее 4 млн лет назад, Б — 4 млн лет назад, В–Е — 3,5–1,5 млн лет назад, Ж–З — 1,5–0 млн лет назад, И — современное состояние

Первый этап — 4 млн лет назад (рис. 7, Б). В пределах силурийских отложений начинаются деформации, выраженные в постепенном формировании взбросо-складки, генетически связанной с образованием рампы «1». По мере пропации разлома вверх по разрезу деформации затрагивают вышележащие отложения.

Второй этап — 3,5–1,5 млн лет назад (рис. 7, В–Е). По мере развития деформаций рампы «1» достигает отложений формации Лос Монос и переходит в флэт «1а». В этот момент формируется поверхность

пассивных надвигов «2» и «3» внутри формации Лос Монос. По мере надвигания пород нижнего структурного этажа, внутри формации Лос Монос формируются дуплексы антиформного скучивания «4» и «5», что обуславливает значительное локальное увеличение мощности формации, наблюдаемое в некоторых скважинах. Следует отметить, что для концептуальной модели характерна определенная степень упрощения и обобщения, тогда как в реальной структурной среде количество отдельных дуплексов будет выше, взаимоотношения разломов

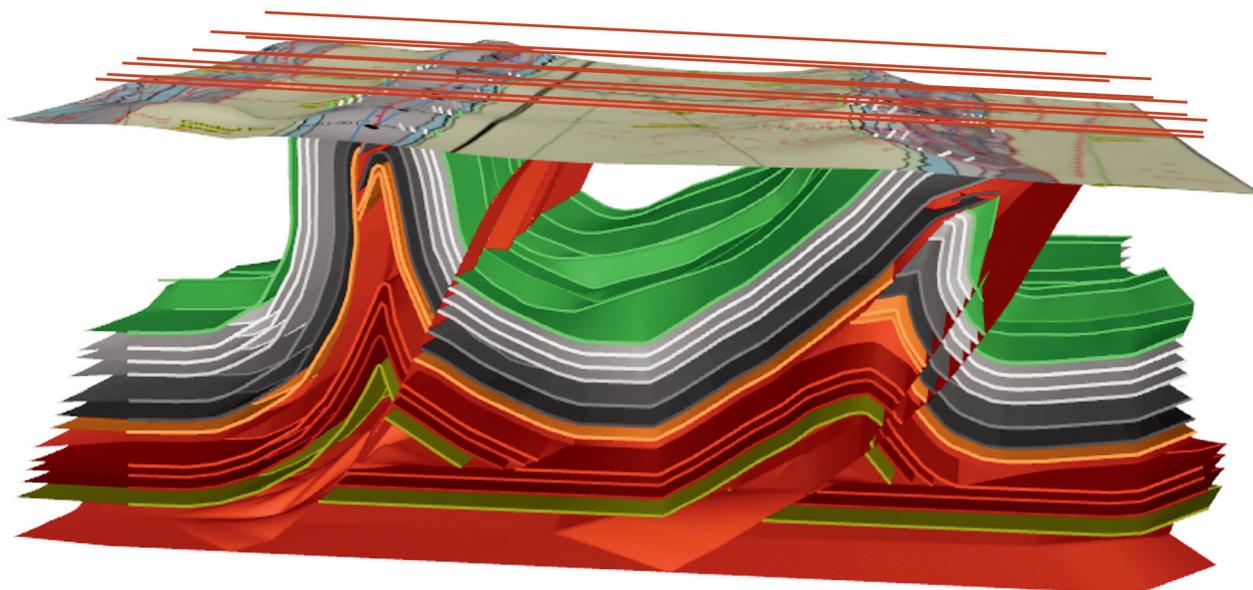


Рис. 8. Внешний вид трехмерной структурной модели складок Сан-Антонио и Агуарагуэ

и механизмы компенсации горизонтального перемещения будут несколько сложнее.

Третий этап — 1,5–0 млн лет назад (рис. 7, Ж–З). Под влиянием продолжающихся процессов сжатия, происходит формирование крутопадающих разломов «6» и «7». Данные разломы формируются последними и завершают формирование структурного плана антиклинали.

На протяжении всей истории формирования антиклинали происходит постепенная эрозия ее апикальной части. На рис. 7, И представлено современное строение антиклинали, пунктиром показаны восстановленные эродированные отложения.

На основе подготовленной концептуальной кинематической модели образования складки Агуарагуэ, с учетом данных региональной геологии, результатов бурения и полевых исследований была выполнена структурная интерпретация материалов сейсморазведки и создана сбалансированная трехмерная модель строения антиклиналей Агуарагуэ и Сан-Антонио (рис 8).

Кинематическая реконструкция регионального профиля. На основе концептуальной геологической модели было выполнено кинематическое восстановление по региональному профилю (рис. 9) и по трехмерной модели (рис. 10).

Формирование современного структурного плана складчато-надвигового пояса Субандино началось при проградации фронта надвигообразования из складчатого сооружения Анд. Начало деформаций приходится на средний–поздний миоцен от 12,4 до 8,5 млн лет назад (рис. 9, Б). Между 8 и 6,7 млн лет фронт деформаций приходится на надвиг Мандийюти, формируются структуры западной провинции (Суаро, Мандийюти, Уакая, Инигуазу, Бермехо и др.) (рис. 9, Б). Деформации распространяются в восточную провинцию около 6 млн лет назад (рис. 9, В, Г). До 5,9 млн лет фронт

деформаций приходится на структуру Ла Вертиенте. В промежуток от 5,5 до 2 млн лет последовательно формируются структуры Сан Антонио, Агуарагуэ, Агуа Салада (рис. 9, Д). В плиоцене (4,5 млн лет) сильный импульс сжатия, затронувший весь регион, приводит к формированию структуры Мандеяпекуа (рис. 9, Е–Ж). В настоящее время деформации сжатия отмечаются в структурах Суаруро, Агуарагуэ и Мандеяпекуа.

Данные, полученные по региональным 2D и 3D палинспатическим реконструкциям, были использованы при бассейновом моделировании, для уточнения модели тепловой истории и истории генерации углеводородов в изучаемом регионе. Наглядным результатом работ является трехмерная модель реконструкции эволюции структурного плана южной части зоны Субандино (рис. 10). По ее результатам была рассчитана классическая бассейновая модель развития углеводородных систем. На трехмерной реконструкции цветом показана степень зрелости органического вещества, выраженная в показателе отражения витринита на момент, предшествующий началу активных тектонических деформаций (около 12 млн лет).

Выводы. 1. Деформации в складчато-надвиговом поясе Субандино Сюр начались около 12 млн лет назад, и постепенно продвигались с запада на восток.

2. Формирование антиклинали Агуарагуэ началось около 4 млн лет назад и происходило в три этапа, для каждого из которых характерен свой структурный парагенез.

3. Процессы деформации в ядрах приразломных антиклиналей фронтальной части пояса Субандино носят сложный характер, который невозможно полностью описать одной геометрической моделью, и представляют собой совокупность хрупких и пластических деформаций. С точки зрения авторов, наиболее приближенной к реальности, является

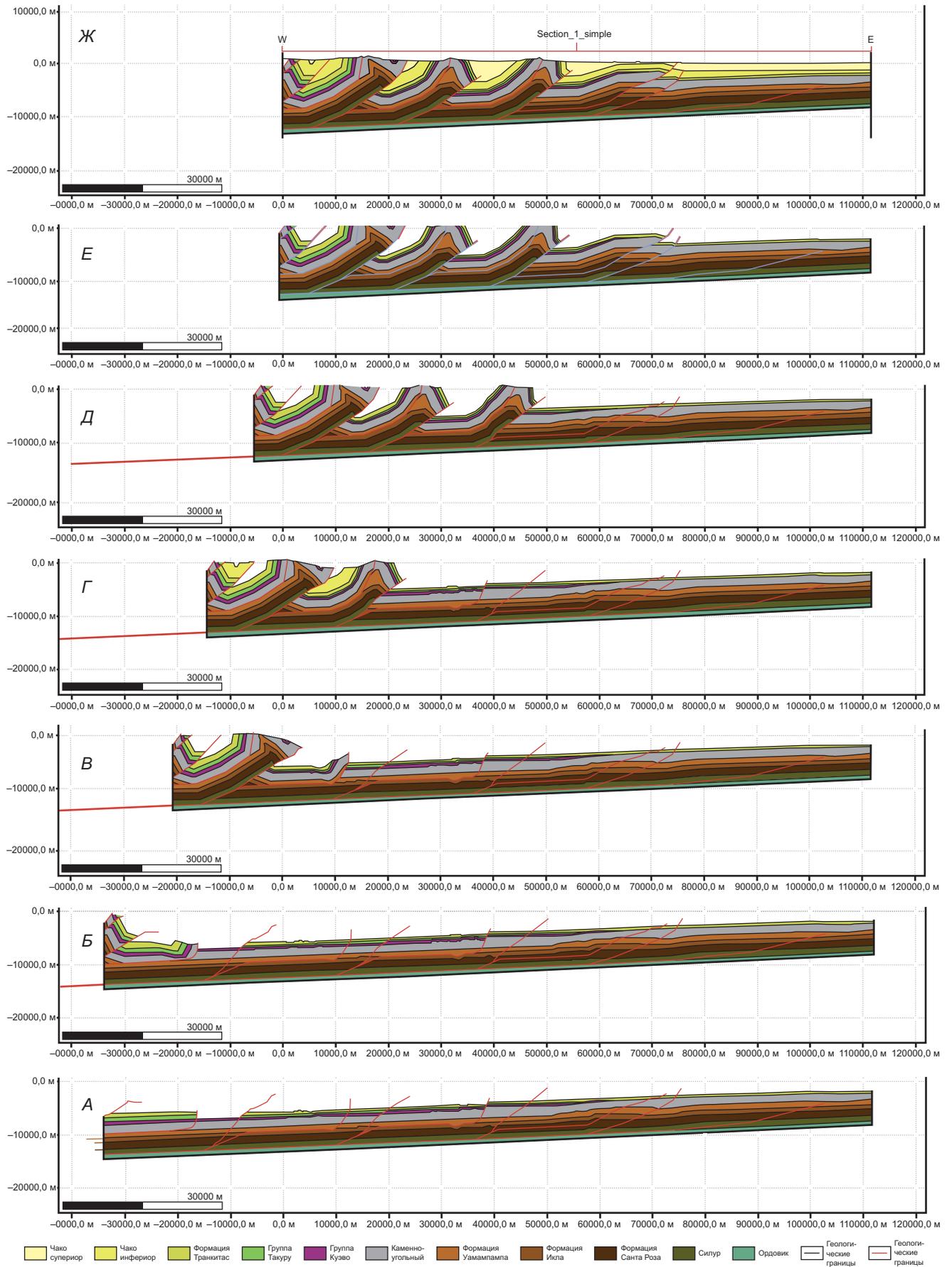


Рис. 9. Кинематическая реконструкция по региональному профилю. Этапы деформации (А-Ж) описаны в тексте статьи. Расположение профиля показано на рис. 1

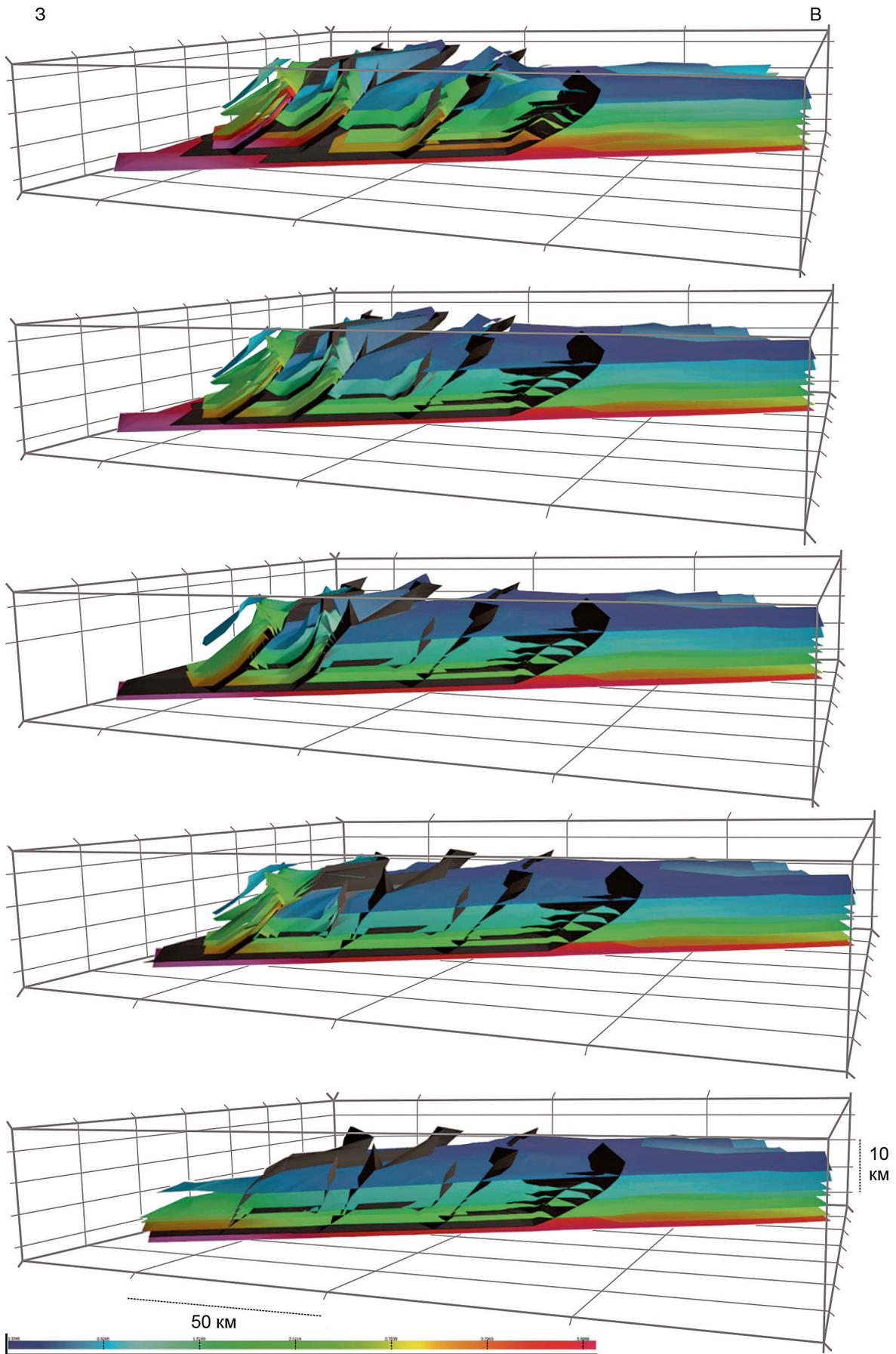


Рис. 10. Кинематическая реконструкция региональной трехмерной модели. Область моделирования показана на рис.1. Цветом обозначен показатель отражения витринита

модель антиформных дуплексов сучивания, так как эта модель наиболее хорошо увязывает между собой данные сейморазведки, бурения и полевых геологических работ.

4. Результаты кинематических реконструкций могут быть использованы для бассейнового моде-

лирования и оценки генерационного потенциала складчато-надвиговой области.

Благодарности. Авторы благодарят компанию Midland Valley Exploration Ltd. за возможность использовать программное обеспечение Move в учебных и научных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гайдук В.В., Прокопьев А.В. Методы изучения складчато-надвиговых поясов / Отв. ред. Л.М. Парфенов. Рос. акад. наук. Сиб. отд. Ин-т геол. наук. АО «Якутскгеофизика». Новосибирск: Наука; Сиб. Предприятие РАН, 1999. 160 с.

Геологический словарь: В 3 т. / Гл. ред. О.В. Петров. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 432 с.

Brooks B. A. Bevis M, Whipple K., et al. Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc // Nature Geoscience. 2011. Vol. 4. P. 380–383.

Dahlstrom C.D.A. Balanced cross sections // Canadian J. Earth Sci. 1969. Vol. 6, N 4. P. 743–757.

Dunn J.F. Hartshorn K.G., Hartshorn P.W. Structural styles and hydrocarbon potential of the Sub-Andean thrust belt of southern Bolivia / Eds. A.J. Tankard, R. Suárez Soruco, H.J. Welsink // Petroleum Basins of South America, AAPG Memoir 62, 1995. P. 523–545.

Fernández Seveso F., Vistalli M.C., Viñes R.F. Correlación de reservorios en la cuenca silúrica-devónica del Chaco: Una revisión integrada previa a la adquisición de bloques exploratorios en Bolivia // Boletín de Informaciones Petroleras: Tercera Época. 2000. V. XVII. No. 61. P. 152–166.

Fuentes, F., Starck D., Rocha E. Geometry and kinematics of structures of the southern sub-Andean fold-thrust belt

of Bolivia / Eds. G. Zamora, K.R. McClay, and V.A. Ramos, Petroleum basins and hydrocarbon potential of the Andes of Peru and Bolivia: AAPG Memoir 117. 2018. P. 437–458.

Ramirez L., Nunez S. Structural Modelling in Aguaraque Range // Simposium Bolivariano Colombia, 2009.

Starck D., Constantini L., Schulz A. Analisis de algunos aspectos geometricos y evolutivos de las estructuras de la faja plegada Subandina del norte de Argentina y el sur de Bolivia// Fifth Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Mar del Pla, 2002 (EXPR-3-DS-40).

Starck D. Silurian–Jurassic stratigraphy and basin evolution of northwestern Argentina / Eds. A.J. Tankard, R. Suarez Soruco, H.J. Welsink. Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, 1995. P. 251–268.

Weiss J.R., Brooks B.A., Arrowsmith J.R., et al. Spatial and temporal distribution of deformation at the front of the Andean orogenic wedge in southern Bolivia // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. V. 120. 2015. P. 1909–1931.

Woodward N.B., Boyer S.E. Suppe J. An outline of balanced cross-sections-University of Tennessee: Knoxville publications, 1985. 138 p.

<http://www.mve.com/>

Статья поступила в редакцию 21.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.10.2024