

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ЕВРАЗИАТСКОЙ И АМУРСКОЙ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Б.Ф. Шевченко, В.Б. Каплун

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН

680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65

E-mails: shevchenko@itig.as.khb.ru, kaplun@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 26 июня 2006 г.

На основании интерпретации геотермических, сейсмотомографических, сейсмических, геоэлектрических, гравиметрических и магнитометрических данных выявлены основные особенности глубинного строения области сочленения двух литосферных плит: Евразийской и Амурской. Вдоль профиля, пересекающего область сочленения, построена комплексная геолого-геофизическая модель. Литосфера в данном сечении представляет собой слой переменной мощности от 100 до 170 км со слоисто-блоковой структурой. По модельным построениям выделены четыре субгоризонтальных уровня возможных горизонтальных литосферных перемещений. На основании полученной модели выполнена геодинамическая интерпретация, результаты представлены в виде двухмерной и трехмерной кинематических схем геодинамических сил, действующих в пределах литосферного слоя. Предложен вариант палеогеодинамической реконструкции области сочленения плит.

Ключевые слова: *комплексная интерпретация, глубинные модели литосферы, Амурская и Евразийская плиты, геодинамика.*

THE DEEP GEODYNAMIC MODEL OF THE EUROASIAN AND AMUR LITHOSPHERIC PLATES JUNCTION AREA

B.F. Shevchenko, V.B. Kaplun

Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch of RAS

Main peculiarities of the deep structure of the Eurasian and Amur lithospheric plates junction area are revealed on the basis of the geothermal, seismotomographic, seismic, geoelectrical, gravimetric and magnetometric data interpretation. A complex geological-geophysical model was constructed along the profile crossing the junction area. In this section the lithosphere has a variable thickness from 100 to 170 km and layered-block structure. According to the model it have been distinguished four subhorizontal levels of the probable horizontal displacements within the lithosphere. The results of geodynamic interpretation was shown as 2D and 3D kinematic schemes of the geodynamic forces acting within the lithospheric layer. It is suggested a version of the paleogeodynamic reconstruction of the plates junction area.

Key words: *complex interpretation, depth model of the lithosphere, Amur and Eurasian plates, geodynamics.*

Введение

Современная Амурская плита (литосферный блок), расположенная в восточной части Центрально-Азиатского тектонического пояса, охватывает часть Тихоокеанского тектонического пояса, и её границы не всегда совпадают с границами традиционных структурных тектонических элементов [Тектоника..., 2005]. Плита характеризуется сравнительно пониженной

площадной сейсмичностью. С восточной и северной сторон она обрамлена линейными поясами интенсивной сейсмичности, с западной и южной сторон плиты таких интенсивных поясов сейсмичности не наблюдается [Объяснительная..., 2000]. Впервые Амурская литосферная плита была выделена Л. П. Зоненшайном с соавторами в 1978 г. [Зоненшайн и др., 1978]. Северная граница Амурской плиты была ими проведена по поясу сейсмичности, проходяще-

му почти по середине Памира (юго-западный фланг), протягивающемуся затем до озера Байкал и Станового хребта и далее на северо-восток вплоть до Удской губы Охотского моря. Затем северная граница сопрягается с сейсмическими зонами Сахалина, с одной стороны, и хребта Черского, с другой. Впоследствии некоторыми исследователями границы Амурской плиты были несколько изменены. Так, в работе [Парфенов и др., 2003] ее северное ограничение проходит вдоль южной границы Монголо-Охотской складчатой системы. В работе [Имаев и др., 2003] нет четкого положения северной границы Амурской плиты, а вместо этого между ней и Евразийской плитой выделяется буферная зона, расположенная между Становым и Монголо-Охотским разломами. Иное месторасположение имеют северная и восточная границы Амурской плиты (блока), по данным GPS-наблюдений [Гатинский, Рудквист, 2004].

При изучении областей сочленения современных литосферных плит в пределах континента границы между ними устанавливаются по комплексу геолого-геофизических признаков. К ним относятся области линейной сейсмичности, а также области увеличения мощности литосферы вдоль предполагаемых плитных границ раздела [Борукаев, 1997]. Следует отметить, что применяемые принципы определения границ литосферных плит по зонам линейной сейсмичности, гипоцентры землетрясений которых имеют, как правило, средне- и нижнекоровый характер, не обеспечивают выделения изучаемых объектов в виде трехмерных (3-D) тел.

Для изучения глубинного строения области сочленения литосферных плит предварительно были проведены работы по выделению

литосферы как трехмерного объекта [Шевченко, 2002; Тектоника..., 2005]. К настоящему времени 3D модель литосферы построена на территорию Дальнего Востока России и Северо-Восточного Китая. Она включает следующие элементы: глубинные поверхности раздела (подошва земной коры, подошва литосферы), серию сейсмотомографических планов-срезов в интервале глубин 0-220 км [Van der Hilst et al., 1993], схемы интерпретации аномального гравитационного и магнитного полей, разрезы и трехмерные блок-диаграммы (плоты). В дальнейшем все последующие построения проводились с учетом параметра мощности литосферы.

Исходные материалы, методика исследований

Глубинное строение и кинематика области сочленения Евразийской и Амурской литосферных плит (Монголо-Охотское звено) рассматриваются на примере меридионального профиля, проходящего от реки Амур (пос. Джалинда) на юге и до поселка Б. Нимныр на севере (рис. 1). Профиль с юга на север пересекает ряд крупных геологических структур, описание которых приведено по литературным данным [Объяснительная..., 1984; Tectonic..., 2002; Тектоника..., 2005]: Аргуно-Мамынский массив (микроконтинент), Монголо-Охотский позднепалеозойско-мезозойский орогенный пояс, Могочинский блок Селенга-Станового каледонского орогенного пояса, Становая гранит-зеленокаменная область, Алданская гранулит-гнейсовая область. Все границы между указанными геологическими структурами имеют разрывной (разломный) характер. С юга на

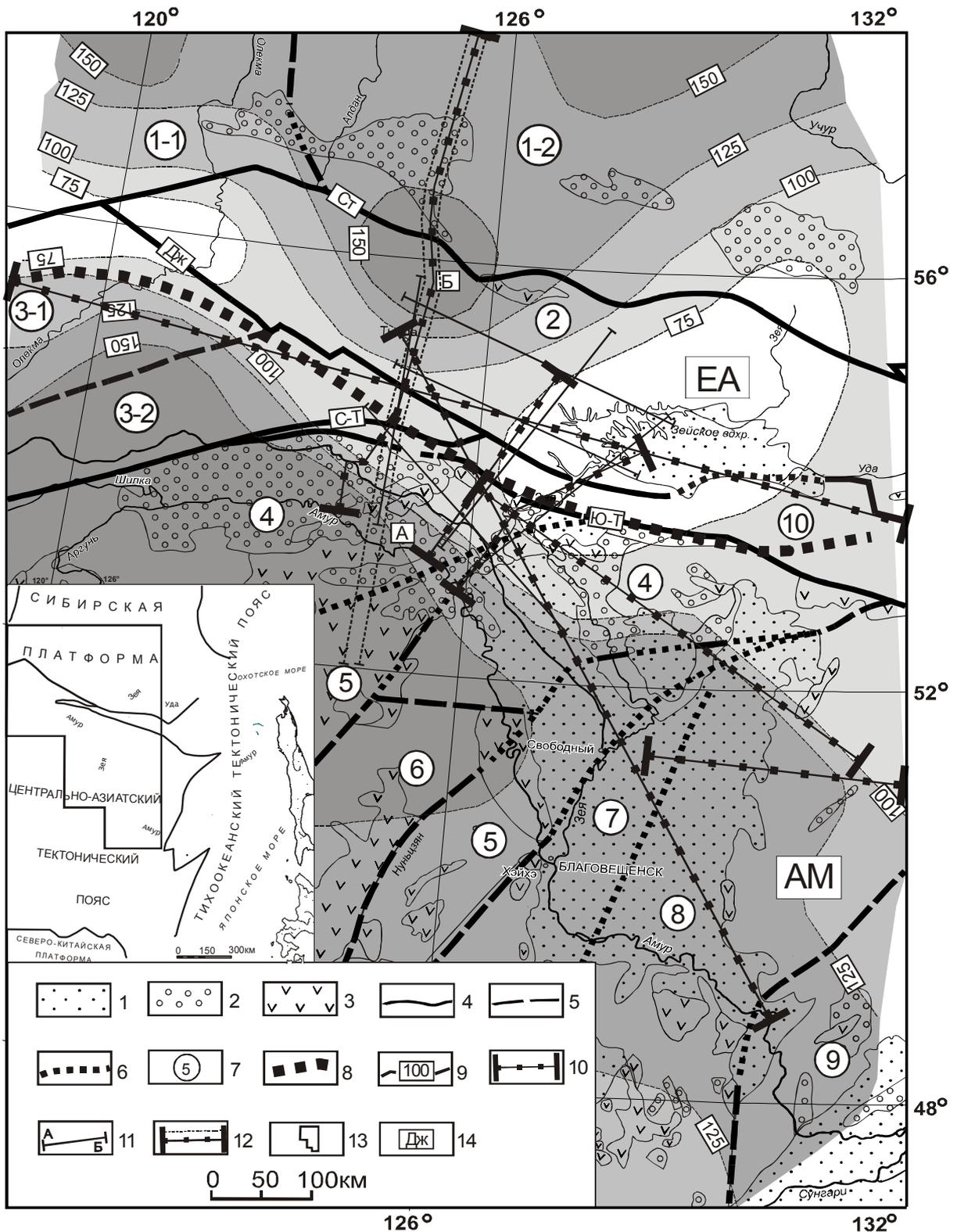
Рис. 1. Геолого-структурная схема района исследований (по работе Карсакова Л.П. с соавторами, 2005, с упрощениями).

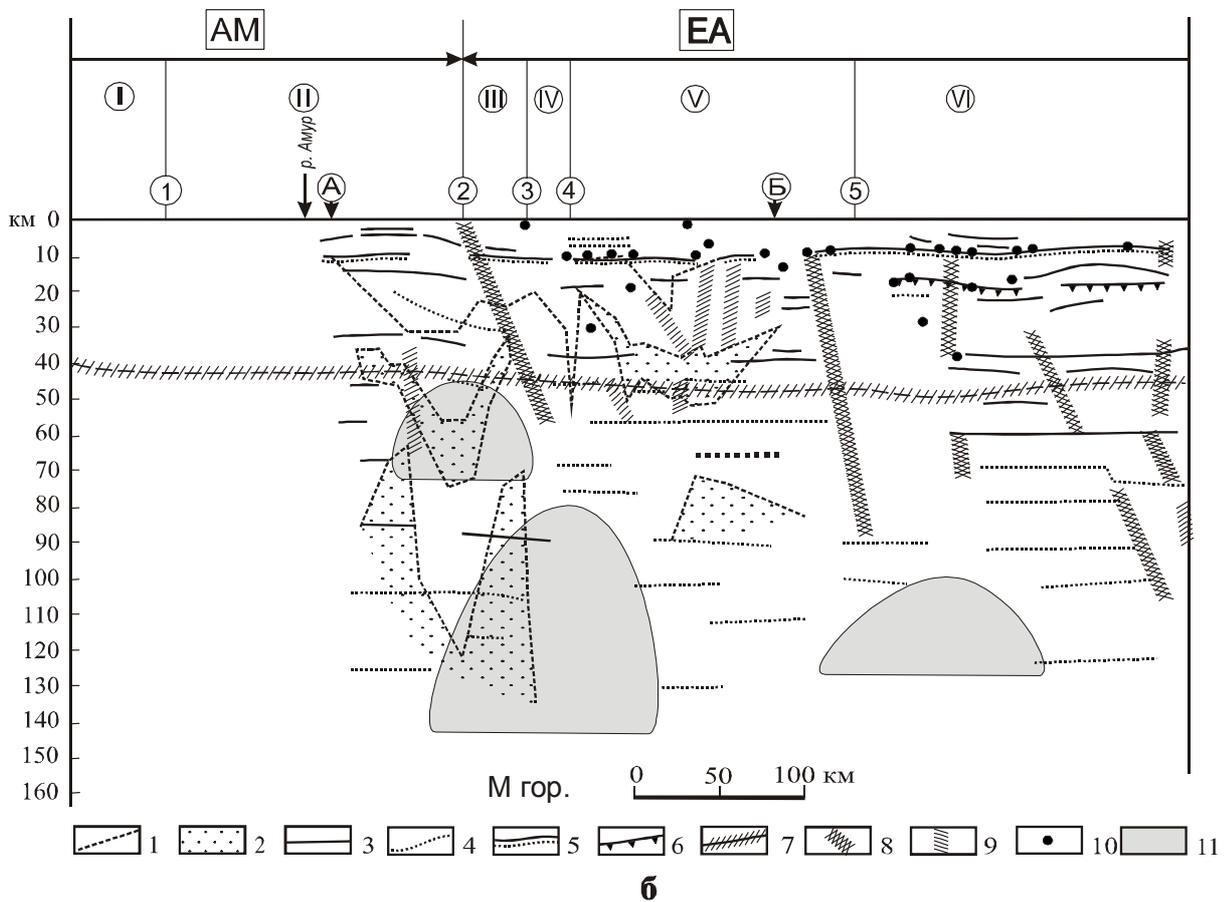
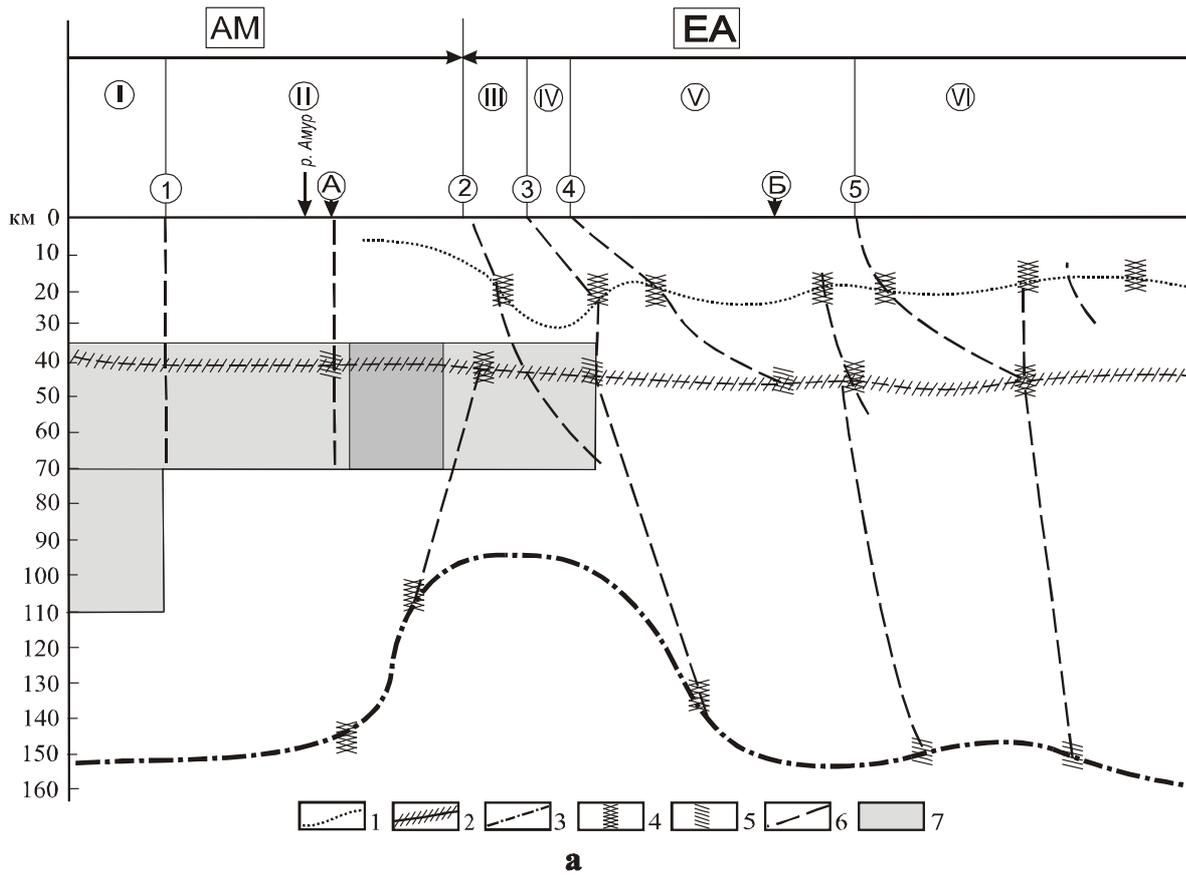
Осадочные бассейны: 1 – кайнозойские, 2 – мезозойские; 3 – фрагменты мезозойских вулканитов; разломы: 4 – межблоковые, 5 – внутриблоковые, 6 – перекрытые осадочными отложениями; 7 – номера основных тектонических структур (Алдано-Становой щит: 1-1 – Олекминская гранит-зеленокаменная область, 1-2 – Алданская гранулит-гнейсовая область; 2 – Становая гранит-зеленокаменная область. Центрально-Азиатский тектонический пояс: блоки Селенга-Станового каледонского орогенного пояса: 3-1 – Тунгирский, 3-2 – Могочинский; 4 – Аргуно-Мамынский массив (микроконтинент); 5 – Северо-Хинганский каледонский орогенный пояс; 6 – массив Дягдачи; 7 – Силамулунь-Иэньбэньский герцинский орогенный пояс; 8 – Турано-Чжангуанцайлинский массив (микроконтинент); 9 – Цзямусы-Малохинганский массив (микроконтинент); 10 – Монголо-Охотский позднепалеозойско-мезозойский орогенный пояс); 8 – современная граница схождения тектонических плит (ЕА – Евразийская, АМ – Амурская); 9 – изопахиты литосферы, в км; линии профилей: 10 – глубинного сейсмического зондирования, 11 – магнитотеллурического зондирования (интервал МТЗ вдоль исследуемого профиля); 12 – полоса профиля исследований; 13 – контур района исследований на схеме тектонического районирования (врезка); 14 – наименование разломов: Ст – Становой, Дж – Джелтулакский, С-Т – Северо-Тукурингрский, Ю-Т – Южно-Тукурингрский.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

север – это Южно-Тукурингский, Северо-Тукурингский, Джелтулакский и Становой разломы. Граница схождения двух современных тектонических (литосферных) плит – Евразийской и Амурской в пределах профиля совпадает с Северо-Тукурингским разломом [Хаин, Ломизе 1995; Парфенов и др., 2003].

Особенности глубинного строения Верхнего Приамурья и юга Якутии вдоль изучаемого профиля уточнены, по сравнению с ранее построенной 3D моделью [Тектоника..., 2005]. Были учтены расчеты верхних кромок аномалиеобразующих магнитных объектов (преимущественно среднекоровые глубины), выполне-





МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

на интерпретация серии профилей магнитотеллурического зондирования. Для изучаемого профиля, помимо глубинных площадных параметров, были использованы результаты глубинного сейсмического зондирования методом МОВЗ и плотностного моделирования.

Глубинная двумерная модель представляет собой разрез литосферного слоя переменной мощности от 95 до 160 км (рис. 2а). Значения глубин получены по геотермическим данным и определялись как точки пересечения кривой распределения температур с линией солидуса мантии. Температура частичного плавления мантийных пород была взята постоянной и равной 1080°C. При построении была использована формула расчета мощности литосферы из работы [Леви, Лысак, 1986]. Внутри литосферного слоя (интервал между подошвой коры и кровлей астеносферы), по сейсмографикским данным, выделены два слоя с повышенными значениями скорости продольных волн (интервалы 35-70 и 70-110 км).

Подошва земной коры (поверхность М) построена по имеющимся данным ГСЗ и МОВЗ. [Булин и др., 1972; Егоров и др. 2000; Золотов, Ракитов, 2000]. Морфология этой границы раздела изменяется по линии профиля с юга на север от 38 до 45 км. В пределах земной коры, по данным интерпретации аномального магнитного поля, выделена поверхность распределения верхних кромок магнитоактивных тел. Глубина прохождения данной поверхности меняется от 10 км в южной части профиля и до 20 км – в северной. Максимальная

глубина локального погружения поверхности составляет 30 км [Лойтер, Малышев, 1986]. На земной поверхности этому погружению на профиле соответствует интервал от Южно-Тукурингского до Желтулакского разлома (рис. 1).

Морфология поверхности подошвы литосферы предопределяет ее последующую внутреннюю слоисто-блоковую структуру. Зоны максимальных градиентов изменения глубин поверхности раздела литосфера-астеносфера, устанавливаемые по профильным и площадным построениям, а также их перерывы определяют месторасположение (проекцию, следы) вертикальных границ делимости литосферы. Таким образом формируется слоисто-блоковая модель первого приближения, которая в дальнейшем детализируется другими геофизическими методами (модели иной специализации) [Косыгин, 1983].

Геоэлектрический разрез (рис. 2б) построен по данным, полученным при изучении глубинного строения литосферы методом магнитно-теллурического зондирования (МТЗ) района трассы БАМ [Галтыкин и др., 1986; Каплун, 2006]. Интерпретация выполнялась в рамках одномерной модели по профилю длиной 290 км с 31 зондированием. Расстояние между пунктами неравномерное и в среднем составляет 10 км. Геоэлектрический разрез построен до глубины 160 км и представляет собой слоистую модель. При рассмотрении сверху вниз на разрезе выделяются несколько слоев.

Первый слой неоднородный, переменной мощности, и в основном характеризуется вы-

Рис. 2. Модели области сочленения литосферных плит по комплексу геофизических методов.

Плиты: АМ – Амурская, ЕА – Евразийская. Тектонические подразделения: I – Северо-Хинганский орогенный пояс, II – Аргуно-Мамынский массив, III – Монголо-Охотский орогенный пояс, IV – Селенга-Становой орогенный пояс, V – Становая гранит-зеленокаменная область, VI – Алдано-Становой щит. Разломы: 1 – Дарбиганский, 2 – Южно-Тукурингский, 3 – Северо-Тукурингский, 4 – Желтулакский, 5 – Становой. А и Б – южная и северная границы профиля МТЗ, соответственно.

а: Слоисто-блоковая модель по результатам сейсмического, сейсмографикского, геотермического и магнитного методов:

Глубинные поверхности раздела: 1 – верхние кромки магнитоактивных тел, 2 – подошва земной коры (поверхность Мохоровичича), 3 – подошва литосферы; 4, 5 – разломы: 4 – сбросового типа (зоны градиентов), 5 – сдвигового типа (трансформные); 6 – блокообразующие границы; 7 – контур сейсмографикских объектов с повышенной скоростью прохождения продольных волн. Интенсивность цвета соответствует увеличению скорости в процентном отношении.

б: Сейсмо-геоэлектрический разрез по результатам МОВЗ и МТЗ.

1 – границы геоэлектрических слоев; 2 – области максимальной электрической проводимости; 3 – сейсмические границы интенсивных обменов волн; 4 – прочие границы обмена; 5 – горизонт в гранитном слое; 6 – граница Конрада; 7 – граница Мохо; 8, 9 – вертикальные и наклонные глубинные зоны разделов (блокообразующие): 8 – первой категории, 9 – второй категории; 10 – гипоцентры землетрясений; 11 – области потери границ обмена сейсмических волн.

сокими электрическими сопротивлениями. Сопротивление в пределах слоя меняется от нескольких сотен Ом·м до десяти тысяч Ом·м. Мощность его колеблется от 60 км южнее Южно-Туруингского разлома до 25 км севернее Джелтулакского разлома. В средней части этого слоя выделяется граница на глубинах 20-30 км, которая делит первый слой на два – верхний и нижний. Верхний слой более высокоомный с сопротивлениями более 1000 Ом·м, а нижний – менее высокоомный и его сопротивление составляет сотни Ом·м. Выделение пространственного положения границы между верхним слоем и нижними слоями является неустойчивым, что может быть связано как с ее геоэлектрическими свойствами, так и с качеством полевого материала. Наиболее отчетливо эта граница проявлена в южной части разреза и отдельные фрагменты – в северной части. Второй слой геоэлектрического разреза характеризуется низкими сопротивлениями, порядка нескольких десятков Ом·м. Мощность слоя в среднем составляет 15 км. Третий слой имеет сопротивление в среднем 200 Ом·м и мощность около 50 км. В его основании расположен четвертый слой низкого сопротивления (менее 100 Ом·м). Мощность четвертого слоя не определена из-за ограниченного частотного диапазона интерпретируемых кривых МТЗ.

Отличительной особенностью разреза является наличие неоднородности в его центральной части, которая проявляется в нарушении сплошности выделенных слоев и их смещении в вертикальном направлении относительно друг друга. Области геоэлектрической неоднородности соответствует на земной поверхности интервал между Северо-Туруингским и Джелтулакским разломами. Она прослеживается на всю глубину геоэлектрического разреза и характеризуется пониженными значениями электрического сопротивления.

На рис. 2б помимо геоэлектрических границ вынесены результаты сейсмических наблюдений по данным МОВЗ [Булин и др., 1972]. Структура земной коры и верхней мантии представлена в виде горизонтальных сейсмических границ обмена (выделено 15 границ до глубины 130 км) и вертикальных границ. Вертикальные границы выделены по признаку потери корреляции при прослеживании горизонтальных сейсмических границ. Сейсмические вертикальные границы в основном представлены в авторском варианте. Там, где неоднознач-

ность построений позволяла сделать предположение о наклонном характере вертикальных границ, было выполнено соответствующее редактирование. Сейсмическая структура литосферы вдоль разреза является слоисто-блоковой и подчеркивает слоисто-блоковую структуру, полученную по геоэлектрическим данным и иным структурным построениям (рис. 2а).

В пределах средней и нижней части литосферы установлено соответствие двух аномальных областей: исчезновение границ обмена сейсмических волн и отсутствие горизонтальных геоэлектрических границ. Первая область расположена в интервале глубин 45-70 км. На земной поверхности ей соответствует Монголо-Охотский орогенный пояс. Вторая, с относительным смещением вдоль профиля на север, расположена на глубинах 90-130 км. Гипоцентры землетрясений, имеют преимущественно верхне- и среднечорную природу.

Эффективные значения плотности по всей глубине изучаемого разреза, полученные в результате решения обратной задачи гравиметрии, приведены по данным плотностного моделирования [Подгорный, Мальшев, 2005].

Дальнейшая комплексная геолого-геофизическая интерпретация вдоль изучаемого профиля приводит к построению статической глубинной геолого-геофизической модели строения литосферы по Ю.А. Косыгину [Косыгин, 1983]. В верхней части разреза, примерно до глубин 20 км, где возможна линейная интерполяция вещественных характеристик геологических тел, для описания разреза использованы геологические данные по составу пород, их возрасту, характеру дизъюнктивных нарушений [Объяснительная..., 1984; Tectonic..., 2002; Тектоника..., 2005]. Далее, на глубине, разрез характеризуется параметрами плотности, скорости, геоэлектрического сопротивления, полученными по результатам комплексной геофизической интерпретации.

Геодинамическая интерпретация вдоль глубинного разреза проведена, исходя из понимания основных задач геодинамики [Хаин, Ломизе, 1995]. Процесс их решения можно представить в виде следующего логического ряда: силы–напряжения–деформации–изменение состояния и свойств–перемещение геологических объектов. В общем виде процедура геодинамической интерпретации глубинных моделей сводится к построению кинематических моделей, основанных на физических пред-

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

посылках возможных источников тектонических движений как в пределах литосферы (внутренние факторы), так и вне ее (внешние факторы). Последние в данной работе не рассматриваются в силу ограниченной длины изучаемого профиля.

Группа внутренних факторов отражает эволюционное саморазвитие литосферы в условиях постоянного силового воздействия гравитационного и теплового полей. В модельных геолого-геофизических параметрах это проявляется в наличии аномальных характеристик в распределении с глубиной скорости, плотности, электропроводности и теплового потока, наличии в литосферном слое инверсионных взаимоотношений геофизических модельных свойств, контрастных по физическим характеристикам геологических объектов. Все эти особенности находят отражение в построенной комплексной геолого-геофизической модели.

Литосфера исследуется нами в качестве относительно изолированного тела, отличающегося от астеносферы по реологическим свойствам [Жарков, 1983; Артюшков, 1993] и, следовательно, значительное влияние на неравновесное состояние литосферы и соответственно на геодинамику оказывает геометрия и размеры слагающих ее слоев и блоков. Возможность подобного влияния теоретически была исследована при решении геомеханических задач распределения напряжений как источников тектонических движений [Маслов, 1995; Иноземцев, Маслов, 2000]. Механизмом в данном случае является перманентная изостатическая компенсация ансамбля блоков литосферного слоя относительно астеносферы. Подобный подход позволил получить представления о мгновенной кинематике литосферы в целом и об отдельных, внутренних, ее слоях в частности.

Построенная на основании модельных параметров схема возможных распределений векторов напряжений, отражает вероятную кинематику литосферных блоков вне временного фактора. Иными словами, кинематические характеристики глубинной модели несут информацию как о современном напряженно-деформированном состоянии среды, так и о возможных палеонапряжениях.

Для разделения современных и палеогеодинамических кинематических параметров глубинной модели (направление перемещения литосферы и ее блоков) были привлечены гео-

динамические характеристики исследуемого участка земной поверхности. Выделение современных кинематических факторов при анализе глубинной геолого-геофизической модели и оценка наиболее вероятного геодинамического механизма основаны на корреляции современных перемещений земной поверхности [Карта..., 1989] с модельными кинематическими построениями.

Верификация построенной глубинной кинематической модели по отношению к современному напряженно-деформированному состоянию верхней части литосферы выполнена с привлечением данных по расчетам фокальных механизмов очагов землетрясений [Имаев и др., 2003] и соответствующих фрагментов карт ее напряженного состояния [Семицкий, 2001; Шерман, Лунина, 2001].

Палеогеодинамическая интерпретация выполнена на основании представлений о механизме наращивания мощности литосферы и значительном перемещении литосферных блоков, начиная с раннего мезозоя [Летников, Леви, 1985; Бретштейн и др., 2006]. При построении ретроспективной модели литосферы был использован ряд геолого-геофизических фактов и теоретических предпосылок об эволюции литосферных плит. Это время становления границы сочленения плит и направление перемещения вдоль нее [Парфенов и др., 2003; Кириллова, 2005], наличие инверсий колебательных движений земной коры в процессе осадконакопления [Варнавский, 1999], длительность периода существования поверхности пенеплена [Геологическая..., 1999].

Верификация глубинной палеогеодинамической модели произведена путем сопоставления расчетных геофизических параметров по верхней части разреза (плотность) с независимыми петрофизическими данными [Мальшев и др., 2001].

Таким образом, глубинное геолого-геофизическое моделирование всего объема литосферы с последующей геодинамической интерпретацией позволяет расширить список факторов, определяющих характер границы сочленения тектонических плит.

Результаты

По геологическим данным, граница между Евразийской и Амурской литосферными плитами в пределах профиля проходит вблизи Северо-Турингского разлома [Парфенов и др., 2003].

По нашим построениям, в глубинном отношении единого разделительного элемента не выявлено. Граница сочленения двух плит является некоторой сложно построенной зоной с сокращенной до 100 км мощностью литосферного слоя (рис. 3). По результатам интерпретации – это клиноподобная, с усеченной верхней частью, область, выполненная в верхней части земной коры разновозрастными осадочными и магматическими комплексами. На земной поверхности область протягивается с юга на север от Южно-Тукурингского разлома до Джелтулакского. Общая протяженность зоны составляет около 50 км. На глубине, на уровне подошвы земной коры, горизонтальная мощность зоны увеличивается до 70-80 км с падением на север под углом 50-55°. Следует отметить тот факт, что, по нашим построениям, при наличии общего падения зоны сочленения плит на север, в ее пределах существуют наклонные границы с противоположным, южным падением.

Интерпретация геофизических структурных моделей (рис. 2а,б) позволяет сделать заключение о выклинивании юрских дислоцированных осадочных образований на глубинах 7-8 км в пределах интервала падающих навстречу друг другу Южно и Северо-Тукурингских разломов. Область сочленения последних, по нашим построениям, находится на глубине примерно 20 км (рис. 3). Основанием для осадочных комплексов являются гранитоидные образования с интервалом времени становления от триаса до ранней юры. В южной части изучаемого профиля в основании раннемезозойских флишеидных комплексов Верхнеамурского прогиба расположены позднепалеозойские гранитоиды, отнесенные, по последним радиоизотопным определениям, к ранней перми [Сорокин и др., 2005]. На основании расчетных плотностных характеристик и петрофизических данных не следует исключать возможности присутствия фрагментов архейских метаморфических комплексов [Физические..., 1987; Тектоника..., 2005; Подгорный, Малышев, 2005].

В пределах линии разреза, по геологическим данным (приповерхностная часть), достоверно установлены разновозрастные надвиго-поддвиговые границы раздела геологических комплексов [Геологическая..., 1999]. В коровом пространстве большинство вероятных геолого-геофизических границ раздела также являются наклонными. По комплексным геофизическим признакам (сейсмические и гео-

электрические на рис. 2б) выделены возможные наклонные границы в верхней мантии.

Наличие в разрезе наклонных границ делимости литосферы различной степени достоверности является свидетельством горизонтальных перемещений как коровых и верхнемантийных литосферных блоков, так и всей литосферы в целом. Еще одним признаком, свидетельствующим о происходящих или происходивших горизонтальных и вертикальных перемещениях, являются аномальные характеристики тел разнородных геофизических моделей (плотностной, геоэлектрической, сейсмической) особенно в той части, где они совпадают или пересекаются между собой (рис. 2б, 3). Причем сразу следует отметить, что геодинамические признаки геофизических моделей относятся как к современному напряженно-деформируемому состоянию литосферы, так и к ее геоисторическому прошлому.

Геофизические характеристики, относительно пониженные значения плотности и электрического сопротивления, могут свидетельствовать о наличии зон пониженной механической прочности, вдоль которых происходят как горизонтальные, так и вертикальные перемещения в пределах земной коры и подкорового пространства.

Из модели следует, что горизонтальная скорость смещения верхних частей разреза, по меньшей мере, в пределах земной коры, выше, чем скорость нижележащих. Таким образом, перемещение отдельных блоков в пределах земной коры подтверждает тезис о наличии в ее пределах тектонической расслоенности. Всего по литосферному разрезу можно выделить четыре уровня (границы) смещения литосферных слоев. Первая на глубинах в пределах 10 км, вторая – 20 км, третья – 40 км. Четвертая граница в пределах Амурской плиты прослеживается на глубинах 70-90 км. В литосферном слое Евразийской плиты, по сравнению с Амурской, четвертая граница раздела выделяется менее уверенно и расположена в интервале глубин от 70 до 110 км (рис. 3).

Верификация статической комплексной модели выполнена путем сопоставления расчетных (модельных) данных по плотности горных пород вдоль линии разреза с генерализованными петроплотностными данными [Малышев и др., 2001]. Совпадение трендов в распределении плотности вдоль профиля увеличивают достоверность построенной статической глубинной модели.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

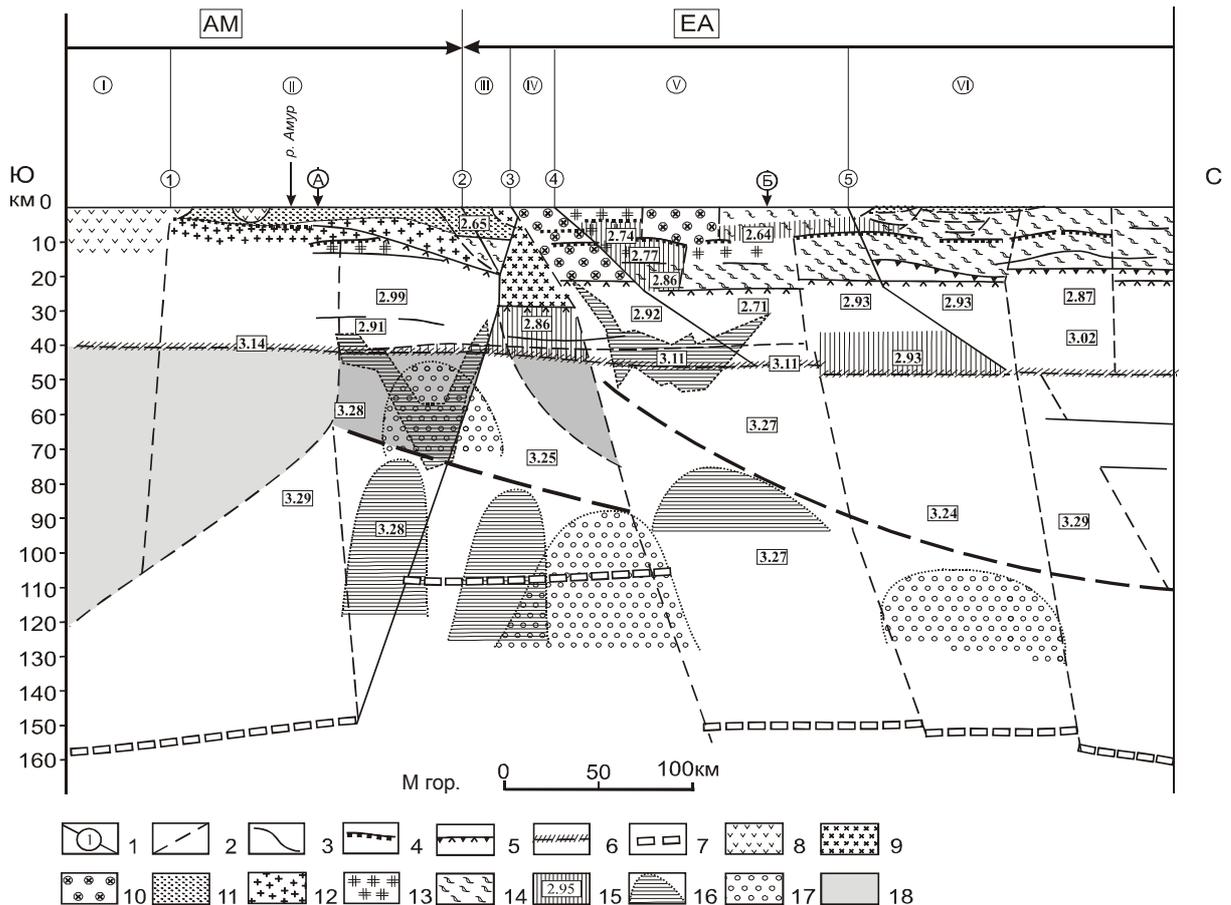


Рис. 3. Геолого-геофизический разрез сочленения литосферных плит.

Структурные элементы: 1 – разломы земной коры (1 – Дербуган, 2 – Южно-Тукурингрский, 3 – Северо-Тукурингрский, 4 – Желтулакский, 5 – Становой); 2 – предполагаемые разломы земной коры и верхней мантии; 3 – основные горизонтальные границы раздела (в пределах верхней части земной коры – литологические, в нижней коре и в верхней мантии – фазовые); 4 – граница смены реологических свойств коры; 5 – граница между верхней и нижней корой, установленная по комплексу признаков; 6 – подошва коры; 7 – подошва литосферы. Литологические элементы: 8 – раннемеловые вулканиты; 9 – триас-позднеюрские граниты; 10 – позднеюрские граниты; 11 – юрские осадочные образования различной степени литификации; 12 – позднепротерозойские граниты; 13 – раннепротерозойские граниты; 14 – раннеархейские метаморфические комплексы; 15-18 – геофизические элементы: 15 – области с относительно пониженной плотностью литосферы (цифры – расчетные значения), 16 – области повышенной геоэлектрической проводимости, 17 – области потери сейсмических границ обмена волн (данные МОВЗ), 18 – блоки литосферы с повышенной скоростью прохождения продольных волн (сейсмотографические данные). Интенсивность цвета соответствует увеличению скорости в процентном отношении. Остальные условные на предыдущих рисунках.

Для слоев рассматриваемой модели фактором напряжений и последующих деформаций литосферы, с последующими возможными горизонтальными перемещениями, является в первую очередь изменение мощности всего литосферного слоя. Вертикальная составляющая напряжений и последующих перемещений формируется в результате квазистатического равновесия композиции блоков литосферы относительно астеносферного слоя верхней мантии. Помимо этого, определенное влияние на деформацию литосферного слоя оказывают, по-

видимому, конвективные потоки мантийного вещества, способствующие перемещению литосферных плит и/или континентов [Трубицын, Рыков, 2000; Лобковский и др., 2004]. В нашем исследовании этот силовой фактор выступает в качестве региональной составляющей, определяющей возможные горизонтальные перемещения литосферных блоков более высокого порядка. Векторы смещений литосферных блоков первого порядка (Евразийская и Амурская литосферные плиты), в системе ITRF-97 (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>) под доста-

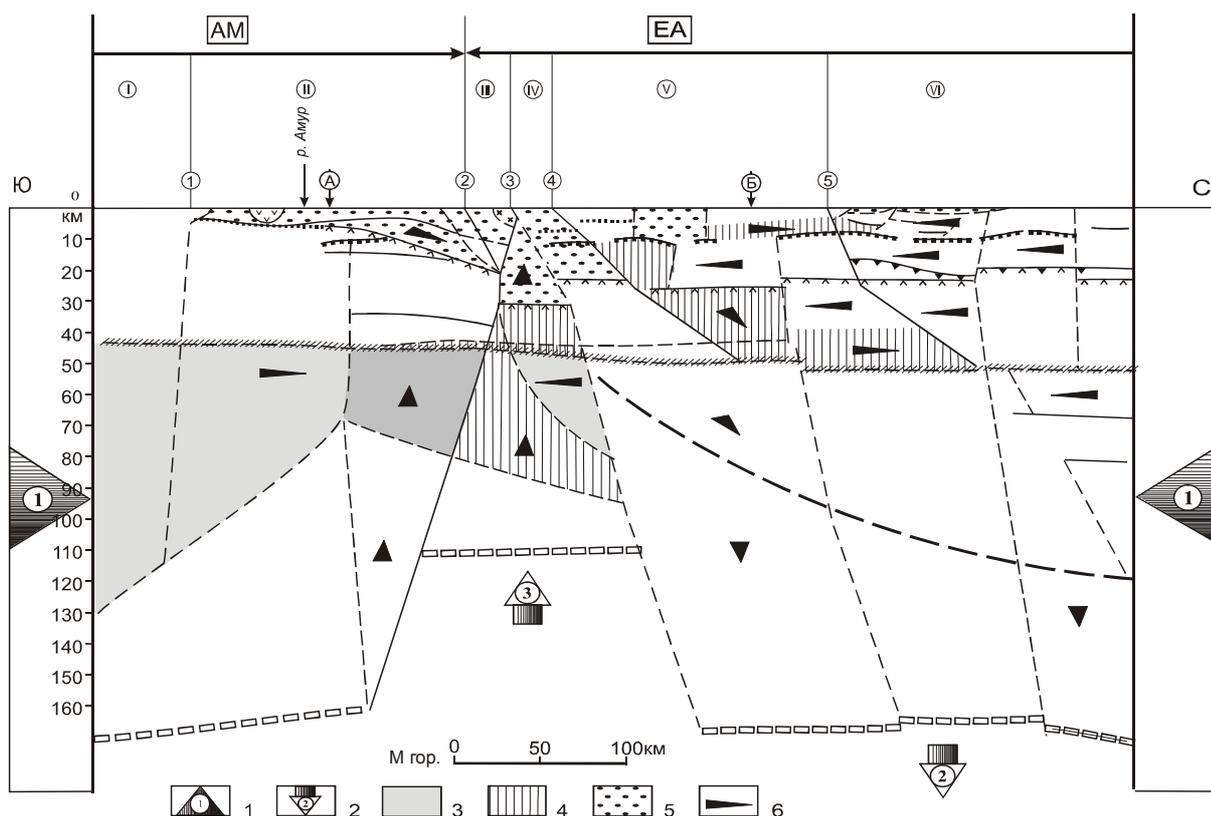


Рис. 4. Двухмерная кинематическая слоисто-блоковая модель напряженного состояния литосферы.

Региональные напряжения литосферы, обусловленные геометрическими параметрами, собственной реологией и реологией литосферы: 1 – горизонтальная составляющая, 2 – вертикальная составляющая. Современные локальные напряжения блоков литосферы: 3 – состояние сжатия (сейсмотомографические данные), 4 – состояние растяжения (расчетные плотностные характеристики); 5 – области палеонапряжений, обусловленные внедрением и флюидным режимом позднепалеозойских и мезозойских магматических тел; 6 – направления перемещения блоков. Остальные условные на предыдущих рисунках.

точно острым углом направлены навстречу друг другу, что должно приводить к дополнительному тектоническому напряжению.

На основании модельных параметров (рис. 2, 3) построена схема возможных распределений векторов напряжений, и она отражает вероятную кинематику литосферных блоков вне временного фактора. Иными словами – кинематические характеристики глубинной модели несут информацию как о современном напряженно-деформированном состоянии среды, так и о возможных палеонапряжениях. На основании геометрии блоков, образующих литосферный слой, а также с учетом эффективных геофизических параметров разреза, составлена кинематическая схема, позволяющая сделать вывод о направлениях и возможных перемещениях глубинных тектонических объектов (рис. 4). Из схемы следует, что фрагменты Евразийской плиты должны погружаться относи-

тельно Амурской с перемещением в южном направлении. В этом случае блоки Амурской плиты находятся в состоянии относительного вертикального покоя и/или незначительного подъема с перемещением по горизонтали в северном направлении. Область, разделяющая разнонаправленные движения, находится в интервале между Северо-Тукурингским и Джелтулакским разломами, наклонена в северном направлении и имеет пониженные величины эффективных значений плотности и электрического сопротивления (рис. 3, 4). Привлечение данных по современным вертикальным перемещениям земной коры [Карта..., 1989] позволяет в первом приближении выделить современную кинематическую составляющую литосферных блоков (рис. 5).

Проверка предложенного модельного решения мгновенной кинематики литосферных блоков выполнена на полученных независимым способом данных о напряженно-деформированном состоя-

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

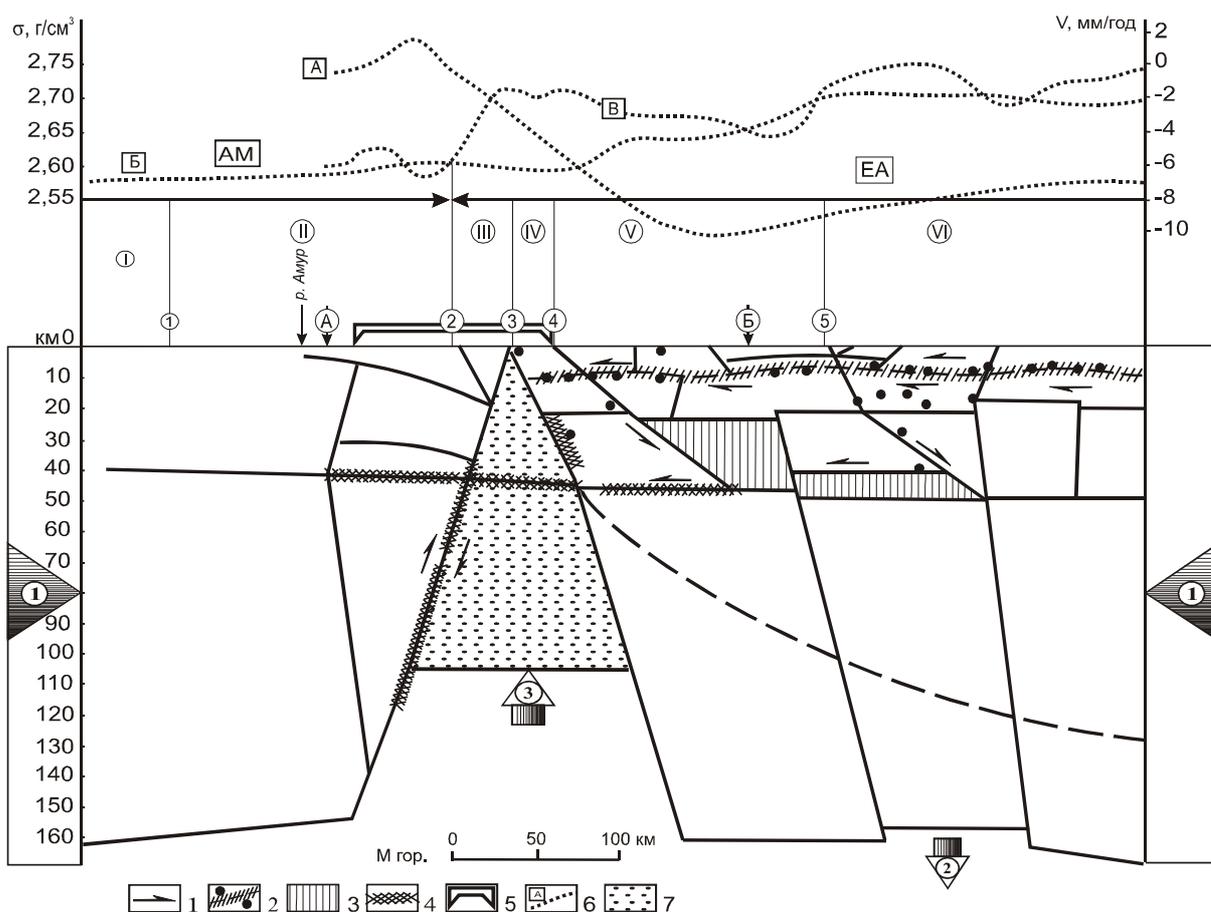


Рис. 5. Двухмерная модель современного геодинамического состояния литосферы.

1 – направления перемещения блоков. Области и зоны аномальных геофизических параметров: 2 – преимущественное развитие гипоцентров землетрясений, 3 – пониженная плотность, 4 – повышенная электрическая проводимость; 5 – область сжатия со сдвигом (геологические данные); 6 – кривые распределения: А – скорость вертикальных перемещений земной поверхности (геодезические данные), Б – плотность горных пород на земной поверхности (петрофизические данные), В – расчетные значения плотности горных пород в верхнем слое плотностной глубинной модели; 7 – область максимального сжатия литосферы. Остальные условные на предыдущих рисунках.

нии верхней части литосферы [Шерман, Лунина, 2001; Семинский, 2001; Имаев и др., 2003]. Область сжатия со сдвигом соответствует интервалу нашей модели от Джелтулакского до Южно-Тукурингского разлома и в целом отвечает сокращенной мощности литосферы. Признаком, подтверждающим горизонтальные перемещения в верхней части земной коры, является наличие линейной зоны гипоцентров землетрясений. Модельное распределение напряжений также соответствует установленным параметрам напряжений в очагах землетрясений (рис. 5, 6).

Таким образом, на основании того, что плиты находятся в состоянии перманентного перемещения и деформации, и это явление фиксируется инструментальными геодезическими измерениями, с учетом поверхностных геоло-

гических данных и, исходя из модельных построений, можно сделать вывод, что в настоящий момент существует подвиг Евразийской плиты под Амурскую плиту либо надвиг последней на Евразийскую.

Палеогеодинамическая модель как одна из разновидностей ретроспективной модели составлена, исходя из представлений о том, что геологические события раннемезозойской эпохи являются основополагающими для формирования структуры Восточной и Центральной Азии. Считается, что в это время произошло столкновение Сибирского и Сино-Корейского континентов, которое сопровождалось закрытием Монголо-Охотского (не позднее средней юры) палеоокеанического бассейна [Парфенов и др., 2003; Кириллова, 2005].

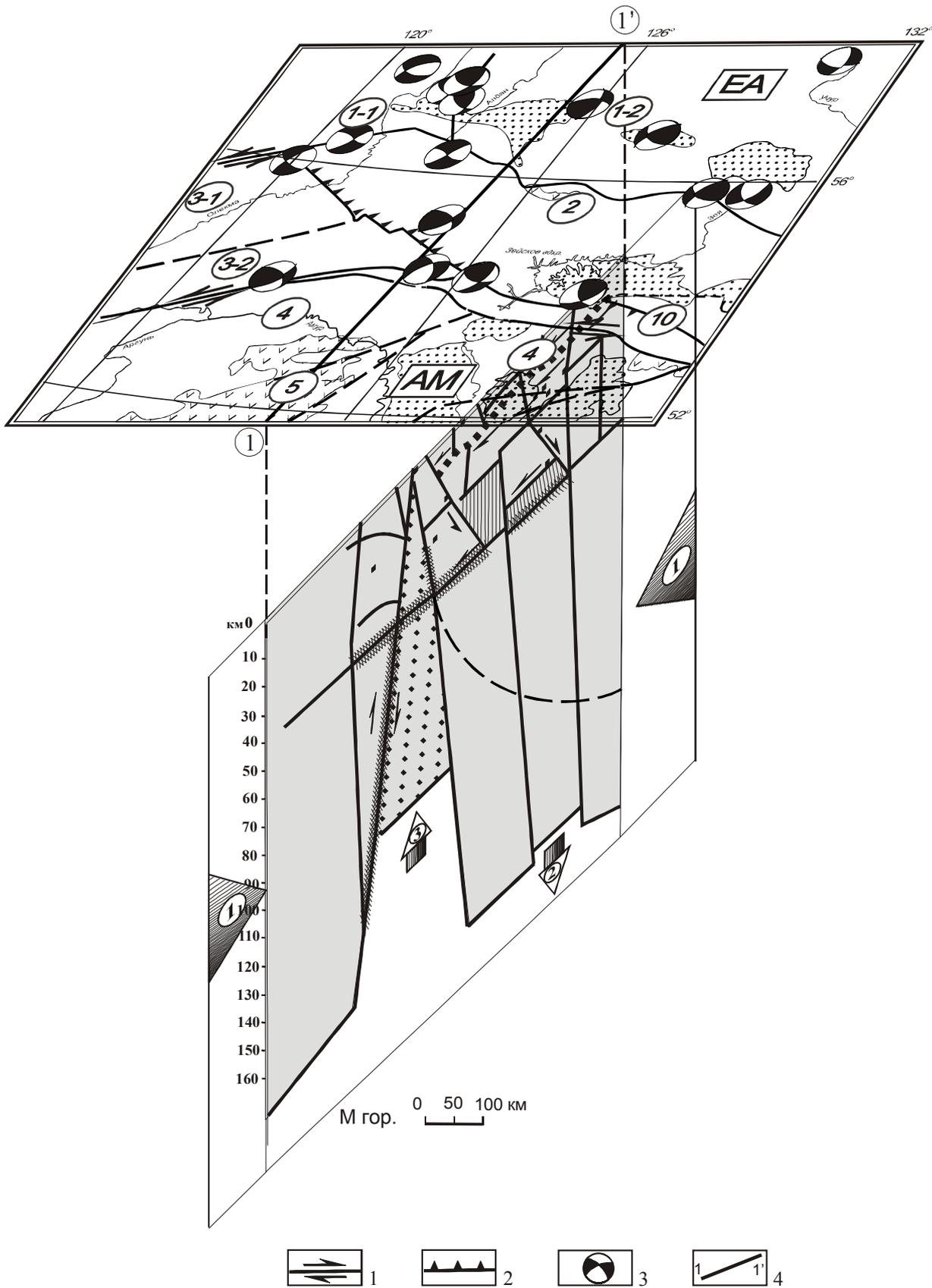


Рис. 6. Трехмерная геодинамическая модель литосферы области сочленения литосферных плит. Тектонические нарушения на земной поверхности: 1 – сдвиги, 2 – надвиги; 3 – фокальные механизмы очагов землетрясений (белый цвет – область действия напряжений сжатия, черный – растяжения), 4 – линия исследуемого профиля. Остальные условные на предыдущих рисунках.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

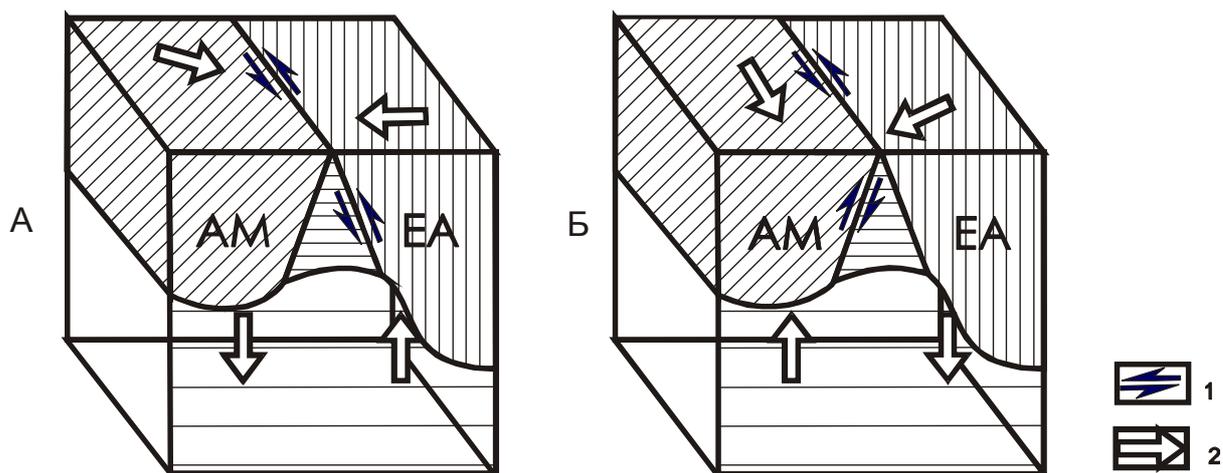


Рис. 7. Принципиальная схема тектонического режима плит.

А – начальный этап процесса коллизии, Б – постколлизийный (деформационный) этап. Направление перемещений вдоль поверхностных и глубинных границ Амурской (АМ) и Евразийской (ЕА) плит: 1 – сбросо-сдвиговые перемещения, 2 – вертикальные и горизонтальные перемещения.

Предлагаемая палеогеодинамическая модель становления границы сочленения двух плит, а также ее дальнейшая эволюция основана на результатах статической и геодинамической интерпретации рассматриваемого разреза. Из статической модели (рис. 3) следует, что, исходя из различной ориентировки падения глубинных границ раздела (разломов), непосредственно в пределах области столкновения литосферных плит, погружение их могло происходить как в северном, так и в южном направлениях. Разная направленность погружения литосферных плит может быть обусловлена как преобладанием этих направлений от палеосубдукционных зон, обусловленных закрытием Монголо-Охотского океана [Сорокин и др., 2005], так и различной скоростью схождения плит. О различной скорости сближения литосферных плит свидетельствуют результаты палеомагнитных исследований по среднеюрским осадочным комплексам Чульманской (Евразийская плита) и Буреинской (Амурская плита) впадин и осадочных бассейнов Северо-Китайской плиты [Бретштейн и др., 2006]. С учетом острого угла столкновения плит (косая коллизия), наличия вращения Северо-Азиатского кратона [Колесов, 2003] и последующего уменьшения этого угла, ведущую роль в глубинном структурообразовании на завершающей стадии становления границы сближения двух плит мы отдаем процессу погружения Амурской плиты под Евразийскую. В пользу подобной интерпретации свидетельствует боль-

шая мощность Евразийской плиты, ее относительно пониженная пластичность, сохранившаяся и до настоящего времени (наличие в ее юго-восточной части обширного поля сейсмичности) [Имаев и др., 2003].

На основании структуры статической и кинематической моделей (рис. 3, 4, 5) можно сделать вывод о том, что на последующих, более поздних стадиях коллизийного тектонического развития происходили интенсивные встречные плитные перемещения. Тогда же широкое распространение получили внутрилитосферные перемещения, осложнённые интенсивным постколлизийным мезозойским и частично кайнозойским магматизмом. [Геологическая..., 1999; Сорокин, 2004]. Разновозрастные магматические тела внедрения, хотя и в локальном плане, меняли картину силового деформационного поля. Их глубинным следом, в пределах изучаемого разреза, являются блоки с относительно пониженными значениями плотности (рис. 3). Весьма вероятным результатом подобного сценария развития встречных плитных перемещений является наличие разнонаправленных наклонных границ в верхней, наиболее хрупкой части земной коры (Северо-Турурингский разлом, разлом южного обрамления Чульманской впадины).

Постколлизийные деформации литосферы при схождении плит происходили в дискретном режиме. Скорее всего, причина подобного явления заключается в смене во времени преобладающего направления приложения тек-

тонических сил. Дискретность режима схождения плит может быть также обусловлена изменением скорости перемещения плит относительно друг друга. Ею же обусловлен процесс смены знака вертикальных перемещений (инверсия движений) блоков литосферы. О подобном сценарии – дискретности в процессе эволюции коллизионной границы – свидетельствует и ряд геологических признаков: инверсия в осадконакоплении в сопредельных районах Амурской плиты (Амуро-Зейская впадина), наличие общей поверхности пенеплена вплоть до конца плейстоцена [Варнавский, 1999; Геологическая..., 1999].

Определенным подтверждением такой интерпретации служат независимые инструментальные наблюдения. Так, в настоящее время происходит поддвиг Евразийской плиты под Амурскую либо надвиг последней. Следовательно, с момента начала становления коллизионной границы и до настоящего времени существовала, как минимум, одна инверсионная фаза – смена направлений горизонтальных и вертикальных перемещений блоков литосферы. Выход на земную поверхность в северной части изучаемого профиля более древних и более плотных горных пород [Малышев и др., 2001] в определенной степени подтверждает предложенный вариант интерпретации. Подобное распределение горных пород является следствием режима палеовоздымания исследуемой территории с соответствующим уровнем эрозии, а в настоящее время обширные участки земной поверхности находятся в стадии относительного погружения (рис. 5). Обобщенная модель интерпретационных выводов по режиму дискретности при коллизии литосферных плит приведена в виде схемы на рис. 7.

В процессе эволюции литосферы происходит изменение ее толщины. Возможным механизмом наращивания мощности (вертикаль-

ная аккреция) исследуемого слоя при наших палеогеодинамических реконструкциях является процесс эклогитизации нижнекорового и/или верхнемантийного вещества. Такого рода процессы фазового перехода в ряду габбро-гранулит-эклогит и шпинель-перовскит с их эндотермической природой известны по результатам экспериментальной петрологии [Артюшков, 1993; Лобковский и др., 2004]. Подобный механизм используется для объяснения геологических особенностей формирования земной коры в зоне перехода континент-океан [Филатова, 2004] и привлечен нами для объяснения процесса формирования литосферы. Основываясь на серии наших предыдущих построений (рис. 2-6), мы объединили два ранее отдельно рассматриваемых процесса – горизонтальных перемещений и вертикальной аккреции – в рамках одной модели. Задавая определенное, относительно фиксированное время от периода, предшествующего закрытию Монголо-Охотского океана и начала формирования границы сближения двух плит, до современного состояния, был построен трехмерный эволюционный модельный ряд состояний области сочленения литосферных плит (рис. 8). Рисунок с индексом T_0 в схематическом виде отображает современное, состояние границы схождения плит. Направления вертикальных перемещений соответствуют современным геодезическим наблюдениям. Направления векторов горизонтальных перемещений плит показаны на основании данных мировой сети постоянных пунктов GPS-измерений в системе ITRF-97. Угол схождения плит не превышает 10° , скорость схождения примерно равна 3 мм/год. Рисунок с индексом T_4 мы, с учетом установленных геохронологических фактов, относим к раннему мезозою. Остальные рисунки с индексами T_3 , T_2 , T_1 являются промежуточными меж-

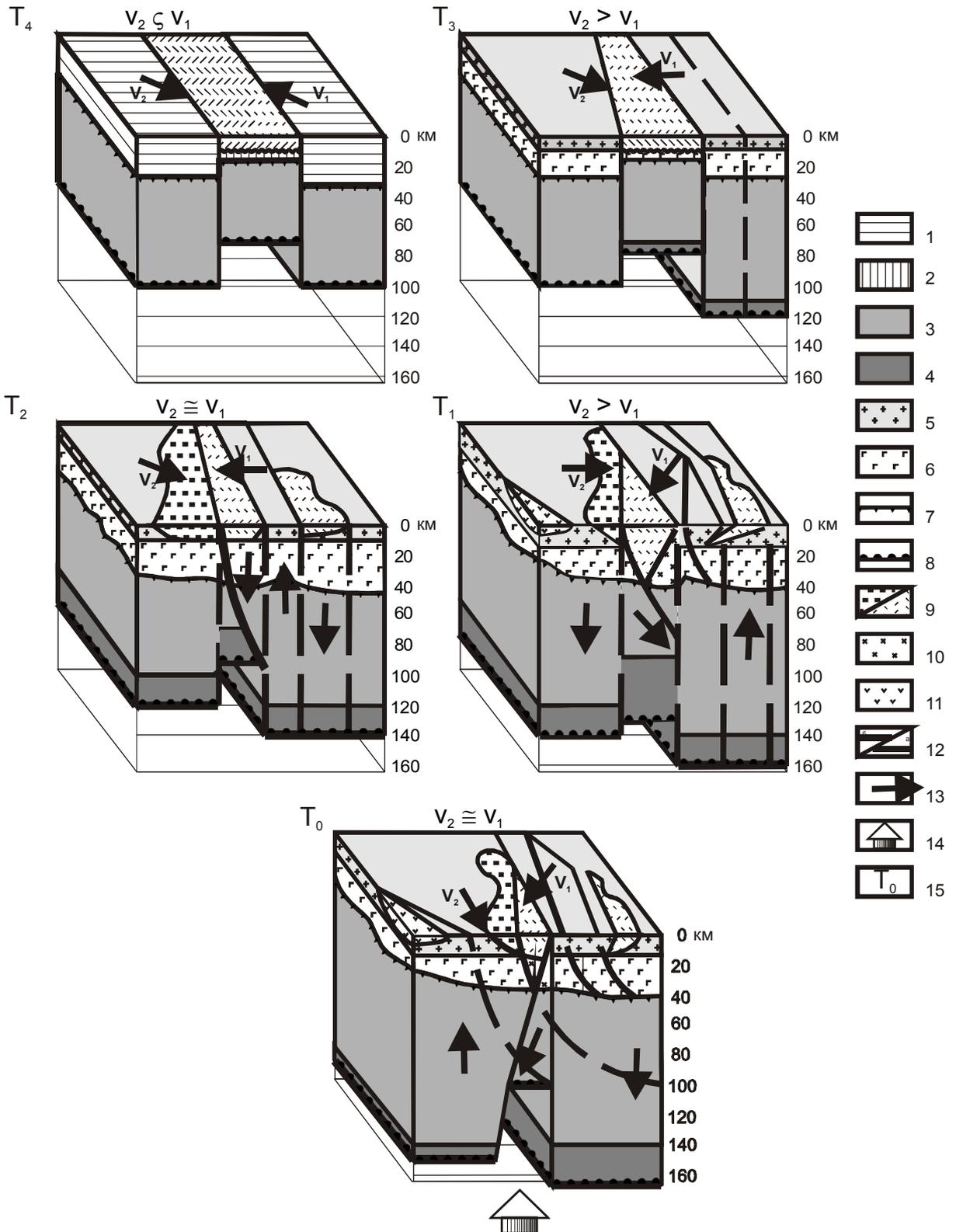
Рис. 8. Трехмерная палеогеодинамическая реконструкция эволюции литосферы области сочленения литосферных плит.

Структура литосферы: 1 – первоначальная кора континентального типа, 2 – первоначальная кора океанского типа, 3 – первичное мантийное вещество, 4 – новообразованное мантийное (литосферное) вещество; слои земной коры: 5 – «гранитный», 6 – «базальтовый»; глубинные границы: 7 – подошвы земной коры, 8 – подошвы литосферы; литологические разновидности: 9 – юрские осадочные породы различной степени литификации; 10 – мезозойско-кайнозойские гранитоидные комплексы; 11 – мезозойские вулканы; 12 – разломы: а) установленные, б) предполагаемые внутрилитосферные; а и б сделать крупнее и в б сделать в линии разрыв 13 – направление перемещений литосферных блоков, V_1 и V_2 – горизонтальные скорости перемещения Евразийской и Амурской плит, соответственно; 14 – направление максимального термомеханического воздействия астеносферного вещества на литосферный слой; 15 – временные маркеры эволюции литосферы в области сочленения литосферных плит. Состояние модели: T_0 моложе T_1 , T_1 моложе T_2 и т.д.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

ду указанными выше временными реперами. Изменение скорости сближения плит, которое обозначено общепринятыми математическими символами, обусловлено различными этапами формирования границы сближения – предколлизийным, коллизийным и постколлизийным.

Тенденция наращивания вертикальной мощности литосферного слоя в ретроспективной модели («старение» литосферы) в какой-то мере подобна тренду уменьшения мощности литосферного слоя в широтном направлении области перехода континент-океан в пределах востока Азии.



В этом же направлении происходит омоложение тектонических структур. В частности, подобная закономерность характерна для осадочных бассейнов как в пределах континентальной части литосферы, так и в акватории окраинных морей – Охотского и Японского. Для корректировки модели и отождествления ее с конкретным геологическим временем необходимы дополнительные геолого-геохронологические исследования.

Заключение

В результате проведенного исследования уточнена трехмерная модель литосферы Дальневосточного региона и построена глубинная геолого-геофизическая модель области сочленения двух литосферных плит – Амурской и Евразийской. Структурные и вещественные параметры модели позволили провести ее геодинамическую интерпретацию, составить схему кинематики литосферных слоев и слагающих их блоков. На основании комплексной модели составлена схема кинематики современного напряженно-деформированного состояния литосферы и выполнена её верификация. С учетом граничных условий, в качестве которых используются установленные геологические факты и расчетные скорости формирования мощности литосферы, предложена палеогеодинамическая модель формирования трансформной границы между Евразийской и Амурской литосферными плитами. Основные выводы проведенного исследования следующие:

1. Граница сочленения изучаемых литосферных плит является сложно построенной зоной с сокращенной до 100 км мощностью литосферного слоя. На земной поверхности область протягивается с юга на север от Южно-Туруингского разлома до Джелтулакского, в ее пределах существуют глубинные наклонные границы раздела с противоположными падениями.

2. Установлена слоистая неоднородная структура литосферы. Подобная структура является результатом внутриплитных деформаций и об этом свидетельствуют геофизические характеристики границ слоисто-блоковой модели, вдоль которых происходят горизонтальные и вертикальные перемещения как в земной коре, так в пределах подкорового пространства. Выявлено наличие 4-х уровней горизонтальных смещений.

3. Установлено, что в настоящий момент характер сочленения литосферных плит надви-

го-поддвиговый с падением границы сочленения на юг. Ранее со стороны Амурской плиты существовал подвиг под Евразийскую плиту либо надвиг последней на Амурскую. Наличие разнонаправленных наклонных границ в верхней, наиболее хрупкой, части земной коры служит свидетельством наличия прерывистости в процессе схождения двух плит и смены преобладающего направления приложения тектонических сил. Режим схождения и дальнейшая эволюция коллизионной области сочленения обусловлены некогерентным изменением параметров деформаций, в частности, изменением во времени скорости и направления перемещений контактирующих плит и слагающих их блоков.

4. С момента начала становления коллизионной границы и до настоящего времени существовала, как минимум, одна инверсионная фаза – смена направлений горизонтальных и вертикальных перемещений блоков литосферы.

*Работа выполнена в рамках проекта
ДВО РАН 06-1-ОНЗ-110.*

Список литературы

- Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
- Борукаев Ч.Б.* Справочник по современной тектонической терминологии. Новосибирск: Новосибирский госуниверситет, 1997. 36 с.
- Бретштейн Ю.С., Климова А.В., Кишко П.Ф.* Палеоширотная позиция терригенных комплексов Буреинского и Чульманского наложенных прогибов в юре // Тектоника, глубинное строение и минерогения Востока Азии. Мат-лы конф. V Косыгинские чтения. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2006. С. 12-15.
- Булин Н.К., Афанасьева Н.А., Проняева Е.А., Эрглис Е.И.* Глубинный разрез юго-востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления по сейсмологическим данным // Советская геология. 1972. № 10. С. 134-140.
- Варнавский В.Г.* Сравнительный событийный анализ эволюции Зее-Буреинской и Сунляя впадины // Геология и полезные ископаемые Приамурья. Хабаровск: Изд-во «Магеллан», 1999. С. 15-20.
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В.* Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3-20.
- Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий масштаба 1 : 2 500 000. Объяснительная записка. С.-Петербург – Благовещенск – Харбин, 1999. 135 с.
- Егоров А.С., Гурьев Г.А., Зотова И.Ф. и др.* Геолого-геофизическая и геодинамическая модели литосферы по линии геотраверса Рубцовск-мыс Невель-

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

- ского // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 143-151.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Золотов Е.Е., Ракитов В.А.* Структура литосферы Приамурья по данным МОВЗ-ГСЗ // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 236-240.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н.В.* Тектоника плит Байкальской горной области и Станового хребта // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 3. С. 669-672.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. и др.* Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеанская геология, 2003. Т. 22. № 6. С. 55-61.
- Иноземцев А.Г., Маслов И.А.* Гидро-кинематический механизм возмущений Земли // Внутреннее ядро Земли. Геофизическая информация о процессах в ядре. Тез. докл. М.: ИФЗ РАН, 2000, С. 85.
- Каплун В.Б.* Геоэлектрический разрез литосферы профиля Джалинда-Нагорный по результатам магнитотеллурических зондирований юры // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. Мат-лы конф. V Косыгинские чтения. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2006. С. 93-96
- Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1 : 5 000 000 / ред. Л.А. Кашин. М.: ГУГК СССР, 1989.
- Кириллова Г.Л.* Позднемезозойские-кайнозойские осадочные бассейны континентальной окраины юго-восточной России: геодинамическая эволюция, угле- и нефтегазоносность // Геотектоника, 2005. № 5. С. 62-82.
- Колесов Е.В.* Палеотектоническая эволюция Северо-Восточного региона России по палеомагнитным данным // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Мат-лы всерос. совещ. Т. 1. Магадан, 2003. С. 101-103
- Косыгин Ю.А.* Тектоника. М.: Недра, 1983. 536 с.
- Леви К.Г., Лысак С.Е.* Температурная эволюция и мощность литосферы континентов // Основные проблемы сейсмотектоники. М.: Наука, 1986. С. 69-78.
- Летников Ф.А., Леви К.Г.* Зрелость литосферы и природа астеносферного слоя // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. № 5. С. 1201-1204.
- Лобковский А.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
- Лойтер П.П., Мальшев Ю.Ф.* Магнитные разрезы земной коры Дальнего Востока // Третий всесоюзный съезд по геомагнетизму. Тез. докл. Киев, 1986. С. 37-38.
- Мальшев Ю.Ф., Манилов Ф.И., Романовский Н.П., Гурович В.Г.* Плотностные срезы литосферы области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии. Мат-лы конф. III Косыгинские чтения. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН. 2001. С. 108-120.
- Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы Тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1995. 199 с.
- Объяснительная записка к тектонической карте Дальнего Востока и сопредельных районов (на формационной основе) масштаба 1 : 2 000 000. Хабаровск: ИТИГ ДВНЦ АН СССР, 1984. 56 с.
- Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона масштаба 1 : 2 500 000 / Отв. редакторы: Н.А. Богданов, В.Е. Хаин. М.: ИЛОВМ РАН, 2000. 193 с.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др.* Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7-41.
- Подгорный В.Я., Мальшев Ю.Ф.* Плотностной разрез литосферы Алдано-Станового щита // Тихоокеанская геология, 2005. Т. 24, № 3. С. 3-21.
- Семинский К.Ж.* Тектонофизические закономерности деструкции литосферы на примере Гималайской зоны сжатия // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 6. С. 17-30.
- Сорокин А.А., Ярмолюк В.В., Котов А.Б. и др.* Геохронология триасово-юрских гранитоидов южного обрамления Монголо-Охотского складчатого пояса и проблема раннемезозойского гранитообразования Центральной и Восточной Азии // Докл. РАН. 2004. Т. 399. № 2. С. 227-231.
- Сорокин А.А., Котов А.Б., Кудряшов Н.М. и др.* Позднепалеозойский Урушинский магматический комплекс южного обрамления Монголо-Охотского пояса (Приамурье): возраст и геодинамическая позиция // Петрология. 2005. Т. 13. № 6. С. 654-570.
- Талтыкин Ю.В., Каплун В.Б., Швалова Ю.П., Григорица Т.В.* Предварительные результаты магнитотеллурических исследований в Становой области // Тихоокеанская геология. 1986. № 5. С. 105-109.
- Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. Объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1 : 1 500 000. Хабаровск-Владивосток: ДВО РАН, 2005. 264 с.
- Трубицын В.П., Рыков В.В.* Мантийная конвекция с плавающими континентами: Мат-лы теоретического семинара ОГПТГН РАН. М.: ГЕОС, 2000. С. 7-30.
- Физические свойства горных пород Дальнего Востока. Ч. 1, 2. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 382 с.
- Филатова Н.И.* Андерплейтинг как причина образования вулканической континентальной окраины при окраинноморском спрединге // Докл. РАН. 2004. Т. 398. № 2. С. 223-227.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
- Шевченко Б.Ф.* Глубинная структура и кинематика литосферы зоны перехода континент-океан (Охотское и Японское моря) // Строение, геодинами-

ка и металлогения Охотского региона и прилегающих частей северо-запада Тихоокеанской плиты. Мат-лы междунар. науч. симпоз. . Т. 1. Южно-Сахалинск, 2002. С. 141-145.

Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 5. С. 672-674.

Tectonic map of Central Asian and Pacific Regions in the junction area. Scale 1 : 1 500 000. Compiled by L.P. Karsakov and Zhao-Chunjing. Khabarovsk-Shenyang, 2002.

Van der Hilst P.-D., Engdahl E.R., Spankman W. Tomographic inversion of P and pP data for aspherical mantle structure below the Northwest Pacific region // Geophys. J. Intern. 1993. V. 115. № 3. P. 264-310.

Рецензент член.-корр. РАН Е.В. Складов