

УДК 550.312+550.34.06.013.2

ОТРАЖЕНИЕ КАЙНОЗОЙСКОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ В СОВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЗАПАДА США

© 2008 Т.В. Романюк

*Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
123995 Москва, Б. Грузинская 10; e-mail: romanyuk@ifz.ru, t.romanyuk@mail.ru*

В статье приводится краткое (схематичное) описание цепочки главных кайнозойских геодинамических событий на западной окраине Северо-Американского континента, сопровождавших преобразование конвергентной окраины в трансформную и внесших подавляющий вклад в современный облик тектонических провинций западной трети США. На основе обобщения большого количества разнообразных данных построена комплексная тектоно-геолого-геофизическая модель вдоль профиля «W-USA», секущего контрастные структуры литосферы западной части США, связанные как с восходящими, так и нисходящими мантийными потоками. Результаты выполненного сейсмо-плотностного моделирования по профилю «W-USA» свидетельствуют о том, что верхне-мантийные аномалии, пересекаемые профилем, не могут иметь чисто термальную природу, в их генезисе важная роль принадлежит петролого-метаморфическим преобразованиям (включая частичное плавление).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы методами сейсмической томографии во многих регионах мира обнаружены средне и мелко-масштабные неоднородности в литосферной мантии. Чаще всего низкоскоростные аномалии интерпретируются как более горячие, а высокоскоростные аномалии – как более холодные области в мантии. В частности, под западной частью США (рис. 1а, на 4 стр. обложки) закартировано множество скоростных аномалий (Dueker et al., 2001), некоторые из которых хорошо коррелируются с областями позднекайнозойской тектоно-магматической активизации и ассоциируются с восходящими горячими астеносферными потоками. Например, низкоскоростные аномалии обнаружены под рифтом Рио-Гранде и следом Йеллустонской горячей точки. Напротив, под горами Сьерра-Невада и под областью Поперечных хребтов, закартированы области с повышенными сейсмическими скоростями, которые связываются с процессом деляминации литосферной мантии из-под этих регионов.

В результате обобщения и интерпретации разномасштабных и разнородных геолого-геофизических данных по строению коры и верхней мантии для запада США (Camilleri, Chamberlain, 1997; Constenius et al., 2000; Dueker

et al., 2001; Flidner et al., 2000; Fuis, 1998; Gilbert et al., 2003; Godfrey, Klempner, 1998; Park, Wernicke, 2003, Prodehl, Lipman, 1989; Zandt et al., 1995, 2004) автором был построен сводный геолого-геофизический разрез по профилю «W-USA» (рис. 5а, на 4 стр. обложки), секущий наиболее яркие сейсмические детали региона и демонстрирующий все главные особенности переходной зоны от Тихого океана к внутренним платформенным областям Северо-Американского континента. Структура и геофизические параметры литосферы регионов, пересекаемых профилем, – это в значительной степени результат кайнозойских геодинамических событий. Выполненное сейсмо-плотностное моделирование вдоль профиля свидетельствует о значительной роли нетемпературных факторов в происхождении сейсмо-плотностных аномалий, в их генезисе наряду с термальными эффектами важную роль играют композиционно-петрохимические факторы.

ОБЩИЕ ТЕКТОНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О КАЙНОЗОЙСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

В настоящее время Запад Северной Америки представляет собой широкую тектонически активную зону перехода от Тихого океана к

стабильному древнему кратоническому ядру Северо-Американского континента (рис. 2а). Запад США является одним из наиболее изученных по тектоно-геолого-геофизическим данным регионом мира, а в позднемезозойской-кайнозойской геодинамической эволюции региона надежно расшифрованы различные этапы и события.

Современная геодинамическая обстановка и главные тектонические провинции запада США

Региональные сейсмо-томографические модели (Dieker et al., 2001) выявили высокоскоростной литосферный «корень» до глубин 300 км под внутренними платформенными областями Северной Америки, однако под западной окраиной США верхняя мантия характеризуется в среднем пониженными на 3-4 % значениями сейсмических скоростей. Вместе с повышенным тепловым потоком и широкими проявлениями кайнозойского магматизма (Armstrong, Ward, 1991) это свидетельствует о современном активизированном состоянии значительной части верхней мантии. Аномальный характер мантии региона отражается в планетарном характере аномалий поля силы тяжести (рис. 1б, на 4 стр. обложки).

В настоящее время западная окраина Северной Америки подразделяется на две части (рис. 2б). Севернее мыса Мендосино плита Хуан де Фука субдуцируется под окраину континента. Южнее мыса Мендосино, по окраине континента проходит трансформная граница между Северо-Американской и Тихоокеанской плитами, маркируемая системой разломов Сан Андреас, которая постепенно преобразуется в рифтинговую зону в Калифорнийском заливе, а затем и в активный океанический хребет (Восточно-Тихоокеанское поднятие). На широте устья Калифорнийского залива располагается южное окончание безсубдукционной части побережья Северной Америки. Южнее микро-плита Ривейра медленно пододвигается под континентальную окраину.

Из наиболее крупных тектоно-морфоструктурных провинций на западе США (рис. 2а) можно выделить следующие: Провинция Бассейнов и Хребтов (провинция пост-эоценового растяжения), горы Сьерра-Невада (реликт батолита мезозойской вулканической дуги), Великая Долина (преддуговой бассейн), Плато Колорадо, Скалистые горы, Плато Колумбия (миоцен-плиоценовые базальты), Высокие Каскады (современный вулканический надсубдукционный комплекс) и др. Современный облик тектоно-морфологических провинций западной окраины Северной Америки – это результат длинного ряда тектонических и магматических событий, уходящего своими корнями в глубокий докембрий. Но кайнозойские события, и главным образом взаимодействие окраины Северо-Американского континента с океаническим палео-хребтом, оказали определяющее влияние на



Рис. 2. Схема тектонических элементов и тектоно-геоморфологических провинций (черные линии - границы провинций) западной части США и положение профиля «W-USA» (а). Составлена автором по материалам работ (Allen et al., 2000; Bohannon, Geist, 1998; Dumitru et al., 1991; Unruh, Twiss, 1998 и др.) Современные движения плит. Жирные черные стрелки – векторы абсолютных скоростей плит, пары тонких черных стрелок показывают направления взаимных относительных движений на границах плит (б). МТ – Точка Мендосино – область тройного сочленения плит. ЗГДФ – западная граница докембрийского фундамента. Точечным растром показаны области, для которых доказано коровое пост-эоценовое растяжение. Расшифровка остальных сокращений приведена в подписи к рис. 1.

современную структуру и геофизические параметры литосферы запада США (Engebreston et al., 1984; Humphreys et al., 2003; Wernicke et al., 1987).

Литосфера запада США характеризуется ярко выраженными литосферными аномалиями (Couch and Riddihough, 1989). Глубина залегания подошвы коры (граница М) варьирует от 25 до 60 км. Скоростные параметры консолидированной коры также чрезвычайно изменчивы. Например, кора под бассейном Денвер имеет почти 30 километровую мощность верхнего («гранитного») низкоскоростного слоя коры, 20 километровую мощность среднего слоя коры и полное отсутствие высокоскоростного («базальтового») слоя под ними. Блок Высоких Каскад около границы США и Канады на всю мощность коры характеризуется скоростями, свойственными обычно средней коре, при отсутствии «гранитного» и «базальтового» слоев. Самая большая мощность высокоскоростного слоя нижней коры фиксируется в Скалистых горах. Кора Великой Долины по своим характеристикам не соответствует параметрам континентальной коры: мощная толща осадков (до 12 км в центральной

Рис. 3. Схема основных тектонических кайнозойских событий в центральном сегменте западной окраины Северной Америки. Составлена автором с использованием материалов работ (Humphreys et al., 2003; Saleeby et al., 2003; Wells et al., 2000; Zandt et al., 2004 и др.). Вертикальный масштаб – приблизительный, вертикальное преувеличение ~ 7:1.

В конце мезозоя-начале кайнозоя под западную окраину континента субдуцировалась плита Фараллон, вулканическая дуга располагалась в Сьерре-Неваде, а деформации в задуговой области концентрировались в складчато-надвиговом поясе Севиер (а).

Приблизительно 80 млн. лет назад началось выполаживание зоны субдукции, надсубдукционный магматизм в Сьерре-Неваде прекратился, локус деформаций переместился на восток вглубь континента, где началось формирование пояса Ларамийских поднятий (б). Приблизительно 42 млн. лет назад произошло разрушение слэба плиты Фараллон, отрыв от верхней части плиты и обрушение в мантию его фрагмента с образованием «дырки в слэбе» (в).

Впоследствии, большая часть окраины континента была подвержена постэоценовому растяжению, главным проявлением которого стало формирование Провинции Бассейнов и Хребтов (г, д, е).

Приблизительно 30 млн. лет назад «столкновение» океанического хребта и субдукционной зоны, начало процесса преобразования плитовой границы из конвергентной в трансформную, раскрытие «окна в слэбе», заложение разломной сдвиговой зоны Сан Андреас (рис. 4а) (з).

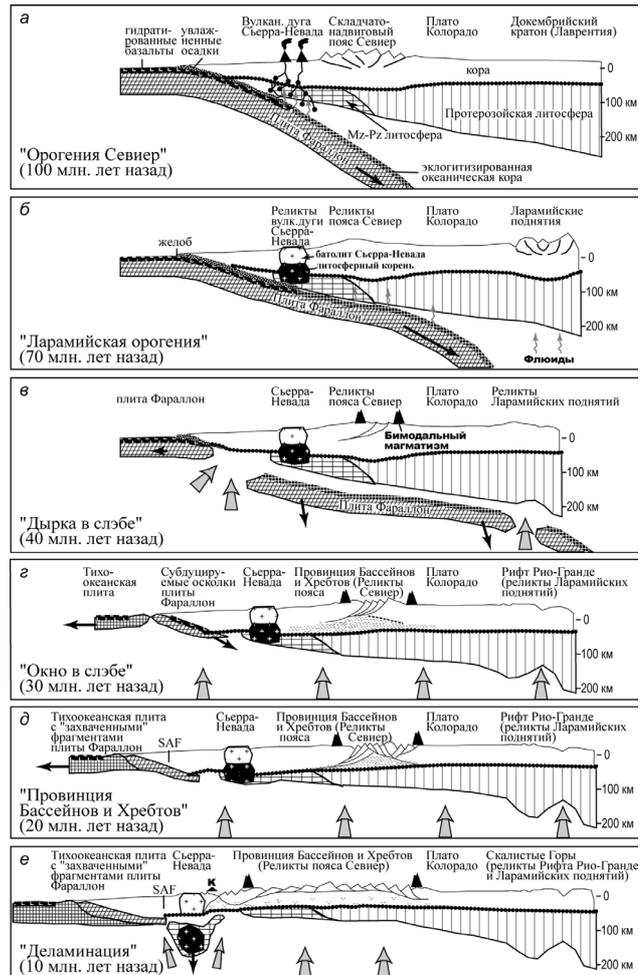
Разрастание «окна в слэбе» (рис. 4б), прогрев литосферы прибрежных областей, основная фаза растяжения в Большом Бассейне (рис. 4в) (д).

Начало деламинирования литосферного корня батолита Сьерры-Невады. К– высококалийные магмы (е).

части осадочного бассейна) располагается на высокоскоростном теле (~7.0 км/с), которое интерпретируется как реликт фрагмента океанической коры (офиолит) (Godfrey, Klempereger, 1998). В наиболее активных регионах, например, в крайней юго-западной части Большого Бассейна поверхность раздела литосфера-астеносфера поднимается к подошве коры (Park et al., 1996).

Кайнозойская геодинамическая эволюция

В начале мезозоя домезозойский остов Северной Америки являлся краевой частью позднепалеозойско-раннемезозойского суперконтинента Пангея, в юрское время откололся от Пангеи и затем дрейфовал на запад. Дрейф континента сопровождался субдукцией океанической литосферы восточной окраины Тихого океана (плита Фараллон) под его западную окраину и сближением континента с палео-океаническим хребтом (частью которого является Восточно-Тихоокеанское поднятие) (Engelbreton, 1984). В конце мезозоя-начале кайнозоя к западной окраине континента аккретировались тектонически и метаморфически переработанные террейны, океанические острова, плато и т.п. В период (150 – 80) млн. лет при нормальных углах суб-



дукции плиты Фараллон, вулканическая дуга в центральном сегменте окраины располагалась в Сьерре-Неваде, а деформации в задуговой области концентрировались в непосредственной близости от дуги, образуя складчато-надвиговой пояс Севиер (рис. 3а) (Camilleri, Chamberlain, 1997).

Впоследствии мезозойские аккреционные структуры были переработаны в результате активных магматических и тектонических событий. Однако реликты мезозойской вулканической дуги в настоящее время широко экспонируются вдоль всей окраины Северной Америки. Это батолиты Берегового и Межгорного поясов (Канада), Айдахо, Сьерра-Невада, Полуостровной провинции и Калифорнийского полуострова (Мексика).

Приблизительно 80 млн. лет назад в центральном сегменте окраины континента началось выполаживание зоны субдукции, при этом надсубдукционный магматизм в Сьерре-Неваде прекратился (Dumitru, 1990), а локус деформаций переместился на восток вглубь континента, где началось формирование пояса Ларамийских поднятий (рис. 3б). В южной части континента между Ларамийским поясом и поясом Севиер остался стабильный блок Плато Колорадо. Пик тектоно-

магматической активности этого этапа пришелся на время приблизительно 60-70 млн. лет назад, этот период особо выделяется как Ларамийская фаза орогенеза.

Плитотектонические реконструкции северо-восточного сектора Тихого океана по магнитным аномалиям и системе горячих точек (Engebreston et al., 1985; Stock, Molnar, 1988) свидетельствуют об очень высоких конвергентных скоростях (до ~15 см/год) между плитами Фараллон и Северной Америкой в интервале между 80 и 43 млн. лет назад при одновременном постоянном западном дрейфе Северной Америки, что привело в результате к сближению срединно-океанического Тихоокеанского палео-хребта и Северо-Американского континента. Численное моделирование показывает, что сближение континента и активного океанического хребта в конце концов неминуемо приводит к разрушению субдуцируемого слэба (Трубицын, 2000; 2005).

И, действительно, приблизительно 42 млн. лет назад произошло почти мгновенное (по геологическим меркам) резкое изменение в направлении движения всех плит в Тихоокеанском секторе, включая и Тихоокеанскую плиту относительно системы горячих точек, маркируемое изгибом Гавайско-Императорской цепи подводных гор (Stoddard, Wainright, 1983). С этого же момента скорость конвергенции между океанической плитой Фараллон и Северной Америкой начала резко падать. Главной причиной глобальной перестройки было разрушение слэба плиты Фараллон, отрыв от верхней части плиты и обрушение в мантию его фрагмента с образованием «дырки в слэбе» (рис. 3*б*) (Humphreys et al., 2003)

Современные глобальные сейсмо-томографические модели показывают обширную низкоскоростную аномалию под юго-западной частью Северо-Американского континента в интервале глубин до 300 км, а на глубинах более 1000 км распознается высокоскоростное вертикальное тело, которое интерпретируется как реликт слэба плиты Фараллон (Grand et al., 2004; Van der Lee, Nolet, 1997). Детальные региональные сейсмические исследования под северо-западной окраиной в зоне современной субдукции плиты Хуан де Фука также обнаружили высокоскоростные области мантии, которые интерпретируются, как аккрецированные к подошве континентальной литосферы небольшие фрагменты палеоплиты Фараллон (Benz et al., 1992).

По пространственно-временным проявлениям магматизма область «слома слэба» простиралась приблизительно от острова Ванкувер, где в то время располагался хребет, разделяющий плиты Кула и Фараллон, до современного Калифорнийского залива (в то время его еще не было) (Humphreys, 1995). С появлением «дырки в слэбе» и кратковременным относительным движением

плиты Фараллон из-под континента сразу же после обрушения слэба связывается мафический магматизм и рифтинг на оregonской окраине в период 42-18 млн лет назад (Романюк и др., 2001). Затухание магматической активности в период 18-9 млн. лет назад (Поздние Западные Каскады) и миграция вулканического фронта на восток (Verplank, Duncan, 1987) коррелирует с возобновлением субдукции и проникновением края нового слэба вглубь мантии (Романюк и др., 2001).

«Слом слэба» не изменил конвергентного характера взаимодействия Северо-Американского континента и океанической плиты Фараллон, поэтому сближение океанического хребта и континента продолжалось. Тем временем «дырка в слэбе» увеличивалась, оттягивая часть горячих восходящих мантийных потоков на себя, а продолжающий дрейфовать на запад континент своим краем постепенно «наехал» на эту активизированную область, а затем и на горячий корень бывшего океанического хребта, в результате чего в кайнозой активизировалась тектоно-магматическая активность на окраине континента (Wernicke et al., 1987).

Таким образом, с момента «слома слэба» 42 млн. лет назад началось изменение тектонического режима в целом на западной трети Северной Америки (Engebreston et al., 1984; Humphreys et al., 2003), где возросла магматическая активность (Armstrong, Ward, 1991), глобальное сжатие коры (рис. 3*а-в*) постепенно сменилось глобальным поднятием и растяжением коры (рис. 3*г-е*), наиболее существенным проявлением которого стало, впоследствии, формирование Провинции Бассейнов и Хребтов (Dickinson, 2002; Wernicke, 1981).

Область постэоценового растяжения на западной окраине Северной Америки захватывает огромное пространство (рис. 2*а*). Она включает Северную (часто Северную Провинцию Бассейнов и Хребтов называют Большой Бассейн), Центральную и Южную Провинции Бассейнов и Хребтов, рифт Рио-Гранде, шельфовые области Южной Калифорнии, отдельные грабены в северных Скалистых горах и др. Говоря другими словами, растяжение захватило широкую полосу континентальной окраины, в которой остались незатронутыми отдельные стабильные блоки, самые крупные из которых Плато Колорадо и Сьерра-Невада с Великой Долиной. Наиболее изученным регионом растяжения является Большой Бассейн, для которого построены схемы миграции вулканизма из центра к периферии, проведены датировки принципиальных стадий (Wells et al., 2000) и построены сбалансированные кинематические модели (Malavieille, Taboada, 1991). Первые признаки растяжения в Большом Бассейне —

появление полуграбенов - датируется ~40 млн. лет назад (рис. 3в); в период 30-20 млн. лет назад происходил подъем и растяжение коры (верхней коры - в хрупкой моде, нижней коры - в вязкой или пластической моде) и вынос метаморфических комплексов средней коры к поверхности (метаморфические ядра калифорнийского типа) (рис. 3г-д); 10 - 5 млн. лет назад на заключительном этапе растяжения деформационная и вулканическая активность проявлялась преимущественно по периферии Большого Бассейна (рис. 3е).

Около 30 млн. лет назад ряд сегментов срединно-океанического палеохребта приблизились вплотную к субдукционной зоне в районе Южной Калифорнии. С этого момента процессы, вызванные взаимодействием океанического хребта с краем континента, определяют тектонические процессы на юго-западной окраине Северной Америки. «Столкновение» океанического хребта и субдукционной зоны положило начало процессу изменения характера плитовой границы из конвергентной в трансформную (рис. 4). Плита Фараллон раскололась на две части (плиты Хуан де Фука и Кокос; впоследствии от плиты Кокос откололись микроплиты Монтеррей, Ривейра и др.) и в точке раскола образовались две точки тройного сочленения плит - Мендосино и Ривейра, которые начали мигрировать в противоположных направлениях вдоль окраины континента. Севернее точки Мендосино и южнее точки Ривейра субдукция частей плиты Фараллон продолжалась (и продолжается до сих пор). Между этими точками начался процесс образования «окна в слэбе» и заложения системы разломов Сан Андреас, по которой

происходила и происходит в настоящее время релаксация относительных горизонтальных перемещений Северо-Американской и Тихоокеанской плит (Atwater, 1970; Bohannon, Parson, 1995). Под воздействием раскрывающегося «окна в слэбе», начался прогрев литосферы прибрежных областей. Примерно 17 млн. лет назад под влияние горячих астеносферных потоков, проникавших через «астеносферное окно в слэбе» под континентальную окраину, попала литосфера южного окончания Сьерры-Невады, которая представляла собой конструкцию из легкого гранитоидного батолита, подстилаемого плотным мафическим, а местами и ультрамафическим корнем, сформированную в поздне меловое время на поздних стадиях функционирования вулканической дуги над зоной субдукции плиты Фараллон (Ducea, 2002; Ducea, Saleeby, 1998; Saleeby et al., 2003). На инверсионной плотностной границе (холодная тяжелая литосфера на горячей легкой астеносфере), которая представляет собой гравитационно-неустойчивую систему, при подходящих температурах, вязкостях и плотностном контрасте может сформироваться даунвеллинг (Houseman et al., 2000; Houseman, Molnar, 1997; Jull, Keleman, 2001; Neil, Houseman, 1999), т.е. обрушение тяжелого литосферного корня, сопровождающееся затягиванием в нисходящий поток литосферных фрагментов из соседних и вышерасположенных областей и подъемом замещающего горячего астеносферного вещества по периферии даунвеллинга (рис. 3е). Анализ многочисленных миоцен-четвертичных коровых и мантийных ксенолитов дает прямые доказательства изменения состава литосферы под Сьеррой-

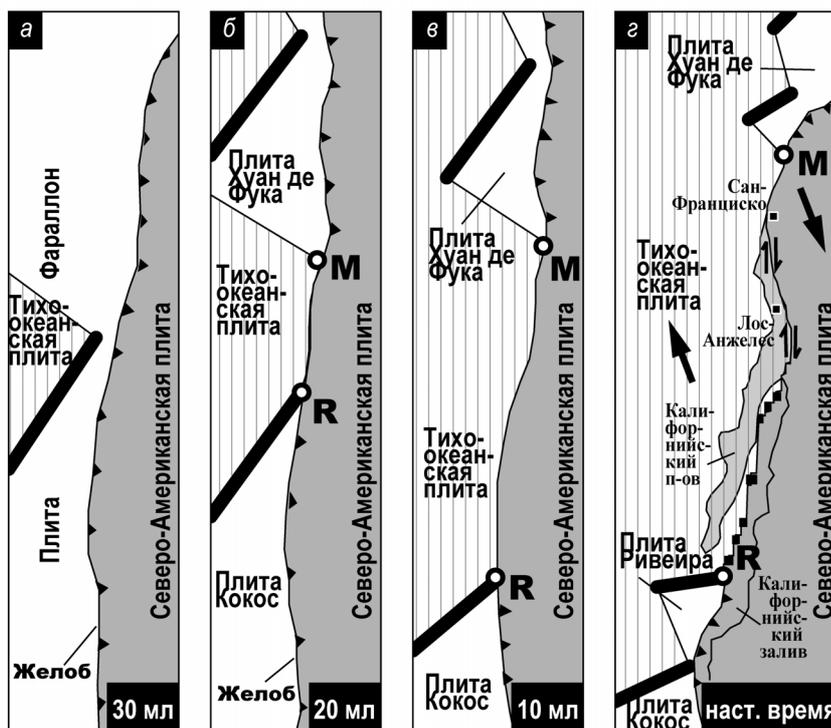


Рис. 4. Реконструкции раскрытия «окна в слэбе» (бессубдукционное пространство между тройными точками сочленения плит Мендосино (М) и Ривейра (R)) на моменты времени 30 (а), 20 (б), 10 (в) млн. лет назад и современная конфигурация плит (г) по (Atwater, 1970) с модификациями. Тихоокеанская плита показана вертикальной штриховкой, Северо-Американская плита – серой заливкой. Жирные черные линии – срединговые хребты, тонкие линии – трансформные разломы и разлом Сан Андреас. Зоны субдукции маркированы треугольниками. На (г) серым тоном в пределах Тихоокеанской плиты показаны блоки континентальной коры Северо-Американского континента, «захваченные» Тихоокеанской плитой. Жирными стрелками показаны направления движений Тихоокеанской и Северо-Американской плит, тонкими стрелками – движения по разлому Сан Андреас.

Невадой в период от 10 до 3 млн. назад (Ducea, 2002). Начальная фаза деляминации, маркируемая импульсом высоко-калиевого вулканизма, датируется возрастом 3-4 млн. лет назад (Farmer et al., 2002; Mantly et al., 2000).

ОТРАЖЕНИЕ КАЙНОЗОЙСКИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В СОВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ «W-USA»

Начало профиля «W-USA» длиной более 2000 км расположено в абиссальной котловине Тихого океана с глубиной воды ~4 км, далее профиль пересекает континентальный шельф с морскими осадочными бассейнами. На суше профиль пересекает разнообразные тектонические провинции и блоки: прибрежный аллохтонный блок Салинас (по которому в настоящее время проходит разлом Сан Андреас), Великую Долину, горы Сьерра-Невада, провинцию Бассейнов и Хребтов, Плато Колорадо и Скалистые горы. Заканчивается профиль в платформенной части континента (Великие Равнины), которая тектонически стабильна как минимум с позднего протерозоя. Профиль пересекает мантийный нисходящий поток под горами Сьерры-Невады (структура которого к настоящему времени довольно хорошо изучена методом сейсмической томографии), область под Большим Бассейном, которая находится под воздействием поднимающегося астеносферного горячего материала, и холодный докембрийский литосферный киль Северо-Американской платформы.

Структура коры вдоль профиля представлена чрезвычайно контрастными структурами. Океаническая кора (базальты+габбро) с мощностью около 5-6 км прослеживается под шельф континента до разлома Сан Андреас. В шельфовой области на широте профиля над океанической корой располагаются преимущественно субдукционные комплексы в различной степени метаморфизованных осадков. Шельфовые и береговые блоки утоненной коры сменяются глубоким осадочным бассейном Великой Долины, где осадки мощностью 5-6 км в осевой части залегают на породах основного (ультра-основного?) состава. Под батолитом Сьерра-Невады мощность коры увеличивается до 45-50 км и резко уменьшается под Большим Бассейном до 30 км. В коре трассируются протяженные наклонные detachments, разделяющие сильно тектонизированную (повернутые блоки) верхнюю кору, где деформации носили преимущественно хрупкий характер, от нижних горизонтов коры, где преобладали вязкие и/или пластические течения. В соседней провинции Плато Колорадо, напротив, наблюдается хорошо выдержанная горизонтальная

слоистая структура в верхней коре, кора всего блока утолщена до 40-45 км. Коровая структура восточной части профиля (Плато Колорадо, Скалистые горы и Великие Равнины) гораздо менее изучена сейсмическими исследованиями, чем западная часть, блоковая структура коры и мантии здесь в значительной степени условна.

В структуре коры Великой Долины и западной части Большого Бассейна обнаруживаются многочисленные наклонные границы и тела с повышенными сейсмическими скоростями, происхождение которых связывается с аккреционными фанерозойскими событиями (Constenius et al., 2000). В частности, высокоскоростные наклонные тела интерпретируются как реликты фрагментов коры океанического или суб-океанического происхождения (Godfrey, Klempere, 1998).

Ниже приводятся краткие тектоно-геологические комментарии по некоторым крупным тектоно-геоморфологическим провинциям, пересекаемым профилем (с запада на восток):

Великая Долина и Сьерра-Невада представляют собой реликты преддугового бассейна и вулканической дуги, сформировавшихся в мезозое при субдукции палеоплиты Фараллон под западную окраину Северо-Американского континента. Великая Долина в течение всего кайнозоя (и в настоящее время) оставалась осадочным бассейном. Фундамент Сьерры-Невады представлен преимущественно позднемеловыми (~85 млн. лет) и более старыми гранитоидами и разнообразными метаморфическими породами. Блок Сьерра-Невада характеризуется выдержанными сейсмическими скоростями около 6.0 км/с, практически не увеличивающимися даже в нижних частях коры (<6.2 км/с), поэтому весь этот коровый блок трактуется как гранитный батолит (Fliedner et al., 2000). Под южной частью Сьерры-Невады на глубинах от ~70 до ~250 км картируется высокоскоростная область. Она близка по форме к цилиндру с радиусом около 60 км, получила название «мантийная капля» (mantle drip) и трактуется как нисходящий мантийный поток, содержащий фрагменты деляминированной нижней коры и литосферной мантии как из-под южной части гор Сьерра-Невада, так и из-под юго-западной части Большого Бассейна (Boyd et al., 2004; Jones et al., 2004; Zandt, 2003; Zandt et al., 2004).

Большой Бассейн представляет собой закономерное чередование Хребтов и Долин (осадочных бассейнов), образовавшихся вследствие растяжения верхней коры региона в хрупкой моде. В восточной части Большого Бассейна распознаны реликты мелового складчато-надвигового пояса Севиер, до эпизода растяжения характеризовавшегося утолщенной корой как минимум до 50-60 км. В настоящее время кора Большого Бассейна как в его западной, так и в восточной частях утонена до

25-30 км. На подошве коры (граница М) не выявлено крупных структурных нарушений (вариаций глубины залегания), что объясняют вязко-пластическим характером кайнозойских (включая современные) деформаций в нижней коре и верхней мантии. Пониженные на 6-8% сейсмические скорости Р-волн (Humphreys, Dueker, 1994a) и S-волн (Grand, 1987), аномально низкие групповые скорости волн Рэлея и высокие коэффициенты поглощения сейсмической энергии, прослеживаемые вплоть до 300 км глубины под Большим Бассейном, вместе с наблюдаемым повышенным тепловым потоком, высоким рельефом и др. данными позволили (Humphreys, Dueker, 1994b) проинтерпретировать мантию в этом регионе как очень разогретую и близкую к плавлению или даже с небольшими долями расплавов (деплетированная мантия, рис. 5б, область 3). Линия ($Sr_1=0.706$ – первичное отношение изотопов стронция $^{87}Sr/^{86}Sr$), маркирующая контуры докембрийской западной окраины Северо-Американского кратона, на широте профиля

проходит в крайней западной части Большого Бассейна. Мантия, к западу от этой линии полагается преимущественно океанической (рис. 5б, область 1), а к востоку – преимущественно континентальной.

Плато Колорадо представляет собой относительно стабильный блок, практически не затронутый ни доэоценовыми деформациями сжатия, ни постэоценовыми деформациями растяжения. Современная толщина коры плато Колорадо составляет 45 км (Zandt et al., 1995). Вместе с оценками мощности эродированного материала и величины тектонического воздымания блока (Dumitru et al., 1994) это дает оценки мощности коры в Ларамийскую фазу тектогенеза не менее 50 км. Предполагается, что доларамийская кора пассивной окраины была нормальной толщины (~30 км), а затем была утолщена в течение Север-Ларамийских деформаций за счет внутрикоровых течений (McQuarrie, Chase, 2000). Бирд (Bird, 1979) полагал, что континентальная литосфера из-под Плато Колорадо была полностью удалена в

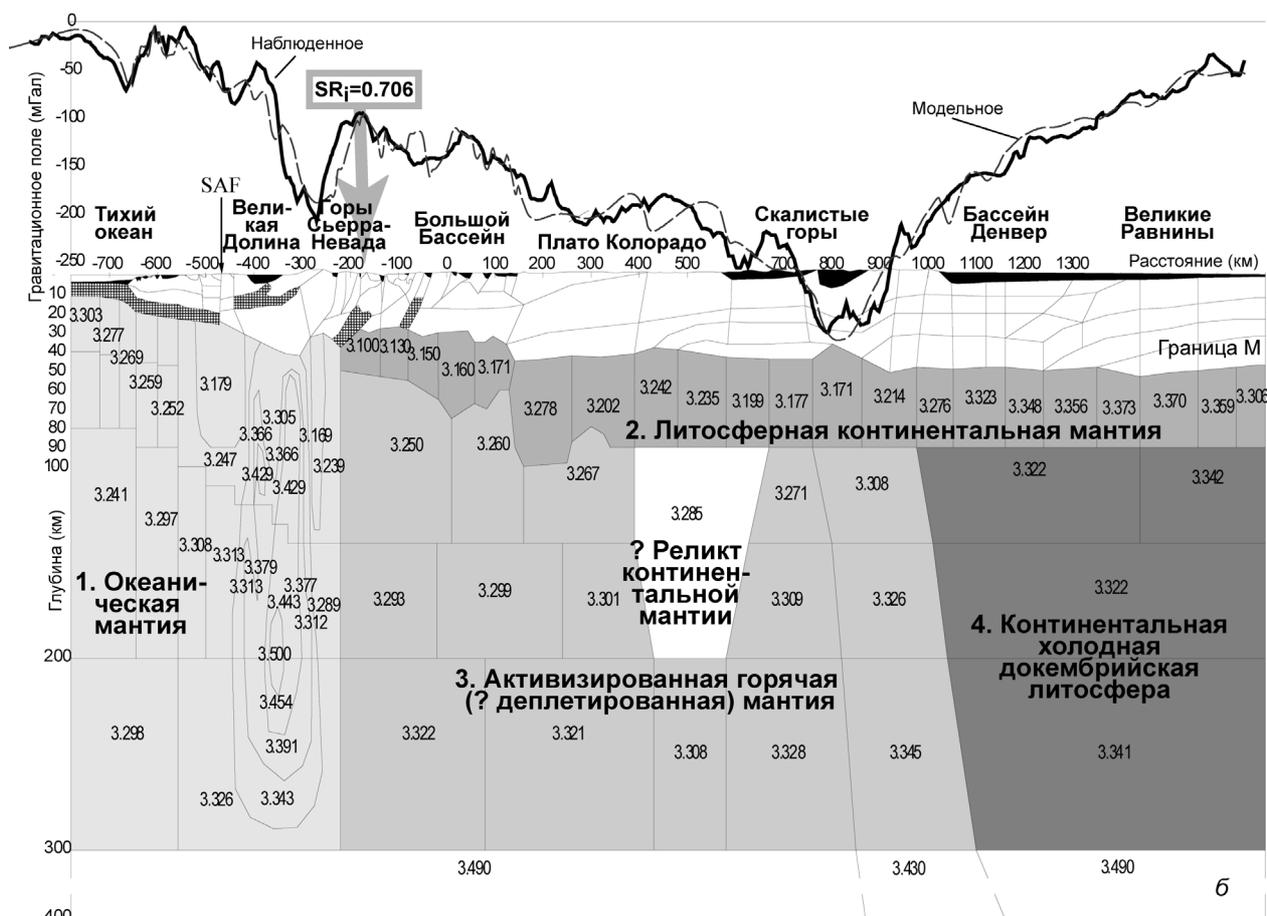


Рис.5 б. Плотностная модель для профиля «W-USA».

Цифры в блоках – плотности (г/см³). Черным цветом залиты осадочные бассейны, штриховкой показана современная океаническая кора и предполагаемые реликты аккрецированных офиолитов. Серая стрелка с надписью $Sr_1=0.706$ маркирует западный край докембрийского фундамента Северо-Американского континента. В мантии различной тоновой заливкой показаны области различной природы, для которых определялись зависимости скорость-плотность (рис. 6).

результате длительной пологой субдукции плиты Фараллон. Однако в работах (Lastowka et al., 2001; Livaccari, Perry, 1993; Zandt et al., 1995) приводятся геохимические и сейсмические данные, интерпретируемые как свидетельства того, что, по крайней мере, часть континентальной литосферы под плато Колорадо имеет доларамийский возраст. По сейсмическим данным под восточной частью Плато Колорадо выявляется область с относительно немного повышенными сейсмическими скоростями, которая трактуется как сохранившийся реликт докембрийской континентальной мантии.

Скалистые горы с северным окончанием рифта Рио-Гранде. Скалистые горы – это область Ларамийской складчатости, характеризующаяся в целом утолщенной корой и отсутствием выдержанных субгоризонтальных границ в коре (Prodehl, Lipman, 1989), южную часть которой в олигоцене «рассек» рифт Рио-Гранде (Basins ..., 1994). В северной части Ларамийского пояса (хребты Скалистых гор, некоторые из которых называются Ларамийские поднятия) в настоящее время экспонируются средне-коровые породы протерозойского возраста, палеоглубины метаморфизма которых оценены ~ (15–18) км (Read et al., 1999). В целом под Скалистыми горами сейсмические скорости в верхней мантии близки к нормальным – около 8.0 км/с, но в узкой зоне непосредственно под рифтом Рио-Гранде, сейсмические скорости понижены до 7.8 км/с (на широте профиля) и даже местами до 7.6 км/с в более южных широтах.

Осадочный бассейн Денвер и Великие Равнины. Кора этих регионов на широте профиля бедно освещена сейсмическими данными. Модель коры в этой части профиля в значительной степени условна. Однако глубокий (до 300 км) литосферный корень – верхняя мантия с относительно повышенными сейсмическими скоростями (рис. 5б, область 4) – надежно определен по данным сейсмической томографии.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПО ПРОФИЛЮ «W-USA»

Модель вдоль профиля (рис. 5а, на 4 стр. обложки, рис. 5б) описывается набором физических параметров: сейсмическая скорость, плотность, температура, а также представления о вещественном составе пород. Все эти параметры увязаны между собой и с наблюдаемым полем силы тяжести. Вариации сейсмических скоростей и плотностей в верхней мантии вызваны вариациями давления, температуры, минерального и химического состава, наличием расплавов и летучих компонент, и другими причинами, которые в конечном итоге отражаются в соотношении между скоростью и плотностью. Определение зависимостей сейсмическая Р-скорость–плотность для больших объемов

в мантии дает дополнительную информацию о природе верхнемантийных аномалий.

Геодинамическая интерпретация соотношения сейсмическая скорость – плотность в верхней мантии

Вариации верхнемантийных плотностей и сейсмических скоростей можно условно подразделить на вариации, обусловленные: (1) прямыми термальными эффектами доминирующего в настоящее время геодинамического процесса, (2) петро-геохимическими и/или метаморфическими преобразованиями, вызываемыми в настоящее время этим процессом, (3) термальными, петрологическими и другими эффектами, оставшимися от предыдущих тектонических событий.

Лабораторные эксперименты показали, что влияние температуры на сейсмические скорости в мантии гораздо сильнее при температуре, близкой к солидусу, нежели при пониженных температурах, значительно отличающихся от солидуса (Anderson, Baas, 1984; Duffy, Anderson, 1989; Sato et al., 1988, 1989; Sato, Sacks, 1989). В соответствии с этими оценками и данными (Christensen, Mooney, 1995) коэффициент $b = d\rho/dV_p \sim 0.04$ (г/см³)/(км/сек) вблизи солидуса, и $b \sim 0.18$ (г/см³)/(км/сек) далеко от солидуса.

С другой стороны, еще ранние классические работы Берча (Birch, 1961) по лабораторным измерениям на образцах показали, что коэффициент, связывающий скорость и плотность в породах с изменяющимся минеральным составом $b \sim 0.3$ (г/см³)/(км/сек), что заметно выше чисто термального эффекта. Формальная оценка $b = \Delta\rho/\Delta V_p$ (*in situ*) для перехода базальт–эклогит, который играет главную роль в преобразованиях тонущей (в субдукционных зонах) базальтовой коры (габбро: $V_p = 7.0$ км/сек, $\rho = 3.0$ г/см³; эклогит: $V_p = 8.5$ км/сек, $\rho = 3.5$ г/см³) также дает большие значения $b \sim (0.5 \text{ г/см}^3)/(1.5 \text{ км/сек}) \sim 0.33$ (г/см³)/(км/сек).

Формальная оценка $b = \Delta\rho/\Delta V_p$ для области тонущего плотного литосферного фрагмента под Сьеррой-Невадой, окруженного поднимающимся горячим астеносферным материалом, также дает величины, заметно выше оценок b для чисто термального процесса. Литосферный корень под батолитом должен иметь эклогитовую компоненту, в которой доминирует гранатовый пироксенит, начиная с глубин ~35–40 км. Остаточный пироксенит – очень плотная порода, благодаря своему обогащению гранатом до 50% от объема (для сравнения: типичные эклогиты субдукционного происхождения содержат всего около 15% граната) и высокому содержанию Fe. Измеренные плотности высокожелезистого гранатового пироксенита в ксенолитах в среднем на 0.15–0.25 г/см³ больше, чем плотности обычных мантийных перидотитов и достигают величин 3.6–3.75 г/см³ при нормальных

условиях (Lee et al; 2006) и, следовательно, 3.7-3.8 г/см³ при P-T условиях внутри «капли» (*in situ*). Если положить для астеносферного вещества: $V_p=7.6$ км/сек, $\rho=3.25$ г/см³; а для внутренних частей «мантийной капли»: $V_p=8.5$ км/сек, $\rho=3.75$ г/см³, то $b \sim (0.5 \text{ г/см}^3)/(0.9 \text{ км/сек})=0.55 \text{ (г/см}^3\text{)/(км/сек)}$.

Таким образом, если в первом приближении пренебречь влиянием наблюдаемого в целом для Земли нарастания T-P с глубиной на скорость и плотность по сравнению с аномальными вариациями, коэффициенту b в линейном соотношении $\rho=a+b \cdot V$ можно придать следующий обобщенный геодинамический смысл:

- $b \sim 0$ означает отсутствие аномальных плотностных вариаций (плотность в мантии = const), следовательно, нет никакого регулярного процесса, охватывающего весь моделируемый объем мантии и контролирующего одновременно и скорости, и плотности.

- Низкие значения коэффициента $b \sim (0.1-0.2) \text{ (г/см}^3\text{)/(км/сек)}$ могут соответствовать чисто термальному процессу, когда как скоростные, так и плотностные вариации создаются только температурными неоднородностями.

- Повышенные значения коэффициента $b > 0.3 \text{ (г/см}^3\text{)/(км/сек)}$ определенно подразумевают, что не только термальные, но и петрологические или метаморфические процессы играют

важную роль в современной скоростной и плотностной структуре верхней мантии.

Нерегулярные вариации скоростей и плотностей на фоне общей зависимости могут быть объяснены остаточными явлениями предшествующих тектонических событий.

Результаты сейсмо-плотностного моделирования по профилю «W-USA»

Данные сейсмической томографии выявляют контрастные скоростные аномалии до глубин 300-400 км, ниже мантия становится гораздо более однородной. Это позволяет предполагать, что большая часть источников гравитационных возмущений сосредоточена выше. Сейсмо-плотностное моделирование выполнялось с помощью алгоритма и программ, детально изложенных в (Romanyuk et al., 2007).

Хорошо известно, что инверсия гравитационных данных характеризуется очень сильной неоднозначностью и неустойчивостью. Отличительными чертами используемого подхода является то, что для повышения надежности и устойчивости решений используются априорные ограничения на плотности и требование скоррелированности значений плотностей и сейсмических скоростей в больших выделенных объемах верхней мантии. Плотности в отдельных верхнемантийных блоках могут не соответствовать реальности (в том числе и из-за двухмерной аппроксимации трехмерной

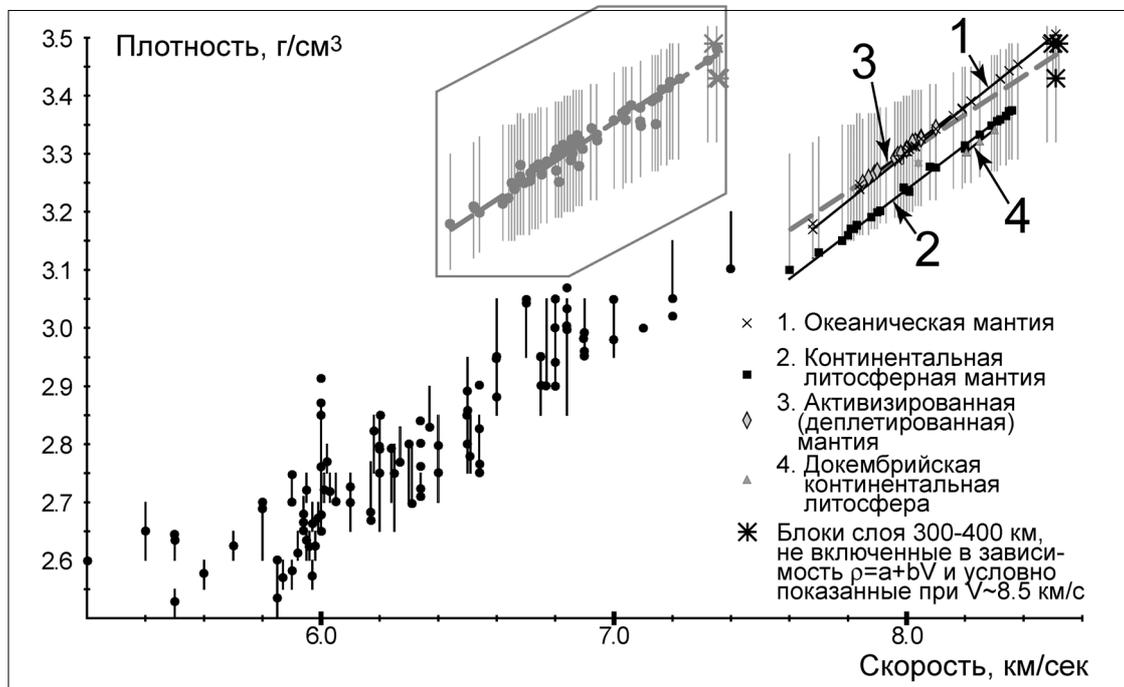


Рис. 6. Диаграмма плотность-скорость для оптимальной плотностной модели по профилю «W-USA». Каждый значок на диаграмме соответствует одному блоку модели, серые вертикальные полосы показывают допустимые пределы вариаций плотностей в каждом блоке модели. Линейные осредняющие зависимости $\rho=a+b \cdot V$ в мантии для 4 выбранных областей (см. рис. 5б) показаны черными линиями. На врезке дополнительно показаны плотности в мантийных блоках и осредняющая зависимость (серая пунктирная линия) для решения, в котором определялась единая для всей мантии зависимость $\rho=a+b \cdot V$ (повторена для сравнения на диаграмме для оптимального решения).

структуры, вследствие ошибок в определениях сейсмических границ, и т.п.), но коэффициенты связи между плотностью и сейсмической скоростью для больших объемов мантии с размерами в сотни километров определяются устойчиво.

На первом этапе проводились рекогносцировочные расчеты (Романюк, 2006) и определялась формальная единая для всего объема мантии линейная зависимость между плотностью и Р-скоростью $\rho = a + b \cdot V$. Для осредняющей зависимости был получен коэффициент $b = 0.334$ ($a = 0.652$), однако плотности в отдельных мантийных блоках модели довольно сильно отклоняются от осредняющей зависимости (рис. 6, врезка).

В следующем варианте расчетов (оптимальная модель) мантия была подразделена на 4 области (рис. 5б), в которых по косвенным данным подразумевается единообразный геодинамический процесс или обстановка и более или менее однородный состав вещества. В процессе моделирования для каждой из областей определялась своя отдельная зависимость скорость-плотность (рис. 6). В частности, для области «мантийной капли» получено значение b -коэффициента 0.407.

Центральная зона «мантийной капли» имеет в среднем положительный плотностной контраст ~ 0.15 г/см³ по отношению к окружающей ее «нормальной» (со скоростями ~ 8.0 км/с) мантии и ~ 0.25 г/см³ по отношению к окружающей «каплю» горячей астеносфере, то есть заметно ниже, чем это можно было бы ожидать при 100% гранато-пироксеновом составе «капли». Вместе с более низкими значениями абсолютных плотностей в центре «капли» по сравнению с прогнозируемыми при 100% гранатово-пироксенитовом составе это свидетельствует в пользу композитного состава «капли» и усложненного сценария литосферной деляминации.

Плотности ~ 3.1 - 3.2 г/см³ в блоках подкоровой литосферы по периферии капли (под прибрежными областями и границей между Провинцией Бассейнов и Хребтов и Сьеррой-Невадой), характеризующихся внедрением горячего астеносферного материала и пониженными сейсмическими скоростями ~ 7.6 км/с, получились гораздо ниже обычно принимаемых для разогретого астеносферного материала. Наиболее вероятная трактовка – наличие в этих блоках заметного количества расплавов и/или флюидов.

Результаты сейсмо-плотностного моделирования для всего профиля в целом (для всех 4 областей в верхней мантии) были получены высокие значения b -коэффициента: 0.407 ($a = 0.083$); 0.386 ($a = 0.210$); 0.384 ($a = 0.152$); 0.398 ($a = 0.035$), соответственно свидетельствуют о значительной роли нетемпературных факторов в происхождении сейсмо-плотностных аномалий, в их генезисе наряду с термальными эффектами важную роль

играют композиционно-петрохимические факторы. То есть движение вещества в верхней мантии как в нисходящих, так и в восходящих потоках сопровождается его преобразованиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкции кайнозойских геодинамических событий на западной окраине Северо-Американского континента, которыми сопровождалось преобразование окраины из конвергентной плитовой границы в трансформную, свидетельствуют о том, что огромные объемы вещества коры и мантии были тектонизированы и вовлечены в разнообразные движения. В частности, фиксируемые в настоящее время методами сейсмической томографии разно-масштабные и разнознаковые аномалии верхней мантии запада США являются в той или иной мере реликтами кайнозойских событий. Результаты выполненного сейсмо-плотностного моделирования по профилю «W-USA» свидетельствуют о том, что верхне-мантийные аномалии не могут иметь чисто термальную природу, в их генезисе важная роль принадлежит петролого-метаморфическим преобразованиям. При этом существенные петролого-метаморфические преобразования вещества происходили как в мелко-масштабных (деламинация), так и в региональных процессах (активизация мантии под Большим Бассейном), как в восходящих, так и в нисходящих потоках.

Благодарности. Автор благодарит Рихарда Блэкли (Геологическая Служба США) за предоставление данных и помощь в работе. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 04-05-65092 и 07-05-00106).

Список литературы

- Романюк Т.В.* Проявление контрастных континентальных региональных структур запада США в гравитационном поле. В: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей // Материалы 33-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского, Екатеринбург, 30 января - 3 февраля 2006 г. Екатеринбург, 2006. С. 306-309.
- Романюк Т.В., Муни В.Д., Блэкли Р.Дж.* Тектоно-геофизическая модель Каскадной субдукционной зоны // Геотектоника. 2001. № 3. С. 88-110.
- Трубицын В.П.* Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли. 2000. № 9. С. 4-40.
- Трубицын В.П.* Тектоника плавающих континентов // Вестник РАН. 2005. № 1. С. 10-21.
- Allen P.A., Verlander J.E., Burgess P.M., Audet D.M.*

- Jurassic giant ore deposits, flexure of the United States continental interior, and timing of the onset of Cordilleran shortening // *Geology*. 2000. V. 28. № 2. P. 159-162.
- Anderson D.L., Bass J.D.* Mineralogy and composition of the upper mantle // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 11. № 7. P. 637-640.
- Armstrong R.L., Ward P.* Evolving geographic patterns of Cenozoic magmatism in the North America Cordillera: The temporal and spatial association of magmatism and metamorphic core complexes // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № B8. P. 13201-13224.
- Atwater T.* Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1970. V. 81. № 12. P. 3513-3536.
- Basins of the Rio Grande Rift: Structure, Stratigraphy, and Tectonic Setting / Keller G.R., Cather S.M., eds. Boulder. Colorado, 1994. Geological Society of America Special Paper 291. P. 235.
- Benz H.M., Zandt G., Oppenheimer D.H.* Lithospheric Structure of Northern California From Teleseismic Images of the Upper Mantle // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № B4. P. 4791-4807.
- Birch F.* Composition of the Earth's mantle // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1961. V. 4. P. 295-311.
- Bird P.* Formation of Rocky Mountains, western United States // *Science*. 1988. V. 239. № 4847. P. 1501-1507.
- Bohannon R.G., Geist E.* Upper crustal structure and Neogene tectonic development of the California continental borderland // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1998. V. 110. № 6. P. 779-800.
- Bohannon R.G., Parson T.* Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1995. V. 107. № 8. P. 937-959.
- Boyd O.S., Jones C.H., Sheehan A.F.* Foundering lithosphere imaged beneath the southern Sierra Nevada, California, USA // *Science*. 2004. V. 305. № 5684. P. 660-662.
- Camilleri P.A., Chamberlain K.R.* Mesozoic tectonics and metamorphism in the Pequoop Mountains and Wood Hills region, northeast Nevada: Implications for the architecture and evolution of the Sevier Orogen // *GSA Bull.* 1997. V. 100. № 1. P. 74-94.
- Christensen N.I., Mooney W.D.* Structure and composition of the continental crust: a global view // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № B7. P. 9761-9788.
- Constenius K.N., Johnson R.A., Dickinson W.R. et al.* Tectonic evolution of the Jurassic-Cretaceous Great Valley forearc, California: Implications for the Franciscan thrust-wedge hypothesis // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2000. V. 112. № 11. P. 1703-1723.
- Couch R.W., Riddihough R.P.* The crustal structure of western continental margin of North America // Geophysical framework of the continental United States. Geological Society of America Memoir 172 / Eds. Pakiser L.C., Mooney W.D. Boulder, Colorado, 1989. P. 103-128.
- Dickinson W. R.* The Basin and Range Province as a composite extensional domain // *Int. Geol. Rev.* 2002. V. 44. № 1. P. 1-38.
- Ducea M.N.* Constraints on the bulk composition and root foundering rates of continental arcs: A California arc perspective // *J. Geoph. Res.* 2002. V. 107. № B11. 2304., doi 10.1029/2001JB000643.
- Ducea M.N., Saleeby J.B.* A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the Sierra Nevada // *Int. Geol. Rev.* 1998. V. 40. № 1. P. 78-93.
- Dueker K., Yuan H., Zurek B.* Thick-Structured Proterozoic Lithosphere of the Rocky Mountain Region // *GSA Today*, 2001. V. 10. № 12. P. 4-9.
- Duffy T.S., Anderson D.L.* Seismic velocities in mantle minerals and the mineralogy of upper mantle // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № B2. P. 1895-1912.
- Dumitru T.A., Duddy I.R., Green P.F.* Mesozoic-Cenozoic burial, uplift, and erosion history of the west-central Colorado Plateau // *Geology*. 1994. V. 22. № 6. P. 499-502.
- Dumitru T.A.* Subnormal Cenozoic geothermal gradients in the extinct Sierra Nevada magmatic arc: consequences of Laramide and post-Laramide shallow-angle subduction // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. № B4. P. 4925-4941.
- Engelbreton D.C., Cox A., Thompson G.A.* Correlation of plate motions with continental tectonics: Laramide to Basin-Range // *Tectonics*. 1984. V. 3. № 2. P. 115-119.
- Engelbreton D.C., Cox A., Thompson G.A.* Relative motions between oceanic plates in the Pacific Basin // *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.* 1985. V. 206. 59 p.
- Farmer G.L., Glazner A.F., Manley C.R.* Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California? // *Geol. Soc. Am. Bull.* 2002. V. 114. № 6. P. 754-768.
- Fliedner M.M., Klemperer S.L., Christensen N.I.* Three-dimensional seismic model of the Sierra Nevada arc, California, and its implications for crustal and upper mantle composition // *J. Geoph. Res.* 2000. V. 105. № B5. P. 10899-10921.
- Fuis G.S.* West Margin of North America – A Synthesis of recent seismic transects // *Tectonophysics*. 1998. V. 288. № 1. P. 265-292.
- Gilbert H.J., Sheehan A.F., Dueker K.G. et al.* Receiver functions in the western United States, with implications for upper mantle structure and dynamics // *J. Geophys. Res.* 2003. № B108, doi:10.1029/2001JB001194 (2003).
- Godfrey N.J., Klemperer S.L.* Ophiolitic basement to a forearc basin and implications for continental growth: The Coast Range/Great Valley ophiolite,

- California // *Tectonics*. 1998. V. 17. № 4. P. 558-570.
- Grand S.P.* Tomographic Inversion for Shear Velocity Beneath the North American Plate. // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. № B13. P. 14065-14090.
- Houseman G.A., Molnar P.* Gravitational (Rayleigh-Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // *Geoph. Journal Int.* 1997. V. 128. № 1. P. 125-150.
- Houseman G.A., Neil E.A., Kohler M.D.* Lithospheric instability beneath the Transverse Ranges of California // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № B7. P. 16237-16250.
- Humphreys E.D.* Post-Laramide removal of the Farallon slab, western United States // *Geology*. 1995. V. 23. № 11. P. 987-990.
- Humphreys E.D., Dueker K.G.* Western U.S. Upper mantle structure // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № B5. P. 9615-9634.
- Humphreys E.D., Dueker K.G.* Physical state of the western U.S. upper mantle // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № B5. P. 9635-9650.
- Humphreys E., Hessler E., Dueker K. et al.* How Laramide-Age Hydration of North American Lithosphere by the Farallon Slab Controlled Subsequent Activity in the Western United States // *The lithosphere of Western North America and its geophysical characterization* / Klemperer S.L., Ernst W.G. (Eds.). Bellwether Publishing, 2003. Ltd. For the Geological Society of America. The George A. Thompson Volume International Book Series, V. 7. P. 524-544.
- Jones C. H., Farmer G. L., Unruh J.* Tectonics of Pliocene delamination of lithosphere of the Sierra Nevada, California // *Geol. Soc. Am. Bull.* 2004. V. 116. № 11-12. P. 1408-1422.
- Jull M., Kelemen P.B.* On the conditions for lower crustal convective instability // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № B4. P. 6423-6446.
- Lastowka L.A., Sheehan A.F., Schneider J.M.* Seismic Evidence for Partial Lithospheric Delamination Model of Colorado Plateau Uplift // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 7. P. 1319-1322.
- Lee C-T.A., Cheng X., Horodyskyj U.* The development and refinement of continental arcs by primary basaltic magmatism, garnet pyroxenite accumulation, basaltic recharge and delamination: insights from the Sierra Nevada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. V. 151. № 2. P. 222-242, doi: 10.1007/s00410-005-0056-1.
- Livaccari R.F., Perry F.V.* Isotopic evidence for preservation of Cordilleran lithospheric mantle during the Sevier-Laramide orogeny, western United States // *Geology*. 1993. V. 21. № 8. P. 719-722.
- Malavieille J., Taboada A.* Kinematic model for postorogenic Basin and Range extension // *Geology*. 1991. V. 19. № 6. P. 555-558.
- Manley C.R., Glazner A.F., Farmer G.L.* Timing of volcanism in the Sierra Nevada of California: Evidence for Pliocene delamination of the batholithic root? // *Geology*. 2000. V. 28. № 9. P. 811-814.
- McQuarrie N., Chase C.G.* Raising the Colorado Plateau // *Geology*. 2000. V. 28. № 1. P. 91-94.
- Neil E.A., Houseman G.A.* Rayleigh-Taylor instability of the upper mantle and its role in intraplate orogeny // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 138. № 1. P. 89-107.
- Park S.K., Wernicke B.* Electrical conductivity images of Quaternary faults and Tertiary detachment in the California Basin and Range // *Tectonics*. 2003. V. 22. № 4. 1030, doi:10.1029/2001TC001324, 2003.
- Park S., Hirasuna B., Jiracek G. et al.* Magnetotelluric evidence for lithospheric mantle thinning beneath the southern Sierra Nevada // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № B7 P. 16241-16255.
- Prodehl C., Lipman P.W.* The crustal structure of the Rocky Mountain. // *Geophysical framework of the continental United States. Geological Society of America Memoir 172* / Eds. Pakiser L.C., Mooney W.D. Boulder, Colorado, 1989. P. 103-128.
- Read A.S., Karlstrom K.E., Grambling J.A. et al.* A middle-crustal cross section from the Rincon Range, northern New Mexico: Evidence for 1.68-Ga, pluton-influenced tectonism and 1.4 Ga regional metamorphism // *Rocky Mountain Geology*. 1999. V. 34. № 1. P. 67-91.
- Romanyuk T., Mooney W., Detweiler S.* Two lithospheric profiles across Southern California derived from gravity and seismic data // *Journal of Geodynamics*. 2007. V. 43. № 2. P. 274-307.
- Saleeby J., Ducea M., Clemens-Knott D.* Production and loss of high-density batholithic root, southern Sierra Nevada, California // *Tectonics*. 2003. V. 22. № 6, doi: 10.1029/2002TC001374.
- Sato H., Sacks I.S.* Anelasticity and thermal structure of the oceanic mantle: Temperature calibration with heat flow data // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № 5. P. 5705-5715.
- Sato H., Sacks E., Takahashi E. et al.* Geotherms in the Pacific Ocean from laboratory and seismic attenuation studies // *Nature*. 1988. V. 336. № 6195 P. 154-156.
- Sato H., Sacks I.S., Murase T. et al.* Qp-melting temperature relation in peridotite at high pressure and temperature: Attenuation mechanism and implications for the mechanical properties of the upper mantle // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № 8. P. 10647-10661.
- Stock J.M., Molnar P.* Uncertainties and implications of the late Cretaceous and Tertiary position of North America relative to the Farallon, Kula, and Pacific plates // *Tectonics*. 1988. V. 7. № 6. P. 1339-1384.

- Stoddard P.R., Wainright E.J.* A reconstruction of the Northeastern Pacific from the Hawaiian-Emperor hotspot trace // *Tectonophysics*. 1983. V. 99. № 2-4. P. 221-229.
- Van der Lee S., Nolet G.* Seismic image of the subducted trailing fragments of the Farallon plate // *Nature*. 1997. V. 386. № 6622. P. 266-269.
- Verplanck E.P., Duncan R.A.* Temporal variations in plate convergence and eruption rates in the Western Cascades, Oregon // *Tectonics*. 1987. V. 6. № 2. P. 197-209.
- Unruh J.R., Twiss R.J.* Coseismic growth of basement-involved anticlines: The Northridge-Laramide connection // *Geology*. 1998. V. 26. № 4. P. 335-338.
- Wells M.L., Snee L.W., Blythe A.E.* Dating of major normal fault systems using thermochronology: An example from the Raft River detachment, Basin and Range, western United States // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № B7. P. 16303-16327.
- Wernicke B.P.* Low-angle normal faults in the Basin and Range Province, Nappe tectonics in an extending orogen // *Nature*. 1981. V. 291. № 5817. P. 645-648.
- Wernicke, B.P., Christiansen, R.L., England P.C. et al.* Tectonomagmatic evolution of Cenozoic extension in the North American cordillera // *Continental extensional tectonics / Coward M.P., et al. eds. Geological Society Special Publication 28*. 1987. P. 203-221.
- Zandt G., Myers S.C., Wallace T.C.* Crust and mantle structure across the Basin and Range – Colorado Plateau boundary at 37°N latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № B6. P. 10529-10548.
- Zandt G.* The southern Sierra Nevada drip and the mantle wind direction beneath the southwestern United States // *Int. Geol. Review*. 2003. V. 45. P. 213–223.
- Zandt G., Gilbert H., Owens T. et al.* Active foundering of a continental arc root beneath the southern Sierra Nevada in California // *Nature*. 2004. V. 431. № 7004. P. 41-46.

MANIFESTATION OF CENOZOIC GEODYNAMIC EVOLUTION IN PRESENT-DAY STRUCTURE OF THE CRUST AND UPPER MANTLE OF THE WESTERN USA

T.V. Romanyuk

Schmidt Institute Physics of the Earth RAS, Moscow 123995, B. Gruzinskaya 10

A short schematic description of the major Cenozoic events taken place into the western part of the Northern American continent and been accompanied a process of transformation a convergent continental margin into a transform plate boundary is present. The Cenozoic geodynamic evolution has greatly influenced the present day tectonic provinces. The summary of various geological-geophysical data allowed to compile an integrated geological-geophysical model along “W-USA” profile crossing contrast lithospheric structures of the Western USA related both to upwelling, and downwelling mantle flows. Results of seismic-gravity modeling for “W-USA” profile testify that the upper mantle anomalies can not be generated by purely thermal processes, the important role in their genesis belongs to petrological/metamorphic transformations (including a partial melting).