

УДК 550.34:551.1

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ И ИХ ПРИРОДА

© 2020 г. Н. И. Павленкова*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123242 Россия

*e-mail: ninapav@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2019 г.

Принята к публикации 27.09.2019 г.

Глубинные сейсмические исследования верхней мантии при проведении ядерных взрывов и лабораторные исследования мантийного вещества при высоких P - T параметрах выявили новые структурные и петрофизические особенности верхней мантии Северной Евразии, которые трудно объяснить на основе современных представлений о структуре континентальной литосферы. Например, в области, выделяемой по тепловому полю астеносферы, по сейсмическим данным не наблюдается соответствующего уменьшения скоростей, а слои пониженных скоростей установлены внутри литосферы на глубине около 100–150 км. Астеносфера выделяется по пониженной добротности и по структурным особенностям сейсмических границ. Это означает, что она представлена слоем повышенной пластичности, но без частичного плавления. По лабораторным исследованиям также установлено, что сейсмические скорости не зависят от состава мантийных пород и определяются в основном температурой субстрата. Это дало возможность по сейсмическим данным определить температурный режим верхней мантии. Проведенные на этой основе расчеты показали, что мощность литосферы стабильна под Северной Евразией и составляет 300–350 км. Эти данные не согласуются с результатами, полученными при определении подошвы литосферы по измеренному на поверхности тепловому потоку. Объяснить это несогласие можно большим влиянием глубинных флюидов на петрофизические параметры мантийных пород. На глубинах, где резко меняются механические свойства вещества и увеличивается его пористость, происходит уменьшение плотности глубинных флюидов с выделением большого количества тепла. В результате формируются астенолиты (плюмы), возможно содержащие расплав, и увеличивается поверхностный тепловой поток. Этим объясняется формирование астенолитов на глубине 100–150 км и различия в определении температурного режима по сейсмическим данным и по тепловому потоку. Глубинные флюиды инициируют также физико-химические преобразования вещества, в частности формирование деплетированного вещества пониженной плотности при неизменной скорости сейсмических волн. Нарушение прямой зависимости между скоростью и плотностью отмечается и при комплексной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных. Физико-химическими преобразованиями вещества в зонах концентрации глубинных флюидов можно объяснить и образование сложных отражающих границ, выявленных в верхней мантии сейсмическим методом.

Ключевые слова: литосфера, астеносфера, петрофизика, глубинные флюиды, сейсмические границы, слои пониженных скоростей

DOI: 10.31857/S0869590320030048

ВВЕДЕНИЕ

Основными методами изучения структуры верхней мантии является в настоящее время глубинное сейсмическое зондирование, проведенное с большими взрывами, и детальные сейсмологические исследования. Эти методы существенно дополняются другими геофизическими данными, например гравиметрическими и данными теплового потока. Большой объем новых материалов получен также в результате лабораторных исследований петрофизики мантийного вещества при высоких P - T параметрах. Однако, чем больше накапливается экспериментальных данных, характеризующих структурную неоднородность верхней мантии, изменчивость ее теплового режима и особенности геофизических полей, тем очевидней становится их несогласован-

ность при определении принципиально важных особенностей верхних оболочек Земли и природы их формирования. Оказалось также, что значительная часть используемых в настоящее время методов интерпретации геофизических материалов практически неприемлема для решения этих проблем. В настоящей работе рассматриваются эти проблемы и делается попытка найти для них достаточно обоснованные решения.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Наиболее надежные геофизические данные о структуре верхней мантии получены в настоящее время в России на основании сейсмических работ

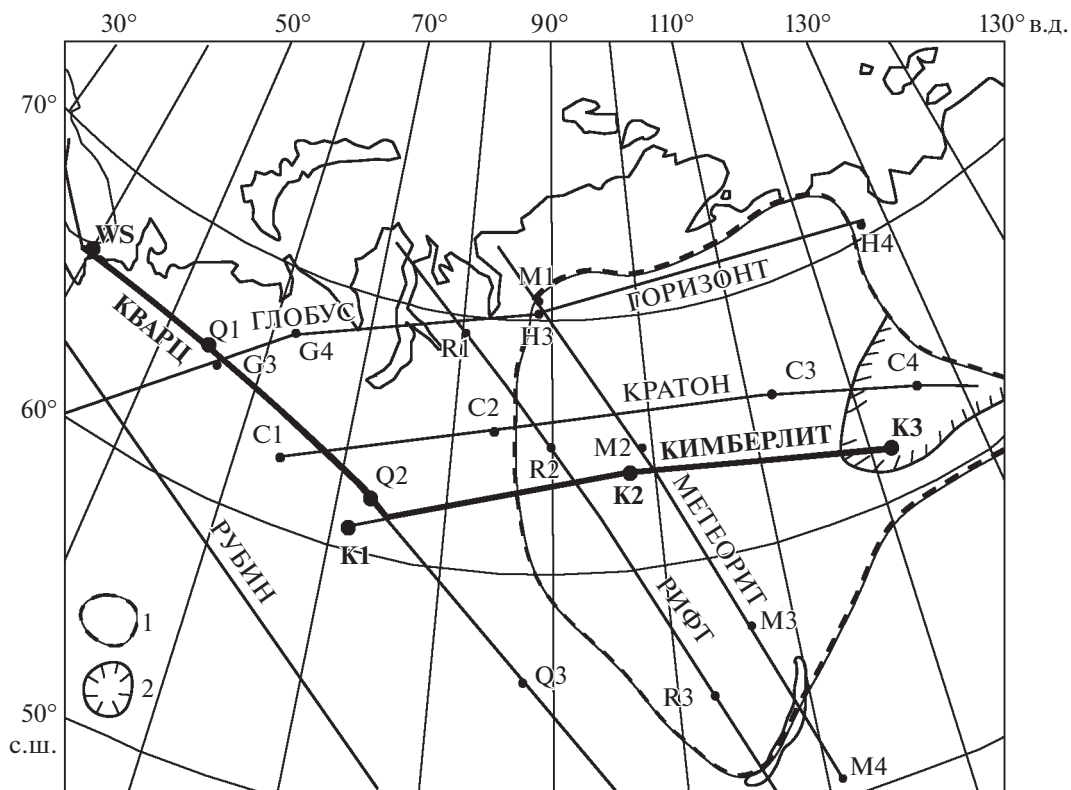


Рис. 1. Схема сверхдлинных сейсмических профилей, отработанных с ядерными взрывами. Утолщенными линиями показан профили “Кварц” и “Кимберлит”, по которым на рис. 2 приведены сейсмические разрезы. На всех профилях дано их название и отмечено местоположение отработанных ядерных взрывов (буквами даны их названия). Контуры: 1 – Сибирского кратона, 2 – Вилюйской впадины.

по сверхдлинным профилям с регистрацией ядерных взрывов (рис. 1) (Егоркин и др., 1981; Egorkin, Chernyshov, 1983; Егоркин, 2004; Павленкова Н.И., Павленкова Г.А., 2014). Эти работы позволили построить детальные скоростные разрезы до глубины 700 км для таких крупных структур как Восточно-Европейская и Сибирская древние платформы и молодая Западно-Сибирская плита. На этой территории хорошо изучены также гравитационные и магнитные поля, тепловой поток (Поляк, 1988; Poliak et al., 1993; Гордиенко, 2010) и проведены сейсмологические исследования (Oreshin et al., 2002; Koulakov, Bushenkova, 2010). Все эти данные широко используются для комплексной их интерпретации: по сейсмическим материалам изучаются структурные особенности земной коры и верхней мантии, по тепловому потоку определяется мощность литосферы (Artemieva, Mooney, 2001), по гравитационному полю – плотность ее неоднородность (Грачев, Кабан, 2006; Егорова, Павленкова, 2015). В результате всех этих исследований выявлено множество новых необычных особенностей в строении верхней мантии этого региона.

На рис. 2 приведен сводный сейсмический разрез земной коры и верхней мантии по двум сверхдлинным профилям “Кварц” и “Кимберлит” (см. рис. 1). Профили пересекают все главные структу-

ры Северной Евразии. Мощность земной коры меняется незначительно, в среднем от 40 до 45 км, скорости в верхней мантии без резких скачков нарастают с глубиной от 8.1–8.3 км/с на границе М до 8.6 км/с в кровле переходной зоны к нижней мантии на глубине около 400 км. Важной особенностью этого разреза является деление верхней мантии на несколько слоев с четкими отражающими границами. Это границы N1, N2, L и H на глубинах около 100, 150, 200 и 300 км соответственно.

Такую расслоенность литосферы платформенных регионов трудно объяснить изменчивостью слагающего ее вещества, и никаких доказательств о наличии фазовых переходов на этих глубинах не получено. Различаются эти слои в основном по реологическим свойствам: степени пластичности, вязкости, пористости и др. Особенно четко эти различия наблюдаются между верхним жестким слоем литосферы мощностью 100–150 км, характеризующимся существенной горизонтальной неоднородностью, и более глубокой однородной ее частью, где из-за повышенной пластичности эта неоднородность не сохранилась. Эти два слоя литосферы разделены сложной переходной зоной (границы N1, N2 на рис. 2) и с необычными для литосферы древних платформ слоями пониженных скоростей (волноводами).

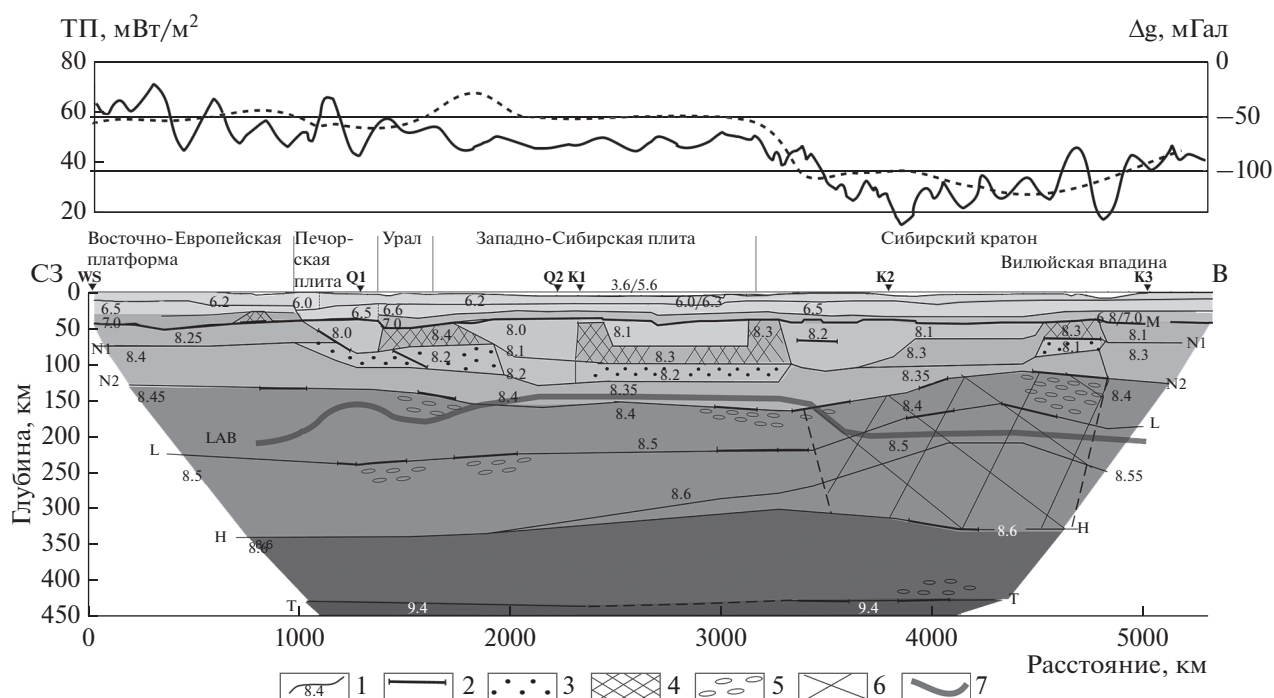


Рис. 2. Сводный скоростной разрез по профилям “Кварц” и “Кимберлит”, пересекающим Восточно-Европейскую, Западно-Сибирскую и Сибирскую платформы от Балтийского щита до Вилюйской впадины (Павленкова Н.И., Павленкова Г.А., 2014).

1 – границы слоев с разными скоростями продольных волн (км/с), 2 – отражающие площадки, 3 – слои пониженной скорости, 4 – высокоскоростные блоки, 5 – области высокой гетерогенности верхней мантии, 6 – область пониженной на $0.03\text{--}0.05\text{ г/см}^3$ плотности в литосфере Сибирского кратона, определенной по гравиметрическим данным (Егорова, Павленкова, 2015), 7 – глубина до границы литосфера–астеносфера (LAB – lithosphere-asthenosphere boundary), определенная по тепловому потоку (Artemieva, Mooney, 2001). WS, Q1, Q2, K1–K3 – местоположение отрабатанных ядерных взрывов; М – подошва земной коры, N1, N2, L, H – сейсмические границы в верхней мантии, Т – кровля переходной зоны к нижней мантии. Геофизические поля: ТП – тепловой поток (мВт/м^2), Δg – аномалии Буге (мГал). Условные обозначения к верхнему рисунку: пунктирная линия – тепловой поток, сплошная – гравитационное поле.

Ниже будем называть такую зону зоной N. В работе (Thybo, Rechus, 1997) она названа 8-градусной границей, так как волны от нее регистрируются на удалении 8° от источника.

Необычной оказалась структура и других сейсмических границ: на них не наблюдается резких изменений скоростей, но отраженные от них волны имеют большую интенсивность и сложную многофазовую запись. На рис. 3 представлен типичный монтаж сейсмограмм, полученных от ядерного взрыва в точке С1 по профилю “Кратон”. На них на расстоянии от источника 750 км (около 8°) в первых вступлениях четко выделяется разрыв (“зона тени”), соответствующий волноводу на глубине около 100 км, а в последующих вступлениях регистрируются многофазовые отраженные волны P_{N1} , P_{N2} , P_L и P_H от границ N1, N2, L и H соответственно. Математическое моделирование показало, что такие отражения формируются в слоях со сложной внутренней неоднородностью (Павленкова, 2011).

Другой необычной особенностью описываемой сейсмической модели верхней мантии является отсутствие четко выраженной астеносферы.

По данным теплового потока, кровля астеносферы, как слоя частично расплавленного вещества, располагается в данном регионе на глубине 150–200 км (рис. 2) (Artemieva, Mooney, 2001). По сейсмическим данным, такая астеносфера должна выделяться как область пониженных скоростей, но такие области, несмотря на высокую детальность исследований, на сверхдлинных профилях нигде не выявлены.

Однако астеносферу не обязательно рассматривать как слой частичного плавления (тепловая астеносфера), это может быть слой пониженной вязкости. Тогда ее выделение может быть основано на изучении добротности вещества верхней мантии (его пластичности и вязкости), а также с учетом структурных особенностей скоростной модели. Возможное наличие такой астеносферы в Северной Евразии подтверждено сверхдлинными профилями. По спектральным характеристикам сейсмических волн на глубине более 250 км наблюдается резкое уменьшение добротности мантийного вещества (Егоркин и др., 1981), и на этой же глубине отмечается ряд структурных особенностей сейсмических границ, характеризующих

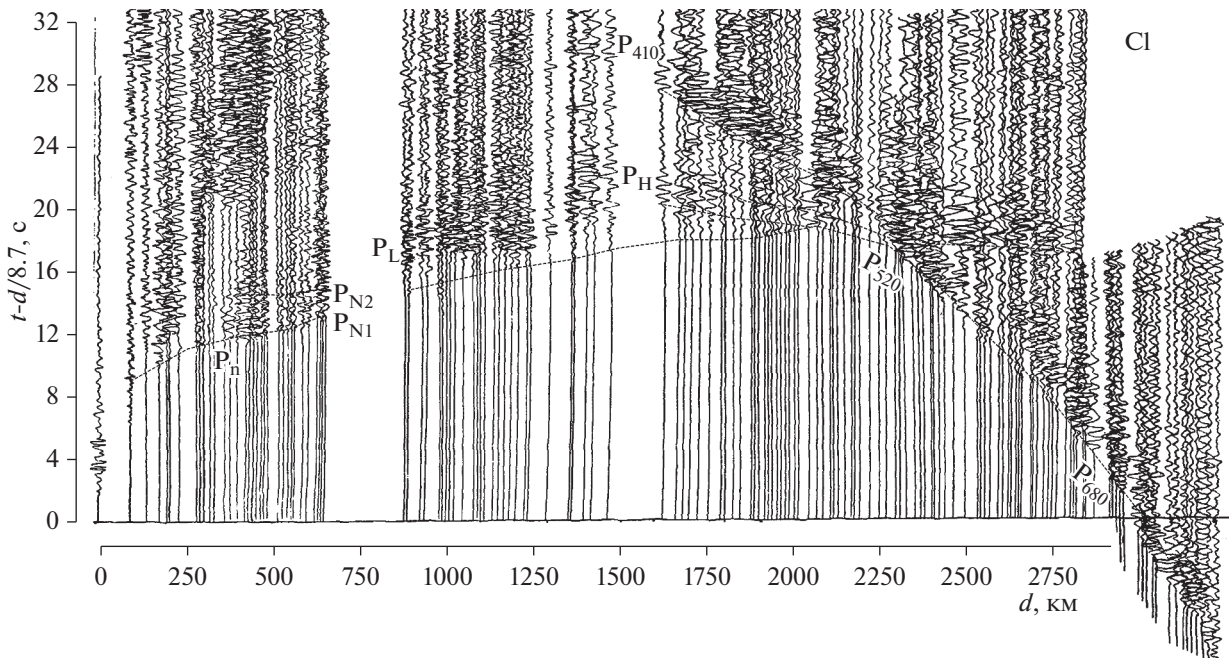


Рис. 3. Монтаж сейсмограмм, записанных вдоль профиля “Кратон” от ядерного взрыва в точке С1 (рис. 1). Монтаж представлен в редуцированном виде, при котором из наблюдаемого времени t (с) вычтена величина расстояния от взрыва d (км), деленная на скорость редукции 8.7 км/с. P_n — преломленные волны в верхах мантии (от границы М), P_{N1} , P_{N2} , P_L , P_H — отраженные волны от границ N1, N2, L и H в верхней мантии, P_{410} , P_{520} , P_{680} — волны от границ переходной зоны между верхней и нижней мантией на соответствующих глубинах.

изостатическое выравнивание плотностной неоднородности литосферы. Например, граница H прогибается под подъемом вышележащей границы L (рис. 2), и это дает основание предполагать, что она является кровлей астеносферы.

В целом, на основании описанного материала, обобщенную модель верхней мантии Северной Евразии можно представить следующим образом (рис. 4а). Литосфера мощностью 300 км подразделяется на три слоя разной степени пластичности, они разделены сейсмическими границами, характеризующимися сложной внутренней структурой. Астеносфера выделяется условно по ряду косвенных данных как слой пониженной вязкости. Дополнительными данными о возможной глубине до такой астеносферы являются данные по гипоцентрии глубоких землетрясений, по которым на глубине от 300 км до кровли переходной зоны к нижней мантии (410 км) часто наблюдается так называемая “немая зона”, т.е. ослабленная зона, где полностью отсутствуют землетрясения (рис. 4б). Однако эта модель существенно отличается от модели по данным теплового потока.

Таким образом, проведенные в последнее время детальные исследования структуры литосферы и петрофизических характеристик вещества верхней мантии выявили ряд особенностей ее строения, которые пока не получили согласованных объяснений. Неясна природа резкой изменчивости реологических особенностей литосферы, наличие в ней сложных сейсмических границ и слоев пони-

женных скоростей. Противоречивые данные получены о мощности литосферы, определенной по тепловому потоку и по сейсмическим материалам. Неясно, существует ли вообще астеносфера под древними платформенными регионами?

Для объяснения всех этих необычных структурных особенностей верхней мантии большое значение приобретают полученные в последнее время данные лабораторных исследований мантийных пород при высоких P - T параметрах.

Петрофизические характеристики мантийного вещества

Наиболее полные исследования петрофизических свойств мантийного вещества удалось провести в настоящее время для Сибирского кратона. На основании лабораторных исследований больших коллекций глубинных ксенолитов при высоких P - T параметрах получено много нового важного материала (Boyd et al., 1997; Глебовицкий и др., 2001; Ionov et al., 2010; Ashchepkov et al., 2010; Doncet et al., 2014 и др.). Они показали, что с увеличением глубины существенно меняются соотношения между основными физическими параметрами мантийного вещества, его состава и температурного режима. При этом закономерности этих изменений по своей природе отличаются от закономерностей, выявленных ранее для земной коры и самых верхов мантии.

На рис. 5 приведены результаты определения скорости распространения продольных волн (V_p) и

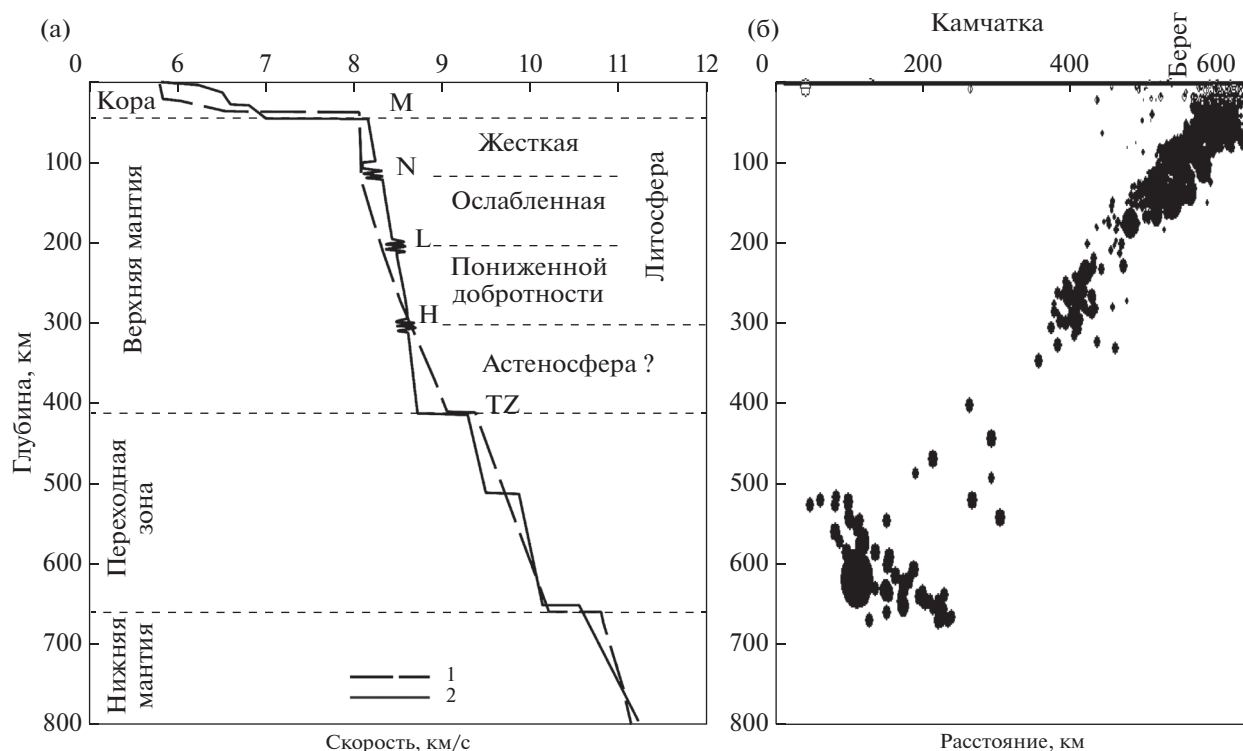


Рис. 4. (а) Обобщенная скоростная модель верхней мантии Северной Евразии, построенная по сверхдлинным профилям (кривая 2) в сопоставлении с референтной сейсмологической моделью IASP-91 (Kennet, Engdahl, 1991) (кривая 1). На обобщенной модели сейсмические границы N, L и H показаны как многослойные пачки, TZ — кровля переходной зоны к нижней мантии, M — подошва земной коры. (б) График распределения очагов землетрясений с глубиной для региона Камчатки.

плотности для мантийных пород разного состава для двух кондуктивных геотерм, соответствующих тепловым потокам 35 и 50 мВт/м² (Кусков и др., 1914). Как и предполагалось, сейсмическая скорость и плотность закономерно меняются с ростом температуры и давления. Неожиданным оказалось, что сейсмические скорости для мантийных пород разного состава практически не различаются, а плотность у них разная. Например, пониженная плотность характерна для деплетированного вещества (гранатового гарцбургита Hzb и гранатового перидотита GP), а скорость практически не отличается от скорости для других мантийных пород.

Выявленная для верхней мантии зависимость сейсмических скоростей только от температуры ограничивает возможности сейсмического метода при интерпретации гравитационных полей, но она открывает для него новые возможности по определению температурного режима верхней мантии, и, соответственно, проходящих в ней геодинамических процессов (Кусков, Кронрод, 2007; Sammango et al., 2009).

В работе (Кусков и др., 1914) температурный режим верхней мантии был определен по сейсмическим скоростям для всех сверхдлинных профилей Сибирского кратона по специально разработанной методике с учетом и петролого-геохимических данных по составу ксенолитов гранатовых перидотитов

(GP) и фертильного вещества примитивной мантии (PM). Впервые была проведена реконструкция термального состояния литосферной мантии Сибирского кратона на глубинах 100–300 км с учетом эффектов фазовых превращений и изменения упругости (Кронрад, Кусков, 2007). На рис. 6 приведены результаты таких расчетов для трех точек профиля “Кратон”, расположенных между пунктами взрыва K2 и K3 на расстоянии 1100, 1900 и 2300 км соответственно от начала профиля (рис. 1).

Эти расчеты показали, что мощность литосферы (по глубине изотермы 1300°) стабильна под Сибирским кратоном и составляет около 300 км. Это хорошо согласуется с предполагаемой по сейсмическим данным глубиной до подошвы литосферы, границы H, что не согласуется с представлениями о температурном режиме верхней мантии, полученными по результатам анализа теплового потока. По этим данным граница между литосферой и астеносферой (LAB) выделена на глубине 200 км (рис. 2).

В целом проведенные расчеты показали достаточно высокую достоверность определения температурного режима литосферы по сейсмическим скоростям. Однако это не касается подошвы литосферы. При глубине более 250 км объем сейсмических данных резко сокращается (рис. 6) и на глубине 300 км, где температура достигает 1450°С, лишь предполагается наличие области возможного ча-

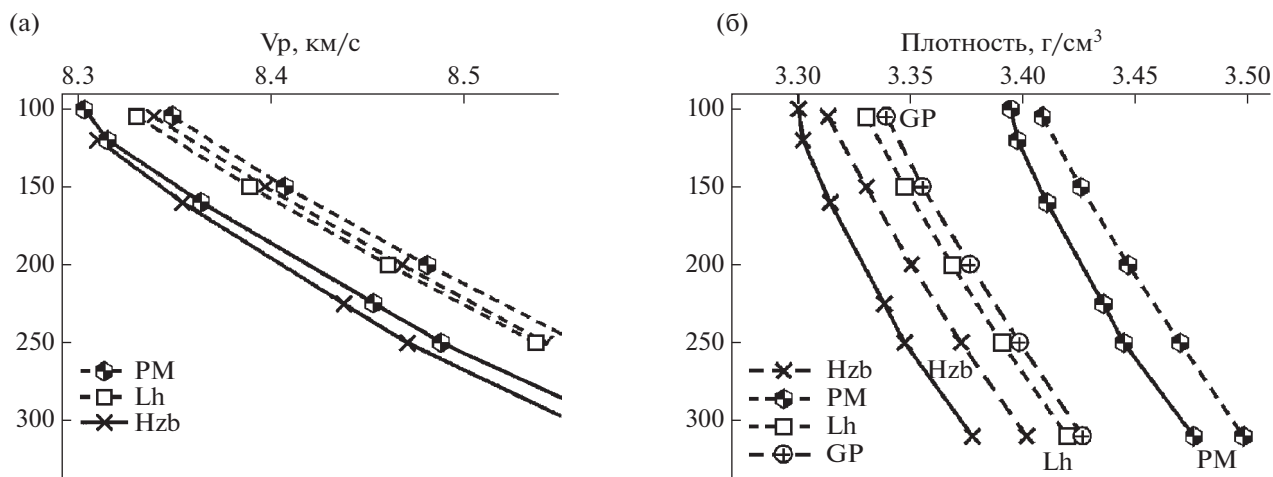


Рис. 5. Графики изменения физических параметров мантийных пород с глубиной: V_p – скорость продольных волн (а) и плотность (б) для гранатового гарцбургита (Hzb), лерцолита (Lh), гранатового перидотита среднего состава (GP) и фертильного вещества примитивной мантии (PM), рассчитанные вдоль геотерм 35 мВт/м² (пунктир) и 50 мВт/м² (сплошные линии) (Кусков и др., 2014).

стичного плавления (тепловой астеносферы), но соответствующего слоя пониженных скоростей здесь не обнаружено. Таким образом, полученные данные не дают решения проблемы неоднозначности в определении кровли астеносферы и ее природы.

Проблема усугубляется еще и тем, что зона пониженных скоростей (волновод) часто наблюдается в верхней части литосферы на глубине 100–150 км (рис. 2). В регионах с повышенным тепловым потоком этот волновод часто интерпретируется как астеносфера. Но такие волноводы имеют обычно небольшую мощность (20–30 км) и подстилаются четкой отражающей границей с обычной для мантии сейсмической скоростью 8.1–8.3 км/с.

Как отмечалось выше, изучение мантийных ксенолитов выявило еще одну проблему – нарушение прямой связи между сейсмическими скоростями и плотностью: при неизменной скорости плотность деплетированных пород существенно ниже средней плотности мантийного вещества (рис. 5). Это дает возможность объяснить отмеченные выше расхождения между скоростными моделями и гравитационным полем в районе Сибирского кратона, когда при высоких сейсмических скоростях, связанных с пониженным тепловым режимом литосферной мантии кратона, наблюдается гравитационный минимум (рис. 2). В работе (Грачев, Кабан, 2006) предполагалось сохранение линейной связи между скоростью и плотностью для мантийного вещества, и наблюдаемый гравитационный минимум объяснялся авторами наличием под литосферой Сибирского кратона плюма. По сейсмическим данным, никаких признаков существования какого-либо плюма не было обнаружено. С учетом новых данных о пониженной плотности деплетированных пород Сибирского кратона для объяснения наблюдаемого гравитационного минимума более обосновано предпола-

гать уменьшение плотности по всей толще литосферы (Егорова, Павленкова, 2015) (рис. 2).

Новые важные результаты получены при лабораторных исследованиях мантийных пород, насыщенных флюидами, а также при изучении самих флюидов и изменчивости их физических свойств с глубиной. Эти исследования дают основание предполагать, что многие структурные особенности верхней мантии, наличие в ней слоев пониженных сейсмических скоростей и наличие сложных сейсмических границ, и даже изменение состава мантийного вещества могут быть связаны именно с энергетическими и геохимическими особенностями глубинных флюидов, т.е. с дегазацией Земли.

РОЛЬ ФЛЮИДОВ В ФОРМИРОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

О дегазации Земли и особенностях адвекции глубинных флюидов

О дегазации Земли, о составе и физических свойствах глубинных флюидов в настоящее время получен большой объем фактических данных. Многочисленные и многоплановые исследования Земли, основанные на большом комплексе геолого-геофизических, геохимических и астрономических исследований, показали, что важной характеристикой Земли, отличающей ее от других планет, является большое содержание в ней флюидов, основными компонентами которых являются водород, гелий и углерод. Эти флюиды не только сформировали атмосферу и гидросферу Земли, они также играли большую роль во многих геодинамических процессах и в преобразовании вещества планеты.

В этой связи важным направлением по решению геодинамических проблем является изучение фактических данных о дегазации Земли, о свойствах

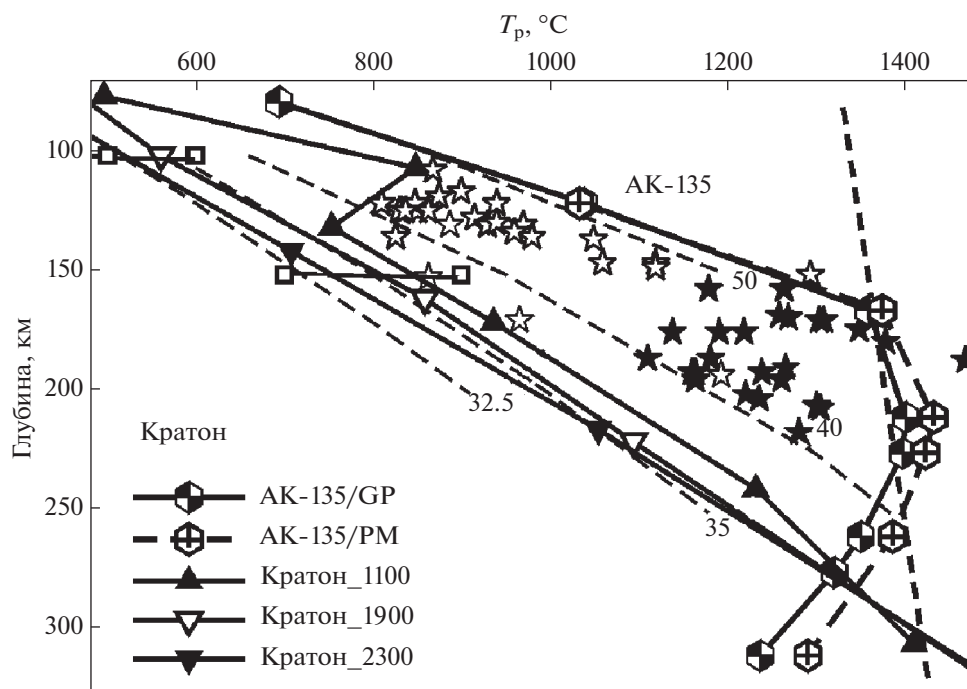


Рис. 6. Распределение температур в верхней мантии под Сибирским кратоном, восстановленное по сейсмическим моделям вдоль профиля “Кратон” для трех точек профиля 1100, 1900 и 2300 для состава гранатового перидотита (GP) (Кусков и др., 2014).

Залитые и незалитые звезды – равновесные P - T параметры для низко- и высокотемпературных ксенолитов (Глебовицкий и др., 2001; Ionov et al., 2010). Штриховая линия – мантийная адиабата с потенциальной температурой 1300°C. АК-135/GP – осредненная континентальная геотерма, определенная по референтной сейсмологической модели АК-135 для перидотитовой мантии, АК-135/PM – для примитивной мантии. Тонкие штриховые линии – кондуктивные геотермы для тепловых потоков от 32.5 до 50 мВт/м².

глубинных флюидов и их роли в преобразовании вещества планеты (Williams, Hemley, 2001; Gilat, Vol, 2005). Здесь следует отметить, прежде всего, большой объем данных, накопленных при изучении природных газов (Поляк, 1988; Griffin et al., 2003; O’Reilly, Griffin, 2006; Валяев, Дремин, 2015), а также экспериментальные данные о водородной дегазации планеты. Это стало возможным после непосредственных измерений водородной дегазации в разных частях планеты, выполненных в последние годы, но пока неопубликованных (В.Н. Ларин, устная информация), а также на основании глобальных исследований озонового слоя, который разрушается под воздействием потоков водорода (Сывороткин, 2002). Эти исследования показали, что в настоящее время водородная дегазация наиболее активна в южном полушарии, являясь основной причиной образования крупных озоновых дыр над Антарктидой. Интенсивные потоки водорода наблюдаются также в пределах срединно-океанических хребтов и других нарушенных зон тектоносферы.

В настоящее время накоплен также большой экспериментальный материал по изучению процессов физико-химического преобразования вещества с участием флюидов, и о влиянии флюидов на его физические свойства. Термин “флюиды” означает в русской геологической литературе не просто жидкость, как в прямом переводе с английского.

Наиболее полно понятие флюида описано в работах Ф.А. Летникова (1999, 2006), основанных на большом экспериментальном материале изучения физических свойств мантийного вещества и динамических особенностей флюидов при высоком давлении и температуре. Флюид определяется в них как существенно водно-газовая или газовая система, состоящая из ряда компонентов в соединении с петрогенными, рудными и иными элементами. Основными компонентами глубинных флюидов являются водород (H), гелий (He) и углерод (C), их соединения и оксиды (H₂, CO₂, CH₄, CO) (Gilat, Vol, 2005). Предполагается, что с течением времени, по всей видимости, происходили изменения соотношений этих составляющих в сторону общего окисления флюидных систем.

В верхах мантии флюиды представляют собой газовые смеси, где H₂O находится в газообразном состоянии, поскольку существование водных растворов возможно только в верхних слоях земной коры. Установлено также, что в отличие от жидкого практически несжимаемого флюида, газовые смеси могут быть сжаты до высоких плотностей, и тогда в небольшом объеме газа будет заключено значительное количество тепловой энергии. В результате газовый флюид является универсальным теплоносителем, накапливая тепло и химическую энергию в недрах Земли и перенося ее к поверхности. Правда,

существуют предположения, что литосфера насыщена флюидами в результате субдукции и дегидратации слэбов (Williams, Hemlay, 2001). Однако такие флюиды не несут с собой тепловой энергии и не могут играть большой роли в глобальных процессах.

Энергоемкие глубинные флюиды распространяются на большой глубине в рассланцованных породах на субмолекулярном уровне (Летников, 1999, 2006). Они не теряют своей энергии при транспортировке с больших глубин, а выделяют ее лишь при резком изменении P - T условий, увеличении пористости и трещиноватости пород. Это приводит к разуплотнению флюидов с выделением большого количества тепловой энергии.

Таким образом, в результате флюидной адвекции температура меняется с глубиной неравномерно по некоторой адиабате, как это принято при интерпретации данных теплового потока, а на глубине, где в связи с резким изменением физико-механических свойств мантийного вещества и физического состояния самих флюидов, образуются ограниченные по мощности области повышенной температуры, астенолиты. Такие неравномерные изменения температуры с глубиной были рассчитаны и на основе адвективно-полиморфной гипотезы (Гордиенко, 2010). Этот вывод позволяет объяснить описанную выше структурную расчлененность верхней мантии по сейсмическим скоростям. Это позволяет также объяснить расхождение между сейсмическими данными и данными теплового потока о температурном режиме на больших глубинах.

Адвекцией глубинных флюидов можно объяснить и процессы преобразования мантийного вещества, вызывающие изменение его плотности при неизменной сейсмической скорости. Это — процессы формирования “корней” континентов, сложенных деплетированным веществом. Ранее деплетирование мантийного вещества связывали с архейским периодом и с очень высокими температурами мантии в то время (Walter, 1998). Предполагалось, что выплавление коматиитов и базальтовых компонентов привело к обеднению верхней мантии Fe, Al, Ca и, соответственно, к уменьшению ее плотности в интервале глубин 200–300 км (Griffin et al., 2003).

По модели Ф.А. Летникова (2006), формирование континентальной верхней мантии, сложенной деплетированным веществом, происходило в течение длительной геологической истории. При высоких P - T параметрах, характерных для верхней мантии, происходило обогащение сосуществующих флюидов такими компонентами, как SiO_2 , K и Na. Последующий их вынос вместе с флюидами из мантии в земную кору приводил к формированию гранитогнейсового слоя земной коры и к деплетированию вещества верхней мантии, к повышению температуры солидуса мантийной матрицы, ее кристаллизации, т.е. к формированию литосферы с пониженной плотностью. Это позволяет объяснить отмеченное выше несогласие между

высокоскоростной моделью литосферы Сибирского кратона и гравитационным полем.

Описанные свойства глубинных флюидов дают возможность объяснить и природу формирования в литосфере волноводов и протяженных сейсмических границ.

Природа мантийных волноводов и сейсмических границ

Природа волноводов или слоев пониженной скорости прохождения сейсмических волн, выявленных на глубине около 100 км, широко обсуждалась в литературе. Их существование в тектонически активных регионах объясняли высокой температурой, даже возможным частичным плавлением вещества, и эти слои часто относили к астеносфере (Artemieva, Mooney, 2001; Heit et al., 2007). Для районов древних щитов такое объяснение представлялось невозможным (Павленкова, 2011). Более естественно связывать волноводы со слоями высокой пористости и насыщенности глубинными флюидами. Это предположение обосновано лабораторными исследованиями, по которым наличие в веществе флюидов существенно снижает его сейсмические скорости (Lambert, Wyllie, 1970; Лебедев и др., 1989; Kern, 1993; Doncet et al., 2014). Такая трактовка подтверждается и данными электромагнитных исследований, по которым зона N на глубине 100–150 км часто отличается повышенной электропроводностью (Jones et al., 2009).

Свойства слоев пониженных скоростей могут быть связаны также с различными процессами метасоматоза мантийного вещества, которые меняют физические свойства вещества, в частности уменьшают его сейсмические скорости. Например, в процессе лабораторных исследований показано, что под высоким давлением воды при температуре ~400–800°C, что характерно для континентальной литосферы на глубине около 100–150 км, происходит снижение скоростей продольных волн в дуните на 0.3 км/с (Лебедев и др., 2017). Это связано с физико-химическими преобразованиями структуры дунита: в нем образуются трещины, заполненные водой и серпентинитом.

Наиболее важным фактором формирования слоев пониженных скоростей является, по всей видимости, преобразование самих флюидов. При изменении степени трещиноватости пород происходит изменение физического состояния отдельных флюидных компонент: газовые компоненты переходят в жидкое состояние. При этом сконцентрированная в газах тепловая энергия выделяется с большой интенсивностью. В результате слои пониженных скоростей могут сформироваться и за счет увеличения температуры на этих P - T уровнях. При большом выделении тепловой энергии, связанной с переходом газовых флюидов в жидкость, могут даже образоваться слои частично расплавленного вещества (астенолиты).

На рис. 7 в схематичной форме показаны особенности адвекции глубинных флюидов в литосфере континентов. Флюидный поток, поднимающийся с больших глубин, неоднороден по интенсивности, однако, трудно сказать, каким образом он формируется и как преобразуется в нижней мантии. Более определенно можно судить лишь о характере флюидной адвекции в литосфере, изученной по данным лабораторных исследований. По этим данным интенсивность флюидного потока определяется, как отмечено выше, проницаемостью литосферы, меняющейся с глубиной, и физическим состоянием самих флюидов.

Проницаемость литосферы во многом зависит от ее структурной неоднородности и реологических свойств вещества. В этом плане литосфера четко подразделяется на два слоя с принципиально разным строением, и природа флюидной адвекции в этих слоях существенно разная. В нижней, более пластичной части литосферы наиболее интенсивные потоки флюидов связаны с зонами высоких напряжений. Флюиды на этих глубинах представлены газами с большой плотностью, и они мигрируют по зонам высоких напряжений на субмолекулярном уровне по расщепленным породам.

Верхняя, жесткая часть литосферы характеризуется повышенной пористостью, а глубинные разломы – высокой трещиноватостью. Это принципиальным образом меняет физическую природу миграции глубинных флюидов, свободно распространяющихся по порам и трещинам. Наиболее интенсивные потоки наблюдаются в сейсмофокальных зонах глубоких землетрясений на краях континентов (в так называемых зонах субдукции) и других шовных зонах между литосферными плитами.

Главное, как отмечалось выше, в пористом веществе при определенных *P-T* условиях отдельные компоненты глубинных флюидов переходят в жидкое состояние, выделяя при этом большой объем тепловой энергии. Эти процессы наиболее интенсивно протекают в зоне N, на подошве жесткой литосферы, где могут образовываться слои пониженных скоростей, представленные частично расплавленным веществом (астенолиты). В результате именно эти слои, а не астеносфера становятся основным источником тепловой энергии, обеспечивающей преобразования в земной коре и различные тектонические процессы.

Флюидной адвекцией можно объяснить и более глубокие сейсмические границы L и H. Очевидно, на глубине порядка 200 и 300 км тоже происходят физико-химические преобразования флюидов с выделением тепловой энергии. При этом образуются ослабленные слои, в которых возможно течение вещества, формирующее анизотропию скоростей, часто наблюдаемую на границе L. Кроме этого, повышенное содержание флюидов снижает температуру плавления пород, что может привести к частичному плавлению мантийного вещества на этих глубинах. Это подтверждается и данными по ксенолитам: статистика этих данных по кимберли-

товым провинциям Сибирского кратона (Соловьева и др., 1994) показала, что в кимберлитах, полученных с глубины описанных сейсмических границ, часто отмечаются следы пленочного плавления.

Следует отметить, что флюидная адвекция играет большую роль и в формировании плюмов, при этом принципиальным образом меняется природа плюмов. По существующим представлениям, образование плюмов происходит в результате тепловой конвекции, то есть в результате подъема с больших глубин разогретого вещества. Это длительный процесс, при котором большая часть энергии теряется при подъеме вещества. В сейсмической модели такой плюм должен выражаться в виде широкого и глубокого канала пониженных скоростей. Фактически плюмы выделяются по сейсмическим данным в верхних частях литосферы, как локальные скоростные аномалии. Именно такую форму имеют плюмы, созданные флюидной адвекцией, так как флюиды не теряют своей энергии в процессе миграции на больших глубинах и выделяют ее в верхних слоях литосферы. Происходит это, как показано выше, при смене реологических свойств литосферы, чаще всего, в слое N (рис. 7).

Таким образом, именно неравномерным по глубине выделением тепловой энергии флюидная адвекция и связанные с ней геодинамические процессы существенно отличаются от процессов обычной тепловой конвекции. Это дает возможность объяснить наблюдаемую расслоенность литосферы, природу сложных сейсмических границ и неравномерность изменения с глубиной температурного режима. Адвекцией глубинных энергоемких флюидов, возможно, объясняются и описанные выше расхождения между оценками мощности литосферы, полученными по сейсмическим материалам и по данным о тепловом потоке.

Проблема литосферы–астеносферы

Модель литосфера–астеносфера является основной для многих геотектонических концепций, особенно в тектонике литосферных плит. При этом важно знать, существует ли вообще такой слой, тем более сфера, способная обеспечить крупные перемещения литосферных плит (Eaton et al., 2009).

Как отмечалось выше, по сверхдлинным профилям, полученным российскими исследователями, астеносфера, как слой возможного частичного плавления и пониженных сейсмических скоростей, нигде не выделяется. Это характерно и для других континентов. По сейсмологическим данным, только по поверхностным волнам наблюдается понижение сейсмических скоростей в низах верхней мантии (Artemieva, Vinnik, 2016), однако уменьшение скорости начинается на глубине около 200 км, что совершенно не согласуется с данными по распространению продольных волн. Имеются единичные случаи выделения тонких слоев пониженных скоростей на глубине более 300 км по продольным и обменным волнам

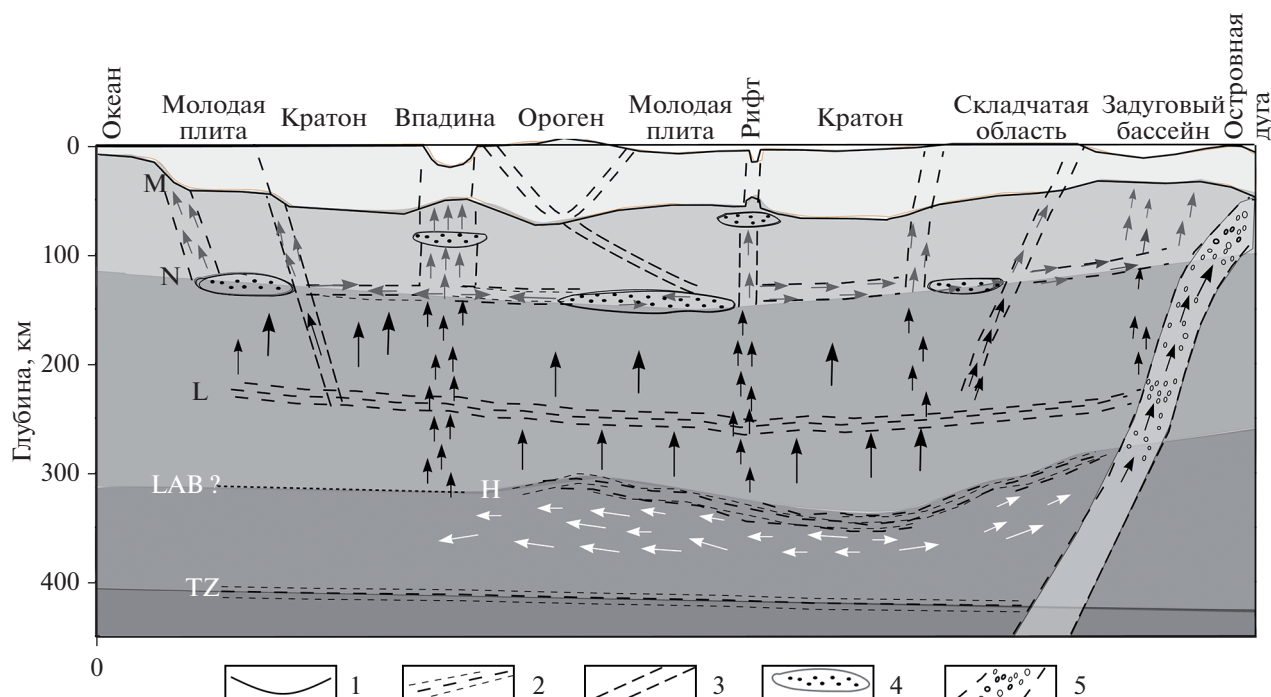


Рис. 7. Модель адвекции глубинных флюидов в верхней мантии.

1 – контуры консолидированной земной коры, 2 – сложно расслоенные сейсмические границы, 3 – глубинные нарушения, разломы, 4 – слои пониженных скоростей (волноводы), 5 – фокальная зона глубоких землетрясений, LAB – возможная подошва литосферы, TZ – кровля переходной зоны между верхней и нижней мантией. Более темными оттенками показано увеличение добротности вещества верхней мантии в трех ее основных слоях.

методом приемных функций (Vinnik, Farrg, 2007; Vinnik et al., 2009). По референтным скоростным моделям, например IASP-91 и АК-135, построенным тоже по сейсмологическим данным, в низах верхней мантии скорость продольных волн, напротив, резко возрастает от 8.6 до 9.1 км/с (Kennett, Engdahl, 1991) (рис. 4а). Это не согласуется со скоростной моделью для верхней мантии по сверхдлинным профилям, по которой на глубине более 300 км скорость не превышает 8.6 км/с (рис. 2).

Такая неопределенность в выделении астеносферы по сейсмологическим и сейсмическим данным может быть связана с ограниченными возможностями этих методов по определению скорости в слоях над резкими сейсмическими границами, в данном случае в слое над кровлей переходной зоны к нижней мантии (граница TZ на рис. 4). В сейсмологии построение скоростных моделей основано на интерпретации только первых волн, т.е. волны, проникающие на глубину более 250 км и регистрируемые только во вторых вступлениях (волны P_H на рис. 3), вообще не используются этим методом, и скорости в низах мантии фактически не определяются. В референтных моделях, построенных по первым волнам, приведено некоторое осреднение скоростей в этой “немой” зоне, и их значения оказались гораздо выше скоростей, определенных по ядерным взрывам. О том, что скорости в низах верхней мантии по референтным моделям действительно завышены, свидетельствуют и данные по опреде-

лению температуры в низах верхней мантии по референтной модели АК-135 (рис. 6). Полученная по ней изотерма рисует на глубине 200 км труднообъяснимый изгиб в сторону очень низких температур.

Достоверность определения скорости в низах верхней мантии по сверхдлинным профилям гораздо выше, чем по сейсмологическим данным, так как при этом используются не только первые вступления (преломленные волны), но и отраженные волны в последующих вступлениях (волны P_H и P_{410} на рис. 3). Из-за сложной записи этих многофазовых волновых профилей точность определения пластовой скорости между границами Н и Т невысокая, ± 0.2 км/с. Это означает, что в этих пределах скорость в низах верхней мантии может быть пониженной, но доказать этот факт пока не представляется возможным.

В целом утверждать отсутствие астеносферы под древними кратонами Евразии нет достаточных оснований. Можно только считать доказанным, что она не представлена мощным слоем частично расплавленного вещества (тепловой астеносферой). Это может быть слой пониженной вязкости. Выше уже отмечалось, что наличие такого слоя под Сибирским кратоном подтверждается величиной добротности, определенной по сейсмическим записям ядерных взрывов, и многочисленными данными по кимберлитам, глубина формирования которых даже в условиях более высокой температу-

ры в протерозое не превышала 230 км (рис. 6). Косвенными данными о глубине до астеносферы под континентами являются также данные о гипоцентрах глубоких землетрясений (рис. 4б), по которым отмечается практически полное исчезновение землетрясений на глубине 300 км.

Наличие слоя пониженной вязкости в низах верхней мантии Северной Евразии следует также из наблюдаемого изостатического выравнивания плотностной ее неоднородности. Выше отмечалось, что такое выравнивание происходит за счет прогиба границы N под разуплотненной литосферой Сибирского кратона (рис. 2). Это подтверждается также удивительно стабильной глубиной до границы T (подошвы верхней мантии) при высокой неоднородности ее верхней части.

Все эти косвенные данные свидетельствуют о наличии слоя повышенной пластичности и пониженной вязкости в низах верхней мантии, но остается неизвестным — какова структура этого слоя, меняется ли его мощность в зависимости от теплового потока и насколько резко меняются его физические параметры, по которым можно было бы определить глубину до подошвы литосферы. Такая неопределенность не позволяет оценить роль этого слоя в геодинамических процессах верхней мантии, например, определить возможности движения литосферных плит по этому слою. В этом плане может быть не следует называть такой слой астеносферой, за которым закрепилось общепринятое представление, как об энергетически емком слое частичного плавления.

Таким образом, несмотря на накопленный в последнее время геофизический материал по структуре верхней мантии и многочисленных данных по лабораторным исследованиям, полученных для вещества верхней мантии, проблема литосферы—астеносферы остается нерешенной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, детальные сейсмические исследования верхней мантии, выполненные на сверхдлинных профилях с использованием ядерных взрывов, выявили ряд необычных структурных особенностей континентальной верхней мантии и их несогласованность с интерпретацией данных, полученных другими геофизическими методами:

- предполагаемая по тепловому полю астеносфера не выделяется как слой пониженной сейсмической скорости;

- литосфера четко подразделяется на два слоя с разными петрофизическими особенностями, жесткий слой мощностью 100–150 км и более пластичный нижний слой;

- эти слои разделены сейсмическими границами и зонами пониженных скоростей (волноводами);

- выделены четкие сейсмические границы N, L и H на глубинах около 100, 200 и 300 км соответ-

ственно, характеризующиеся сложной внутренней структурой;

- нарушается прямая корреляционная связь между сейсмической неоднородностью верхней мантии и гравитационным полем.

Новые интересные результаты получены также и при лабораторном изучении мантийного вещества, в том числе глубинных флюидов:

- сейсмические скорости не зависят от состава мантийных пород, но плотность зависит, она резко уменьшается в деплетированном веществе;

- существенное влияние на скорости сейсмических волн оказывают реологические свойства вещества, степень его пластичности, пористости, трещиноватости и флюидонасыщенности;

- глубинные флюиды обладают высокой энергоемкостью и при резкой смене проницаемости вещества выделяют большое количество тепловой энергии. При этом происходят существенные изменения петрофизических свойств мантийного вещества.

Эти результаты лабораторных исследований мантийного вещества и глубинных флюидов позволяют объяснить большую часть перечисленных выше структурных особенностей верхней мантии и несогласованность этих особенностей с геофизическими полями.

Деление литосферы на два слоя с разными реологическими свойствами с формированием между ними переходной зоны с волноводами и сложно построенными сейсмическими границами можно объяснить влиянием дополнительного источника тепла, связанного с флюидной адвекцией (с дегазацией Земли). Так, на глубине 100–150 км, где меняются механические свойства вещества и увеличивается его пористость, происходят физико-химические преобразования глубинных флюидов, переход их газовых составляющих в жидкое состояние с выделением большого количества тепла. В результате формируются астенолиты (плюмы), возможно содержащие расплав, и увеличивается поверхностный тепловой поток. То есть тепловой поток характеризует в этом случае не глубину до астеносферы, а температурный режим верхов литосферы. Адвекция глубинных флюидов приводит к разделению и более глубокой части верхней мантии на отдельные слои с разными реологическими свойствами с формированием между ними сложно построенных сейсмических границ.

Многие выявленные особенности структуры верхней мантии могут быть объяснены большой ролью глубинных флюидов в преобразовании глубинного вещества. Энергоемкие потоки флюидов действуют неравномерно как во времени, так и в пространстве, что способствует формированию разных типов литосферы, в частности, мощной литосферы древних платформ, сложенной разуплотненным веществом. Тем самым объясняется соотношение контуров высокоскоростной мантии древних платформ с отрицательными аномалиями в поле силы тяжести.

Проблемой остается природа астеносферы. Это связано в большой мере с ограниченными возможностями сейсмических и сейсмологических методов, используемых для изучения строения низов верхней мантии, глубже 300 км. Лишь по косвенным данным можно предположить наличие в низах верхней мантии астеносферы как слоя пониженной вязкости. Какова природа пониженной вязкости такой астеносферы, связана ли она с частичным плавлением или с какими-то другими изменениями физического состояния вещества однозначно определить невозможно. Для изучения этой проблемы необходимо разрабатывать новые методы обработки сейсмических волновых полей разной природы и новую методологию комплексной интерпретации геофизических данных. Это касается, прежде всего, методов изучения физической природы температурного режима и механизма переноса вещества и энергии с больших глубин. Современные методы определения теплового режима верхней мантии основаны на кондуктивном или конвективном переносе тепловой энергии из астеносферы, и они не учитывают адвекцию энергоемких глубинных флюидов.

Благодарности. Автор благодарит О.Л. Кускова и его сотрудников, а также Е.Б. Лебедева за сотрудничество и за большую помощь в проведенных исследованиях.

Источники финансирования. Представленные исследования выполнены по Госзаданию ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Валяев Б.М., Дрёмин И.С. Дегазация Земли и природа процессов нефтегазонакопления (изотопно-геохимические и геодинамические аспекты) // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2015. № 2. С. 33–49.
- Глебовицкий В.А., Никитина Л.П., Хильтова В.Я. Термальное состояние мантии, подстилающей докембрийские и фанерозойские структуры (по данным гранат-ортопироксеновой термобарометрии ксенолитов гранатовых перидотитов в кимберлитах и щелочных базальтах) // Физика Земли. 2001. № 3. С. 3–25.
- Гордиенко В.В. О природе аномалий скорости продольных сейсмических волн в верхней мантии // Геофизический журнал. 2010. № 3. С. 43–63.
- Грачев А.Ф., Кабан М.К. О причинах высокого стояния Сибирской платформы // Физика Земли. 2006. № 12. С. 20–33.
- Егоркин А.В. Строение мантии Сибирской платформы // Физика Земли. 2004. № 5. С. 37–46.
- Егоркин А.В., Кун В.В., Чернышев Н.М. Поглощение продольных и поперечных волн в коре и верхней мантии Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 2. С. 37–50.
- Егорова Т.П., Павленкова Г.А. Сейсмо-плотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям “Кварц”, “Кратон” и “Кимберлит” // Физика Земли. 2015. № 2. С. 98–115.
- Кронрод В.А., Кусков О.Л. Моделирование термической структуры континентальной литосферы // Физика Земли. 2007. № 1. С. 96–107.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А. Состав, температура и мощность литосферы архейского кратона Каапвааль // Физика Земли. 2007. № 1. С. 45–66.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А., Павленкова Н.И. Петролого-геофизические модели внутреннего строения литосферной мантии Сибирского кратона // Петрология. 2014. Т. 22. № 1. С. 21–49.
- Лебедев Е.Б., Кадик А.А., Зебрин А.М., Дорман А.М. Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн глубинных пород // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 5. С. 1090–1093.
- Лебедев Е.Б., Павленкова Н.И., Луканин О.А. Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн в дуните и серпентините (к вопросу о природе зоны низких скоростей в верхней мантии Земли) // Докл. АН. 2017. Т. 472. № 1. С. 1–4.
- Летников Ф.А. Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования // Смирновский сборник-99 (научно-литературный альманах). Москва. 1999. С. 63–98.
- Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 12. С. 1296–1307.
- Павленкова Н.И. Реологические свойства верхней мантии Северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. С. 1287–1301.
- Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М.: Изд. ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2014. 192 с.
- Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988. 192 с.
- Соловьева Л.В., Владимиров Б.М., Днепровская Л.В. и др. Кимберлиты и кимберлитовые породы; вещество верхней мантии под древними платформами. Новосибирск: Сибирская издательская фирма “Наука”, 1994. 256 с.
- Свороткин В.М. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО “Геоинформцентр”, 2002. 250 с.
- Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res. 2001. V. 106 (B8). P. 16 387–16 414.
- Artemieva I.M., Vinnik L.P. Density structure of cratonic mantle in southern Africa: 1. Implication for dynamic topography // Gondwana Res. 2016. V. 39. P. 204–216.
- Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladyskin N.V. et al. Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study // Tectonophysics. 2010. V. 485. P. 17–41.
- Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Pearson D.G. et al. Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths // Contrib. Mineral. Petrol. 1997. V. 128. P. 228–246.
- Cammarano F., Romanowicz B., Stixrude L. et al. Inferring the thermochemical structure of the upper mantle from seismic data // Geophys. J. Internat. 2009. V. 179. P. 1169–1185.
- Doncet L.S., Peslier A.H., Ionov D.A. et al. High water contents in the Siberian cratonic mantle linked to metasomatism an FTIR study of Udachnaya peridotite xenoliths // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. V. 137. P. 159–187.
- Eaton D.W., Darbyshire F., Evans R.L. et al. The elusive lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath cratons // Lithos. 2009. V. 109. P. 1–22.
- Egorkin A.V., Chernyshov N.M. Peculiarities of mantle waves from long-range profiles // J. Geophys. 1983. V. 54. P. 30–34.

- Gilat A., Vol A.* Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes // *HAIT J. Science and Engineering B.* 2005. V. 2. Iss. 1–2. P. 125–167.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Abe N. et al.* The origin and evolution of Archean lithospheric mantle // *Precamb. Res.* 2003. V. 127. P. 19–41.
- Heit B., Sodoudi F., Yuan X., Biandui M., Kind R.* An S receiver function analysis of the lithosphere structure in South America // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L14307. <https://doi.org/10.1029/2007GL030317>
- Ionov D.A., Doucet L.S., Ashchepkov I.V.* Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East kimberlite // *J. Petrol.* 2010. V. 51. P. 2177–2210.
- Jones A.G., Evans R.L., Eaton D.W.* Velocity–conductivity relationships for mantle mineral assemblages in Archean cratonic lithosphere based on a review of laboratory data and Hashin–Shtrikman extremal bounds // *Lithos.* 2009. V. 109. P. 131–143.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R.* Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Internat.* 1991. V. 105. P. 429–465.
- Kern H.M.* Physical properties of crustal and upper mantle rocks with regards to lithosphere dynamics and high pressure mineralogy // *Phys. Earth Planet. Int.* 1993. V. 79. P. 113–136.
- Koulakov I., Bushenkova N.* Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on regional tomographic inversion of P and PP travel times // *Tectonophys.* 2010. V. 486. P. 81–100.
- Lambert I.B., Wyllie P.J.* Low-velocity zone of the Earth's mantle: incipient melting caused by water // *Science.* 1970. V. 169. P. 764–766.
- O'Reilly S.Y., Griffin W.L.* Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications // *Tectonophys.* 2006. V. 416. P. 289–309.
- Oreshin S., Vinnik L., Makeyeva L. et al.* Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 151. P. 393–402.
- Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set // *Rev. Geophys.* 1993. V. 31. P. 267–280.
- Thybo H., Perchuc E.* The seismic 8° discontinuity and partial melting in continental mantle // *Science.* 1997. V. 275. P. 1626–1629.
- Vinnik L., Farra V.* Low S velocity at top the 410-km discontinuity and mantle plumes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 262(3–4). P. 398–412.
- Vinnik L., Oreshin S., Kosarev G. et al.* Mantle anomalies beneath southern Africa: evidence from seismic S and P receiver functions // *Geophys. J. Int.* 2009. V. 179(1). P. 279–298.
- Walter M.J.* Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere // *J. Petrol.* 1998. V. 39. P. 29–60.
- Williams Q., Hemley R.J.* Hydrogen in the deep Earth // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2001. V. 29. P. 365–418.

Petrophysical Features of the Upper Mantle Structure of Northern Eurasia and Their Nature

N. I. Pavlenkova[#]

O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

[#]*e-mail: ninapav@mail.ru*

Deep seismic studies of the upper mantle conducted in Russia with nuclear explosions and laboratory studies of mantle matter at high pressure and temperature revealed new structural and petrophysical features of the upper mantle of Northern Eurasia, which can be hardly explained by the modern concepts of the continental lithosphere's structure. For example, in the region of the asthenosphere assumed by the thermal field, the corresponding decrease of seismic velocities has not observed, but the lower velocity layers are revealed inside the lithosphere at the depth of 100–150 km. However, the asthenosphere may be distinguished by the structural features of seismic boundaries. That means it is represented by a layer of increased plasticity without the partial melting. The laboratory studies have shown that seismic velocities do not depend on the composition of mantle rocks and are determined mainly by temperature. This made it possible to determine the temperature regime of the upper mantle from the seismic data. The calculations carried out on this basis showed that the lithosphere thickness is stable under the Siberian craton and it is 300–350 km. These data do not correspond to the result of the lithosphere bottom's determination by the heat flow. This discrepancy may be explained by the greater influence of the deep fluids on the heat flows and the petrophysical parameters of the mantle rocks. At the depths where the rock's mechanical properties are changing and increasing of its porosity, the deep fluids density is decreasing and they produce a large amount of heat. As a result, the low velocity layers (plumes) with a possible partial melt are formed and the surface heat flow is increased. This explains the formation of low velocity layers at the depth of 100–150 km and the differences in the temperatures determined from the seismic data and the heat flow. Deep fluids also initiate physical and chemical transformations of the mantle matter, for instance, the formation of depleted matter of reduced density at a constant velocity. Such violation of the linear relationship between velocity and density is observed by the complex interpretation of seismic and gravimetric data. The physico-chemical transformations of matter in the areas of deep fluids concentration can also explain the formation of the complex reflective boundaries observed in the lithosphere.

Keywords: lithosphere, asthenosphere, petrophysics, deep fluids, seismic boundaries, layers of lower velocities