

## Тектоносфера Земли – новое видение

Ю. М. Пушаровский

Геологический институт РАН (ГИН РАН)

**Аннотация.** В настоящее время тектоносфера, как область проявления тектонических движений, ограничивается верхней мантией, т.е. глубинным уровнем 670 км. Более глубокие геосферы представляются тектонически инертными. В статье показано, что тектоносфера охватывает всю мантию, вплоть до ее границы с земным ядром (глубина 2900 км). Основой для этого служит анализ неоднородностей, выявленных сейсмотомографией. Высоко-скоростные неоднородности, прослеживаемые по латерали, интерпретируются как зоны тектонического нагнетания (скупивания) масс, происходящего вследствие движения последних по субгоризонтальным срывам или в результате процессов тектонического течения. Предлагаемые построения существенно меняют представления о кинематике глубин Земли.

Термин “тектоносфера” используется в геологической литературе в течение нескольких десятилетий, но при этом вкладываемый в него смысл в разных изданиях разный. Проиллюстрируем это определениями, содержащимися в ряде словарей.

В словаре английских геологических терминов, напечатанном в 1972 г. и переведенном на русский язык в 1979 г. [*Толковый словарь...*, 1979], сказано, что тектоносфера соответствует земной коре и состоит из сиалического, салсиматического и симатического слоев.

В отечественном геологическом словаре, изданном в 1978 г. [*Геологический словарь*, 1978], дается более широкое определение термина, а именно – это верхняя оболочка Земли, охватывающая земную кору и верхнюю мантию.

В словаре тектонической терминологии, составленном Ч. Б. Борукаевым и вышедшем в свет в 1999 г. дается два значения термина: “Тектоносфера: 1. Геосфера, состоящая из литосферы и астеносферы, являющаяся главной областью проявления тектонических процессов; 2. Геосфера, которая может рассматриваться как единая плита, сминающаяся дисгармонично по отношению к астеносфере” [*Борукаев*, 1999, с. 14].

Все же наиболее распространенным пониманием термина в настоящее время является то, что это область Земли, охватывающая земную кору и верхнюю мантию. О более глубоких геосферах речь

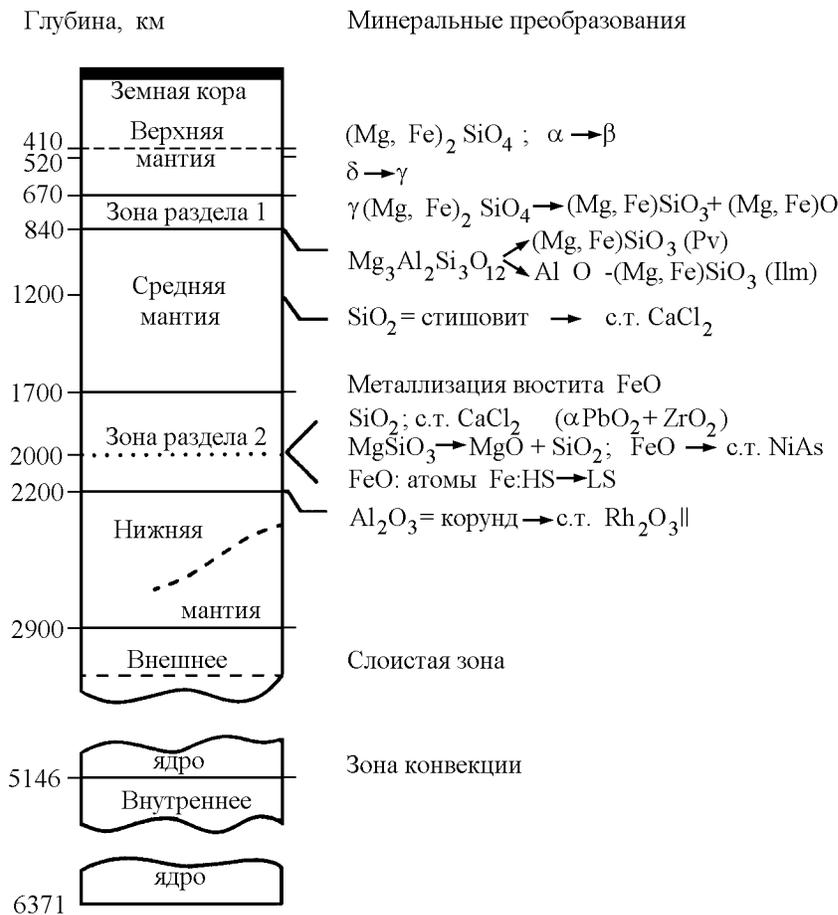
вообще никогда не шла. Представляется, однако, что современные данные, прежде всего геофизические (сейсмотомография), позволяют рассматривать в качестве тектоносферы мантию Земли в ее полном объеме, т.е. до границы ядро–мантия, находящейся на глубине 2900 км. Рассмотрению данного вопроса и посвящена предлагаемая статья.

По элементарной логике тектоносферой следует называть ту часть земного шара, где существуют тектонические структуры, порожденные тектоническими движениями. То, что в эту область входит земная кора, не нуждается в доказательствах. Важно, что некоторые структуры коры распространяются в верхнюю мантию. К их числу принадлежат, например, отдельные разломы, выявленные в океанах. В Атлантическом океане это разломы Романш, Чарли Гиббс, Агульяс-Фолклендский; в Индийском – разломы Амстердам, Оуэн, Принс Эдвард; в Тихом океане – разлом Элтанн. Все они разделяют обширные области океанского дна, отличающиеся структурой, историей развития, геодинамическими особенностями. Они получили название “демаркационных” [*Пушаровский*, 1994]. Подобные разломы проявлены и на суше. Один из примеров – Трансджунгарская разломная зона, являющаяся трансформным разделом океанических палеоструктур на протяжении 100 млн лет (ранний девон–середина среднего карбона) [*Самыгин и др.*, 1996]. Судя по продольному глубинному профилю Срединно-Атлантического хребта [*Zhang et al.*, 1994], проникновение разлома Чарли Гиббс (52° с.ш.), отделяющего тектонически разные области Центральной и Северной Атлантики, достигает 200 км. Наряду с этим известны общие для земной коры и верхов мантии надвиговые структуры.

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00031.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 декабря 1998.  
URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00031/RJE00031.htm>



**Рис. 1.** Модель строения Земли.

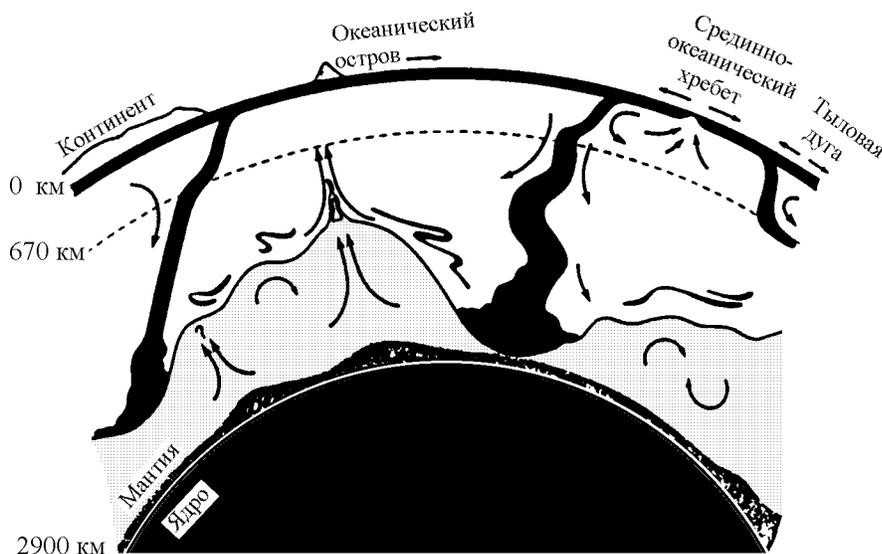
Обозначения: с.т. – структурный тип; Pv – перовскит; Ilm – ильменит; HS – высокоспиновое состояние; LS – низкоспиновое состояние; пунктирные линии – внутригеосферные рубежи [Пуцаровский, Пуцаровский, 1999].

Более глубокие тектонические процессы в верхней мантии обосновываются глубиной корней континентов. Последние фиксируются сейсмотомографией и отражаются в виде ареалов относительно высокоскоростных сейсмоаномалий. Соответствующие данные приводятся в ряде публикаций. Если ориентироваться на работу [Polet and Anderson, 1995], то глубина корней под Западной Европой и Северо-Западной Африкой превышает 450 км; под Северной Америкой (Канада) и Северной Азией – 350 км; минимальная глубина под Центральной Африкой и Индией – около 100 км; под Южной Африкой и Антарктидой ~300 км; под Западной Австралией и Южной Америкой (Бразилия) соответственно 250 и 200 км. Как корни гор в Андах, Тибете, на Памире и во всех других местах рассматриваются в качестве нижних составных частей соответствующих морфотектонических образований, так и корни континентов должны пониматься как неотъемлемая часть последних. Поскольку континенты (вместе с корнями)

являются тектоническими единицами, естественно, они ассоциируются с тектоносферой.

Некоторые авторы утверждают, что корни континентов достигают в некоторых районах нижней границы верхней мантии, т.е. глубины 670 км [Pavlenkova, 1995 и др.]. На этом основании можно принять, что тектоносфера охватывает верхнюю мантию целиком.

Чтобы перейти к тектонике более глубоких областей мантии, необходимо предварительно коснуться строения и геодинамики Земли вообще. Сейсмотомографические данные свидетельствуют о больших неоднородностях в строении мантии, разномастных и выраженных с разной степенью интенсивности и контрастности. Анализ их распространения позволил предложить более дробное разделение мантии на геосферы, чем деление ее только на верхнюю и нижнюю [Пуцаровский, Пуцаровский, 1999]. Новое расчленение (рис. 1) фиксирует в ней шесть геосфер. Верхняя мантия геофизиче-



**Рис. 2.** Диаграмма глубинной мантийной динамики [Becker et al., 1999]. Видны сложные мантийные массопотоки. Другие пояснения в тексте.

ским разделом на уровне 410 км разделяется на верхнюю и нижнюю части. Ее нижняя граница 670 км. Глубже простирается геосфера, разделяющая верхнюю и среднюю мантию (зона раздела I), мощностью 170 км.<sup>1</sup> Средней мантии соответствует геосфера, заключенная между уровнями 840 км и 1700 км. Еще глубже лежит зона раздела II, разграничивающая среднюю и нижнюю мантию: ее мощность 500 км. От уровня 2200 км до земного ядра, лежащего на глубине 2900 км, простирается нижняя мантия. Так называемый слой D'' составляет ее нижнюю часть. Возможно, что принципиальный сейсмический рубеж существует на уровне 2000 км. Но определенность в это внесут будущие исследования.

Как же соотносятся глубинные рубежи, выделенные по данным сейсмологии с рубежами глубинных минеральных преобразований?

Начнем с сейсмического раздела "670". Соответствующие эксперименты многим исследователям позволили заключить, что на этом рубеже шпинеллоподобный рингвидит трансформируется в ассоциацию железо-магниевого перовскита и магнезиовюстита. На рубеже 850–900 км пироп (магнезио-алюминиевый силикат) преобразуется в ромбический перовскит (железо-магний силикат) и твердый раствор корунд-ильменита. На рубеже "1700" происходят изменения многих свойств различных кристаллов. На глубинах 2000 км фиксируется образование плотных модификаций кремнезема. С этого

<sup>1</sup>Здесь и ниже мощности и границы геосфер могут отклоняться на несколько процентов.

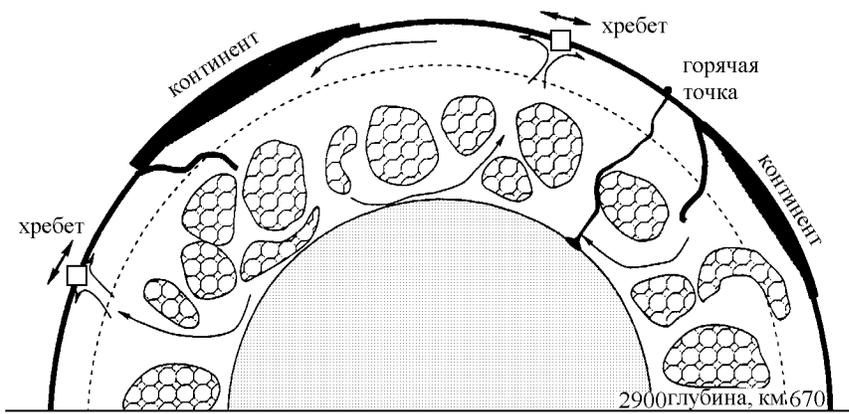
же уровня начинаются структурные изменения вюстита. На глубинах 2200–2300 км происходит структурная трансформация корунда.

Можно видеть, что между главными сейсмическими рубежами и рубежами минеральных преобразований имеется хорошее согласование. Конкретно это относится к глубинам 670, 840, 1700, 2000, 2200–2300 км, а также 410 и 520 км.

Вместе с тем, некоторые минералы ведут себя весьма устойчиво в широком диапазоне глубин. К ним относятся Mg-перовскит; вюстит. Произведенный подсчет показал, что Mg-перовскит составляет почти половину массы Земли [Liu, 1982].

Предложенная схема расчленения мантии создает эмпирическую предпосылку для дифференцированного рассмотрения геодинамики геосфер. Судя по особенностям распределения ареалов сейсмоаномалий, геодинамические обстановки в геосферах существенно изменчивы. Основных причин, меняющих глубинные силовые поля и поля напряжений (т.е. геодинамические обстановки) имеется в нашем представлении две, а именно конвективные и адвективные процессы, с одной стороны, и тектонические стрессы, с другой. В настоящее время многие авторы уже отошли от стандартных плиттктонических схем глубинной конвекции, предпочитая гораздо более сложную кинематику. Особенно об этом говорится в публикациях геохимического профиля. Рассмотрим два соответствующих примера, относящихся к 1999 г.

На рис. 2 приведена модель глубинных потоков, заимствованная из работы [Becker et al., 1999]. В



**Рис. 3.** Схема глубинной конвекции в мантии [Kellogg *et al.*, 1999]. Стрелками отображены сложные конвективные движения. В округлых контурах показаны массы примитивного вещества (blobs). Преимущественно они располагаются в ядрах конвективных ячеек. Черные утолщенные полосы, идущие в глубину от краев континентов, – пути проникновения слэбов.

основании мантии показан слой  $D''$ , мощность которого меняется в пределах сотен километров. Над ним залегает слой повышенной плотности с резко разноуровневой верхней поверхностью. По мнению авторов, этот слой деформирован устремленными вниз массопотоками. Таковых показано три. Один из них опускается из центральной области океана; два другие (разноуровневые) – из зоны сочленения океан–континент. Между нисходящими потоками показан плюм, поднимающийся до глубины 670 км, т.е. до верхней мантии. Не очень ясно, связан ли с ним изображенный в океане вулканический остров. В правой части модели можно видеть верхнемантийный поток, венчающийся срединно-океаническим хребтом. Стрелками показаны направления движения материала, а волнистыми полосками – его растекание. Как видно, движение глубинных масс представляется весьма сложным.

То же видно и на другой модели [Kellogg *et al.*, 1999]. Она получила название blob model (рис. 3). Отмечая, что модель расслоенной конвекции в мантии находится в противоречии с геофизическими данными, авторы полагают, что в нижней мантии распространены крупные разрозненные массы примитивного вещества (blobs), имеющие расплывчатые границы. Они включены в низкоскоростную мантию, в которой происходят сложные конвективные процессы и располагаются в центре конвективных ячеек.

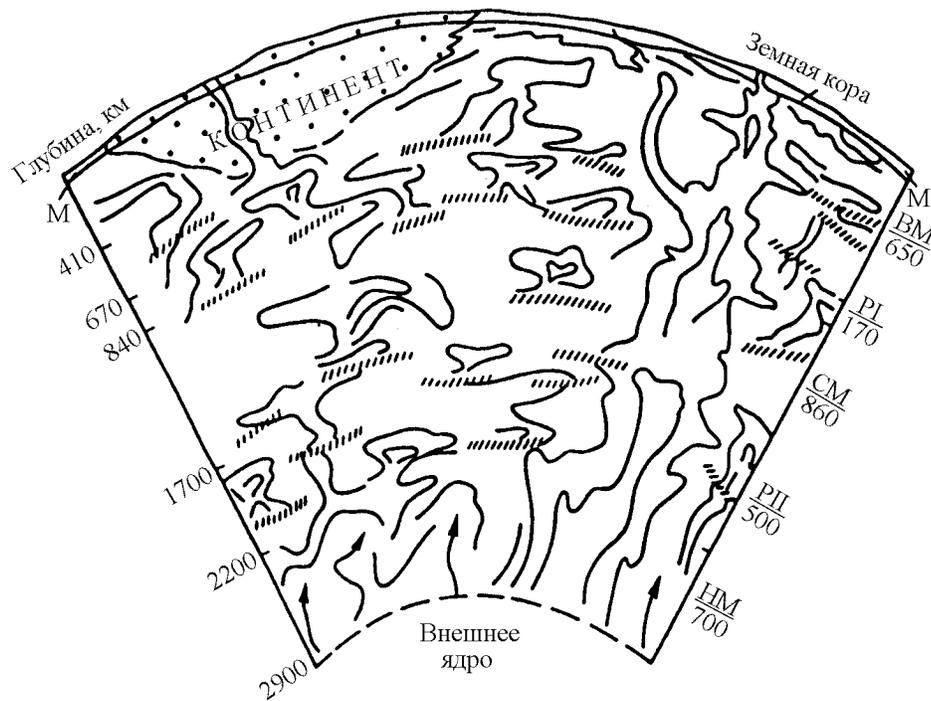
В публикации высказывается идея, что поднимающиеся от ядра плюмы могут соприкоснуться с упомянутыми массами, что в конце концов приведет к гетерогенности изотопных источников базальтов океанических островов.

Для нас обе модели представляют интерес в том

отношении, что они отходят от господствующих слишком упрощенных представлений о формах мантийной конвекции. Модели допускают сложное распределение конвективных потоков. То, что рисовка одно- или двухъярусных правильных конвективных ячеек в мантии противоречит картине глубинных неоднородностей, выявленных сейсмотомографией, автору этих строк ясно уже давно. Отсюда и построение принципиально новой модели мантийных конвективных потоков, в основе которой лежит два момента: новая (шестигеосферная) модель строения мантии и методология нелинейной геодинамики [Пуцаровский, 1996, 1998]. Впоследствии первичная схема была несколько усложнена (рис. 4). Учитывая большую пестроту в распределении сейсмонеоднородностей, можно можно прийти к заключению о большой сложности строения и распространения мантийных конвективных систем, а также об их разномасштабности и контрастности проявления. Общий вывод таков, что это внутригеосферные самоорганизующиеся системы, индуцированные разноглубинными энергетическими импульсами.

Итак, глубинный материал находится отнюдь не в стабильном состоянии, а в движении. О вертикальной составляющей этого движения вряд ли необходимо специально говорить, поскольку представления о ней широко признаны. Обратимся к горизонтальной составляющей, в отношении которой, кроме публикаций автора и его коллектива, разработок пока нет.

Изменчивость вязкостных свойств вещества геосфер по латерали, на что указывают сейсмонеоднородности, понимается нами как следствие субгоризонтального нагнетания масс в одних местах (высокоскоростные аномалии) и их оттока и разуплотне-



**Рис. 4.** Модель конвективного и адвективного движения мантийных масс [Пуцаровский, Пуцаровский, 1999]. В правой части показан сквозьмантийный плюм. Штриховые полосы – зоны тектонического течения или срыва; по ним могут возникать локальные энергетические потоки, возбуждающие конвективное и адвективное движение мантийных масс. М – раздел Мохоровичича; ВМ – верхняя мантия; PI – зона раздела I; СМ – средняя мантия; PII – зона раздела II; НМ – нижняя мантия. Цифры в знаменателе – мощность геосфер, км (могут варьировать до  $\pm 10\%$ ). Стрелки отражают зону влияния ядра в низах мантии (слой D'').

ния – в других (низкоскоростные аномалии). И то, и другое легко увязывается с конвективными процессами. Но механизм нагнетания и оттока масс присущ, как известно, самым верхним геосферам, где он связывается с тектоническими движениями. Следствием является образование зон тектонического сжатия, с одной стороны, и структур растяжения, с другой. Именно этот механизм лежит в основе тектоно-геодинамической концепции, получившей название “тектоническая расслоенность литосферы” [Тектоническая расслоенность литосферы..., 1990]. Покровной тектонике придается при этом решающее значение.

Принципиально важную работу в этом смысле выполнил недавно А. И. Суворов [Суворов, 2000]. Для обширной территории Северной Евразии им проанализированы изменения мощностей различных слоев земной коры и подстилающей ее литосферы. Он показал, что раздувы мощностей разных слоев адекватны структурам тектонического сжатия, а уменьшенные – зонам оттока материала.

Для нас особенное значение имеют данные о пери-

одитовой литосфере, подстилающей земную кору. В ней выделяется две крупных зоны вздутия (увеличенных мощностей), длиной 4,5–5 тыс. км и шириной 2–2,5 тыс. км и примыкающие к ним депрессионные зоны несколько меньших размеров, где мощности существенно меньше. В первом случае мощности могут достигать многих десятков километров, а местами значительно превышать 100 км. Во втором случае они варьируют в интервале 30–65 км. Увеличенные мощности относятся к древним платформам и палеозоидам; уменьшенные – к Карпатам, Кавказу, Западной Сибири, тихоокеанским регионам. Такое распределение мощностей А. И. Суворов рассматривает как результат тектонического перемещения масс в геодинамических обстановках сжатия–растяжения, с образованием парагенеза: фронтальное поднятие – тыловая депрессия. Амплитуда горизонтального движения масс под Восточно-Европейской и Сибирской платформами по А. И. Суворову составляет не менее 2 тыс. км.

Приведенные выкладки весьма важны для нашей работы, поскольку в известной мере могут быть пе-

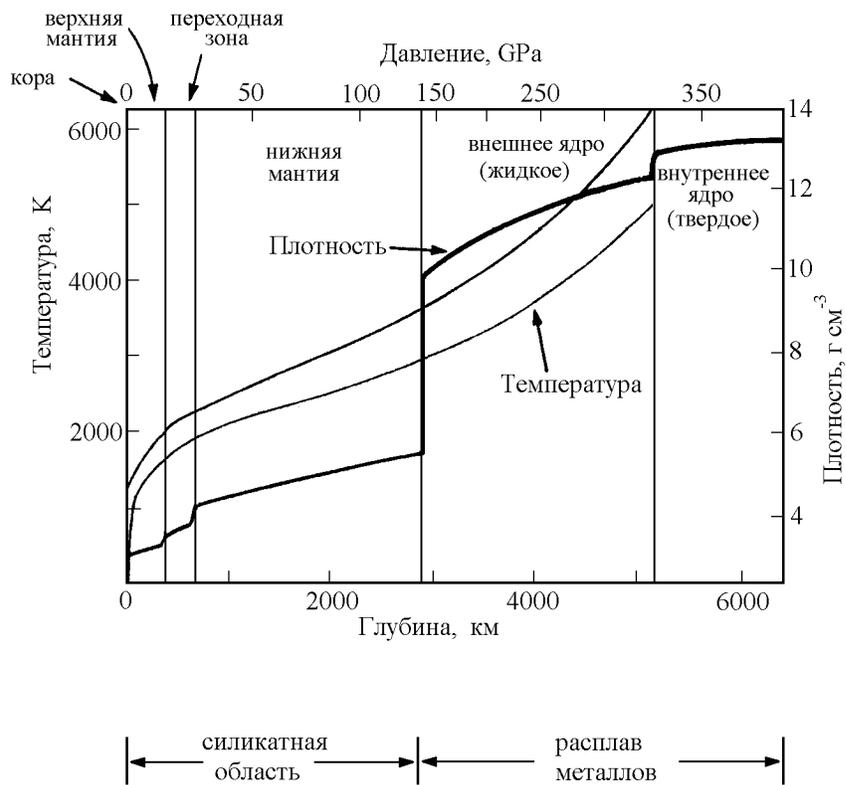


Рис. 5. Графики давления, температуры и плотности в земном шаре [Navrotsky, 1987].

ренесены на глубокие мантийные геосферы. С целью более ясного представления о тектонике глубинных геосфер, остановимся на физических параметрах внутренних областей земного шара, используя при этом графики А. Навротски [Navrotsky, 1987] (рис. 5). Температурные изменения с глубиной происходят следующим образом: на уровне 410 км температура приближается к  $2000^{\circ}\text{K}$ ; на 670 км –  $2200^{\circ}\text{K}$ ; на границе мантия–ядро  $\sim 3000^{\circ}\text{K}$ ; на границе внешнего и внутреннего ядра  $\sim 5300^{\circ}\text{K}$ ; в центре Земли она достигает почти  $6000^{\circ}$ .

Что касается давления, то в интервале глубин 0–1250 км оно изменяется в пределах 0–50 ГПа; далее до границы мантия–ядро давление возрастает  $\sim$  до 140 ГПа; на границе внешнее ядро–внутреннее ядро (5200 км) достигает 325 ГПа; на глубине  $\sim 5500$  км – 350 ГПа, продолжая расти к центру Земли. Таким образом, нижняя граница допускаемых нами глубинных тектонических процессов лежит в пределах  $3000^{\circ}\text{K}$  и 140 ГПа. На нижней границе верхней мантии (670 км) температура лишь в 1,4 раза ниже, хотя давление меньше в 4,5 раза. Но как бы то ни было, приведенные данные не служат ограничениями для существования тектонических движений в глубинах мантии. О том же свидетельствует и кривая плот-

ности, показанная на приведенном рисунке.

Латеральное нагнетание масс, о котором в нашем случае идет речь, предполагает, насколько сейчас можно судить, движение по тектоническим срывам (надвигам, сдвигам), а также в виде тектонического течения. Это последнее понятие используется весьма широко и поэтому необходимо уточнить смысл, придаваемый ему в данной работе.

Тектонические движения вообще фиксируются по структурным формам, которые ими создаются. Масштабы и характер их проявления весьма различны (движение континентов, сводообразование, покровная тектоника, многообразие складчатых и разрывных деформаций и пр.). Тектоническим течением в данной работе обозначаются такие движения, которые проявляются на микроуровне, создавая структурные формы, не фиксируемые визуально. Можно сказать иначе – что это латеральное (сублатеральное) перемещение малых масс геосферного материала, сопровождающееся тектоническим структурообразованием.

Мантийные геосферы, как теперь можно утверждать, геодинамически представляют открытые неравновесные системы, в пределах которых под воздействием спонтанных энергетических факторов

могут возникать закритические состояния, круто меняющие ход конвективных процессов и тектонических преобразований. При этом могут возникать значительные зоны проскальзывания масс, более или менее разогретые и в соответствующих условиях становящиеся даже источниками автономных энергетических импульсов, влекущих новообразования конвективных ячеек и перестройку внутригеосферных тектонических соотношений [Пуцаровский, 1998; Пуцаровский, Пуцаровский, 1999]. В мантии Земли ничто не ограничивает такие возможности.

Здесь мы подходим к главному выводу проведенного анализа, который состоит в следующем. Тектоносферой является вся область земного шара, в пределах которой происходят тектонические движения, фиксируемые тектоническими деформациями. Такими процессами охвачены все геосферы коры и мантии Земли, в связи с чем понятие “тектоносфера” охватывает всю область планеты, лежащую выше ее ядра. Жидкое внешнее ядро не может к ней относиться по определению.

## Литература

- Борукаев Ч. Б., *Словарь-справочник по современной тектонической терминологии*, 71 с., Издат. СО РАН НИЦ ОИ ГГМ, Новосибирск, 1999.
- Геологический словарь*, т. 2, 456 с., Недра, Москва, 1978.
- Пуцаровский Ю. М., Демаркационные разломы в океанах как особая категория тектонических разделов, *Докл. АН*, 335, (5), 616–620, 1994.
- Пуцаровский Ю. М., Сейсмотомография и структура мантии, тектонический ракурс, *Докл. АН*, 351, (6), 806–809, 1996.
- Пуцаровский Ю. М., Сейсмотомография, тектоника и глубинная геодинамика, *Докл. АН*, 360, (4), 518–522, 1998.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю., Геосферы мантии Земли, *Геотектоника*, (1), 3–14, 1999.
- Самыгин С. Г., Руженцев С. В., Поспелов И. И. и др., Варисская трансформная зона Джунгарии: опыт выделения, *Тектонические и геодинамические феномены*, с. 196–222, Наука, Москва, 1996.
- Суворов А. И., *Тектоническая расслоенность и тектонические движения в континентальной литосфере*, 2000, (в печати).
- Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования*, 294 с., Наука, Москва, 1990.
- Толковый словарь английских геологических терминов*, Т. 3, 544 с., Мир, Москва, 1979.
- Becker T. W., Kellogg J. B., and O'Connell R. J., Thermal constraints on the survival of primitive blobs in the lower mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 171, (3), 351–365, 1999.
- Kellogg L. H., Hager B. H., and van der Hilst R. D., Compositional stratification in the deep mantle, *Science*, 283, (5409), 1881–1884, 1999.
- Liu L.-G., Chemical inhomogeneity of the mantle: geochemical considerations, *Geophys. Res. Lett.*, 9, (2), 124–126, 1982.
- Navrotsky A., High pressure transitions in silicates, *Progr. Solid St. Chem.*, 17, 53–86, 1987.
- Pavlenkova N. I., Structural regularities in the lithosphere of continents and plate tectonic, *Tectonophysics*, 243, (3–4), 223–239, 1995.
- Polet J., and Anderson D. L., Depth extent of cratons as inferred from tomographic studies, *Geology*, 23, (3), 205–208, 1995.
- Yu-Shen Zhang, Tanimoto T., and Stolper E. M., S-wave velocity basalt chemistry and bathymetry along the Mid-Atlantic Ridge, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 84, (1–4), 79–93, 1994.

(Поступила в редакцию 15 января 2000.)