

Когда, как и почему образовались геосферы Земли

Ю.М.Пуцаровский, Д.Ю.Пуцаровский

В нашу научную и, более того, повседневную жизнь широко проникли такие термины, как «атмосфера», «гидросфера», «биосфера»... Но есть еще и термин «геосфера». Земной шар состоит из ядра и оболочек, как раз и именуемых геосферами [1]. Традиционно считается, что между земной корой, толщина которой под океанами не более нескольких километров, а под континентами — несколько десятков километров, и ядром имеются две геосферы: верхняя и нижняя мантии. Граница между ними проводится на глубине 670 км. Зона раздела нижней мантии и ядра Земли находится на глубинах 2700—2900 км. Ядро также делится на две геосферы: внешнее ядро и внутреннее ядро. Раздел между ними проходит на уровне 5146 км, а глубина центра планеты составляет 6370 км.

Сейсмические данные

Все приведенные сведения основаны на результатах сейсмических исследований. Но с течением времени сейсмические методы совершенствовались и в дополнение к выделенным глобальным и промежуточным границам начали публиковаться карты сейсмических неоднородностей для разных глубинных уровней Земли. На картах, представленных А.Дзевонски и



Юрий Михайлович Пуцаровский, академик РАН, советник РАН, руководитель группы тектоники океанов и морей Геологического института РАН, крупный специалист в области общей и региональной тектоники. Председатель секции геологии, геофизики, геохимии Научного совета РАН по проблемам Мирового океана. Лауреат Государственных премий СССР (1969) и Российской Федерации (1995), Золотой медали им.А.П.Карпинского и премии его имени.



Дмитрий Юрьевич Пуцаровский, академик РАН, профессор кафедры кристаллографии и кристаллохимии и декан геологического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структурная минералогия и кристаллохимия. Заслуженный деятель науки РФ (2004). Лауреат Ломоносовской премии (2001) и медали им. Ф.Бекке австрийского Минералогического общества (2005).

В самом конце этого года Юрию Михайловичу Пуцаровскому, возглавлявшему более 20 лет отдел наук о Земле журнала «Природа», исполнится 95 лет. Юрий Михайлович до сих пор тесно сотрудничает с нашим журналом. Редакция и редакционная коллегия «Природы» желают ему доброго здоровья, новых успехов в научной деятельности и пропаганде достижений российской науки.

Дж.Вудхаузом на XXVIII Международном геологическом конгрессе в 1989 г., отразились высокоскоростные и низкоскоростные ареалы сейсмических волн (рис.1). Возникла возможность представить аномальные области в объеме и построить их профильные разрезы. Это

можно расценивать как прорыв в эмпирических сведениях о земных глубинах.

Аномальные участки с физической точки зрения естественно интерпретировать как разновязкостные массы: соответственно высокоскоростные — как высоковязкостные, а низкоскорост-

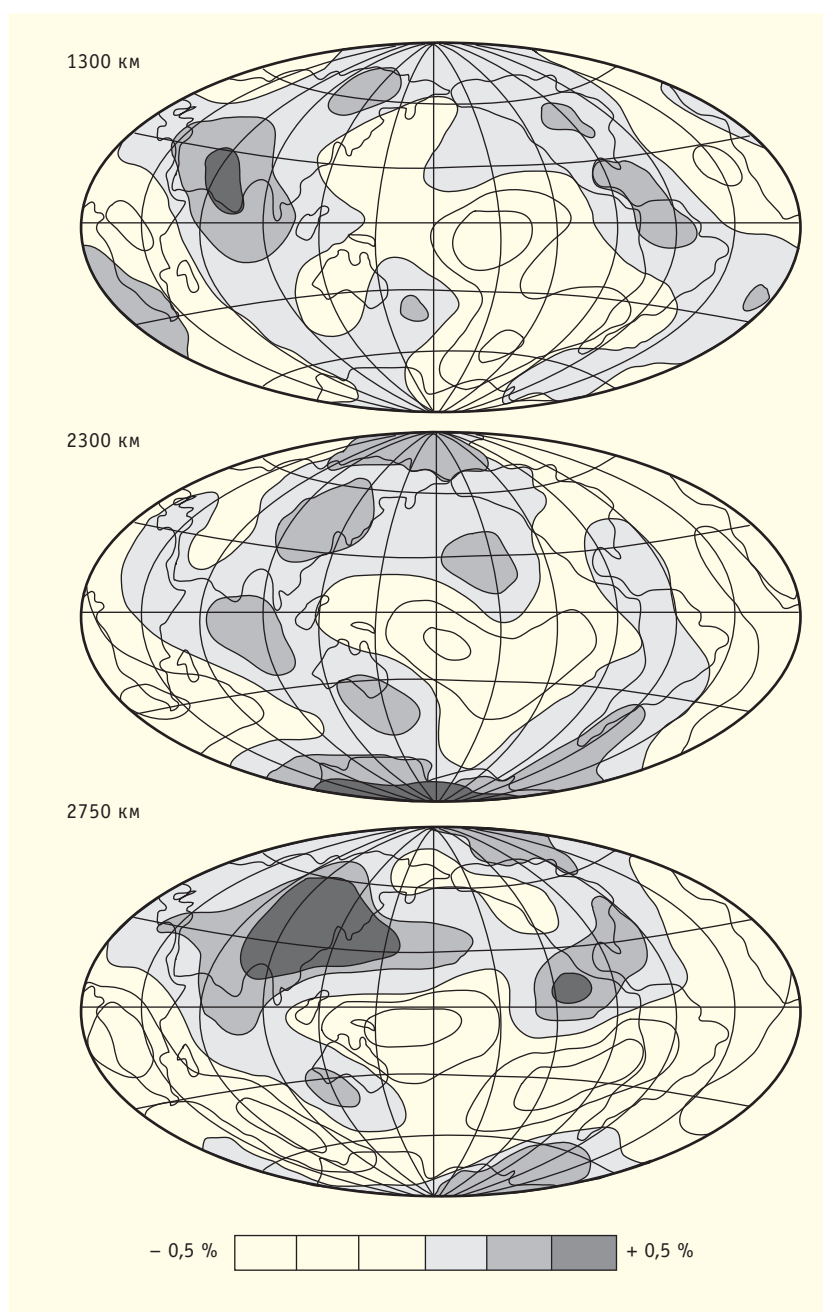


Рис.1. Примеры сейсмотомографических карт для разных глубинных уровней (Дзевонски, Вудхауз, 1989). Цифры на масштабной линейке — отклонение от средних значений сейсмоаномалий.

ные — как низковязкостные. И отсюда уже открывается путь к «материальным» геологическим построениям. Группируя неоднородности, распространяющиеся от земной коры до ядра, мы получили картину существенно более сложного строения мантии (рис.2), чем традиционное о ней представление,

с делением ее только на верхнюю и нижнюю.

Группировки сейсмоаномальных объемных масс выявили особую геосферу, расположенную между глубинами ~840 и 1700 км, которая была названа средней мантией (рис.2 – 4). Но она непосредственно не граничит с верхней и нижней: между

ними выделяются зоны раздела, отличающиеся специфическими сочетаниями высокоскоростных и низкоскоростных аномальных участков. Геосфера, разграничивающая верхнюю и среднюю мантии, выделена как зона раздела I. Ее мощность 170 км. Геосфера между средней и нижней мантией — зона раздела II. Она имеет мощность ~500 км.

Таковы результаты анализа сейсмотомографических исследований мантии Земли. Но есть и другое направление в изучении земных глубин — минералогическое [3, 4].

Минералогические исследования

Мы не будем специально останавливаться на изменениях температуры и давления по радиусу Земли. Это совершенно очевидно. Соответствующие расчеты сделаны и приведены в таблицах и графиках в различных публикациях. С глубиной значения температуры и давления значительно возрастают (табл.1, 2).

Возникает вопрос: как соотносятся данные о глубинных минеральных преобразованиях, полученные экспериментально, с сейсмотомографическими данными? Проведенное сопоставление показало, что между ними имеются вполне определенные коррелятивные связи.

Такой вывод особенно значим с точки зрения обоснования новой модели строения мантии (рис.3).

Минералогический анализ позволил сделать и другой существенно важный вывод: главную роль в минеральном облике глубинных геосфер играют структурные трансформации минералов, а не изменение содержания главных химических элементов (O, Si, Mg, Fe, Al).

Итак, каждая геосфера мантии представляет собой индивидуализированное геологическое тело. Отсюда ясно, что к пониманию их становления и развития необходим историко-

геологический подход. Данная тема, конечно, сложная, тем более что в полном объеме она ставится впервые.

Геологическая история Земли

Наш анализ геологической истории геосфер начинается со времени образования Земли. Время аккреции планеты в космогонии определяется цифрой 4.6 млрд лет назад. Сущность аккреции изложена в книге Г.В.Войткевича и О.А.Бессонова [6].

«Химический состав Земли формировался путем конденсации в солнечной туманности и последующей аккумуляции конденсатов в компактные массы. Все эти конечные конденсаты представляют собой породообразующие минералы Земли и метеоритов» [6. С.14]. Сначала конденсировались нелетучие, тугоплавкие элементы. Затем — «труднолетучие», а в самом конце — наиболее летучие элементы и их соединения. Процесс конденсации зависел в первую очередь от температуры. Давление влияло в меньшей степени. «Рост первичной Земли начался с объединения металлических частиц, образовавших первичный металлический зародыш, который, обладая достаточной массой, продолжил гравитационный захват более поздних конденсатов окружающей среды» [6. С.37]. Так возникло первичное ядро.

Дифференциация мантии произошла значительно позднее. На этот счет имеются данные Ч.Харпера и С.Джекобсона (1992).

В западной Гренландии развиты древнейшие на Земле породы — гнейсы Исуа. Их возраст установлен методом Sm-Nd-изотопии и равен 4.44–4.54 млрд лет, что и принимается за начало дифференциации мантии. На этом этапе произошло обогащение первичной поверхностной оболочки Земли легкими редкоземельными элемен-

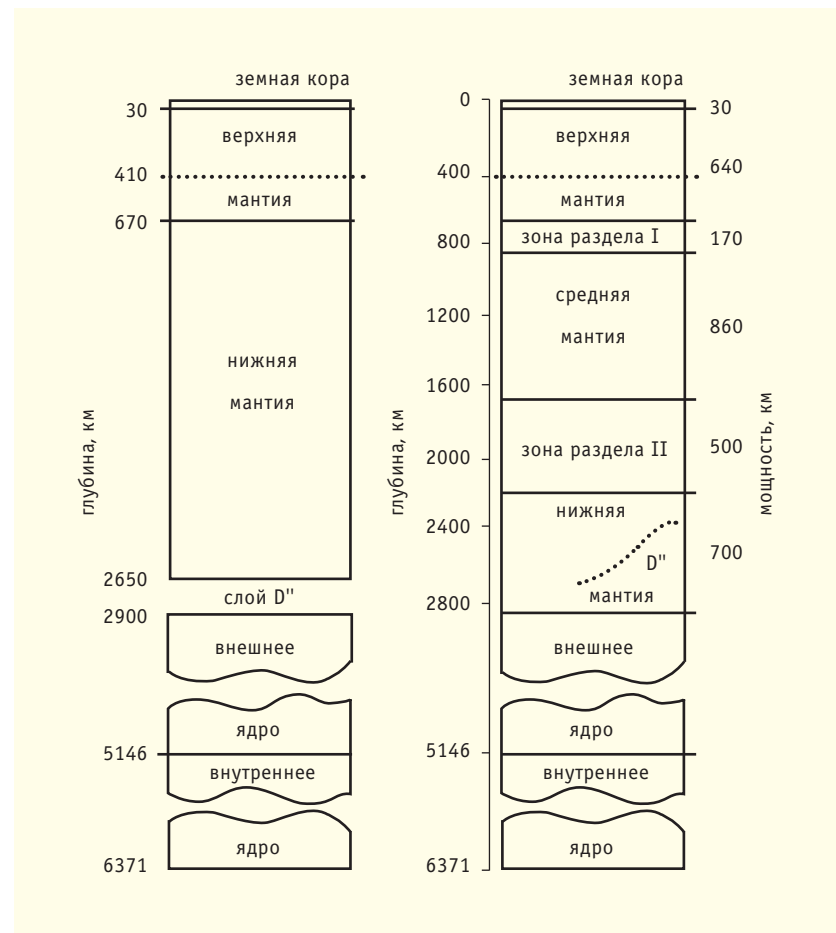


Рис.2. Модели строения Земли. Слева — традиционная модель, распространенная в настоящее время; справа — новая модель, основанная на анализе сейсмотомографических карт, данных о составе мантии и сейсмических границах. Мощности могут варьировать в пределах 10% [2].

тами. М.Бойет с соавторами на основании определения возраста габбро и базальтов из того же района показали, что дифференциация мантии после аккреции произошла через 150 млн лет. Таким образом, обе оценки начала дифференциации мантии достаточно близки.

Далее обратимся к становлению современных геосфер Земли.

Время между началом процесса дифференциации мантии и до 3.9 млрд лет назад (т.е. первые 600 млн лет) рассматривается как особая стадия развития планеты [7]. Земля на этой стадии должна была испытывать разогрев, вызванный процессами, происходящими внутри ядра, воздействием импактных факторов и другими явления-

ми. Соответственно геотермический градиент был особенно высоким. Сформировалась первичная кора базитового типа, возможно, с ультрабазитами и анортозитами. Допускается, что обеднение легкоплавкими компонентами мантии происходило уже тогда [7].

Оформление современного облика геосфер относится к более позднему времени. Соответствующий индикатор для верхних оболочек — характер магматизма. Общая тенденция развития магматизма следующая: от примитивного коматиит-базитового и некоторых других типов магм к сиалическому и щелочному.

Определяющий фактор такой эволюции — изменение тепло-

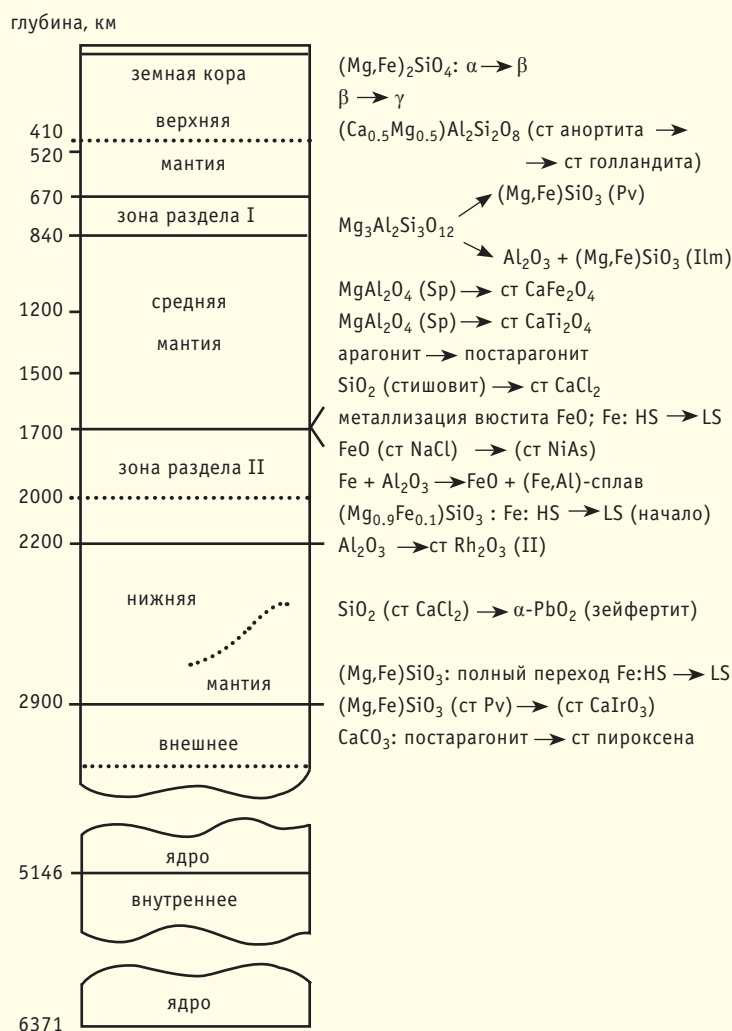


Рис.3. Основные минеральные преобразования в средней мантии, сопредельных зонах и низах тектоносферы [3]. Условные обозначения: ст — структурный тип; Pv — перовскит; Ilm — ильменит; HS — высокоспиновое состояние; LS — низкоспиновое состояние; пунктирные линии — внутригеосферные рубежи.

вого режима Земли. На графике (рис.5) показано изменение температуры мантии от начала ее дифференциации (~1670°C) до наших дней. Температурные колебания обусловлены незначительным переносом тепла между верхней и нижней мантиями (в традиционном понимании). В раскаленной Земле на ранней стадии тепло переносилось в нижнюю мантию быстрее, чем оно сокращалось в верхней, приводя к конвективным периодическим изменениям, в которых уровни подъема температуры нижней мантии пересекают линию безводного перидотитового солидуса и сопровождаются широкомасштабным плавлением на глубине >150 км. Этим обеспечивается механизм накопления субконтинентальной литосферной мантии архейского типа и его прекращение в постархейское время, связанное с последовавшим охлаждением Земли. Для времени 900 млн лет приводится температура ~1300°C. Судя по пикам кривой, относящейся к верхней мантии, важный геотермический рубеж отмечается для времени 1600—1700 млн лет назад. Он соответствует переходу от раннего к среднему протерозою.

С этим этапом связывается образование фундамента будущих древних платформ: Северо-Американской, Восточно-Европейской, Сибирской, Китайско-Корейской. В конце раннего про-

Таблица 1

Изменения давления на разных глубинных уровнях мантии Земли [5]

Глубина, км	200	430	670	800	1000	1200	1400	1600	1800	2200	2600	2886	3000
Давление, кбар	65.5	138	247.2	305.7	397.7	491.7	587.8	686	786.3	994.9	1216.2	1384	1503

Таблица 2

Распределение температуры в глубинах Земли [5]

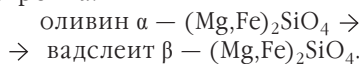
Глубина, км	0	200	430	600	670	1000	1200	1400	1600	1800	2200	2600	2886
Температура, К	288	1770	1940	2130	2170	2260	2360	2450	2540	2640	2820	3010	3130

терозоя предполагается возникновение суперконтинента Пангеи-1 [8].

Геотермические рубежи и минеральные преобразования

Очень существенный факт — отражение геотермических рубежей в глубинных минеральных преобразованиях. Начнем с границы земной коры и верхней мантии. Как в земной коре, так и в мантии преобладают силикаты. Но структурно силикаты мантии, которые составляют лишь 0.6 вес. % от общего содержания минералов этого класса на нашей планете, существенно отличаются от силикатов земной коры. Вместе с тем подсчитано, что более 100 различных тетраэдрических кремнекислородных комплексов в силикатах земной коры сменяются всего 15 структурными их типами в мантии. Сущность преобразования состоит в перестройке Si-тетраэдров в Si-октаэдры. Соответственно, минеральное разнообразие в глубинных оболочках в несколько раз меньше, чем в земной коре (рис.3).

На глубинном рубеже 410 км, разграничивающем верхнюю и нижнюю части верхней мантии, происходит структурная перестройка:



Значительные минеральные преобразования отмечаются и для нижней границы верхней мантии (670 км).

Минералогически специфична геосфера, соответствующая зоне раздела I.

Очень резко по минеральным преобразованиям выделяется и верхняя граница средней мантии (840—900 км). Здесь пироп ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) трансформируется в (Fe,Mg)-силикат со структурой перовскита. Нижней зоне средней мантии (~1500—1700 км) отвечает трансформация стишовита (модификации SiO_2 , содер-

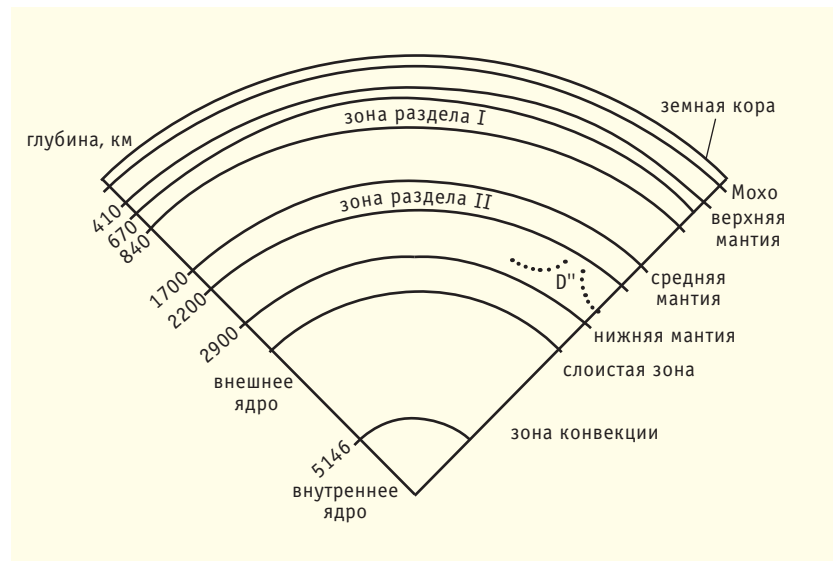


Рис.4. Глубинные геосферы Земли и геосферы внешнего ядра (Листер, Буффет, 1998).

жащей кремнекислородные октаэдры) в ромбический постстишовит, а в слое D'', разделяющем ядро и мантию, происходит структурная трансформация перовскитоподобного MgSiO_3 в фазу со структурой CaIrO_3 (рис.3).

Упомянутые здесь преобразования фиксируют минеральную изменчивость по радиусу Земли. Основательная разработка по данной проблеме содержится в книге «Геология мантии Земли» [2]. Соответствующие данные

свидетельствуют: минеральные трансформации подчеркивают геологическую индивидуальность выделенных мантийных геосфер.

Мантийные геосферы — реальные геологические тела

Перейдем к этому разделу. Но предварительно заметим, что проблемы мантийной тектони-

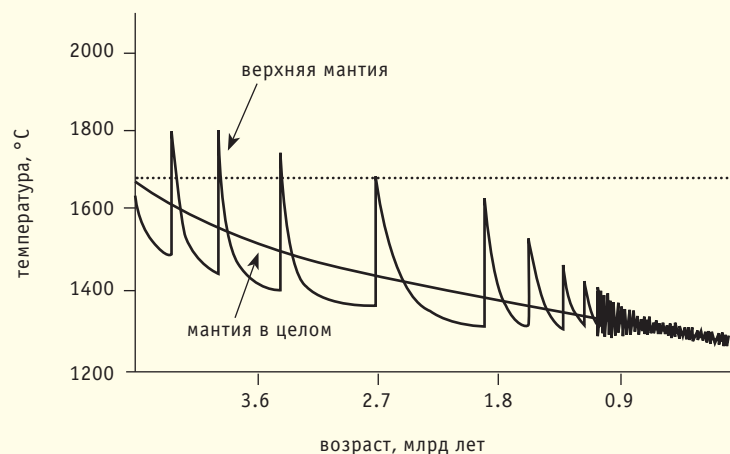


Рис.5. Температурные изменения в двухслойной модели Земли (Гриффин и др., 2003, упрощено).

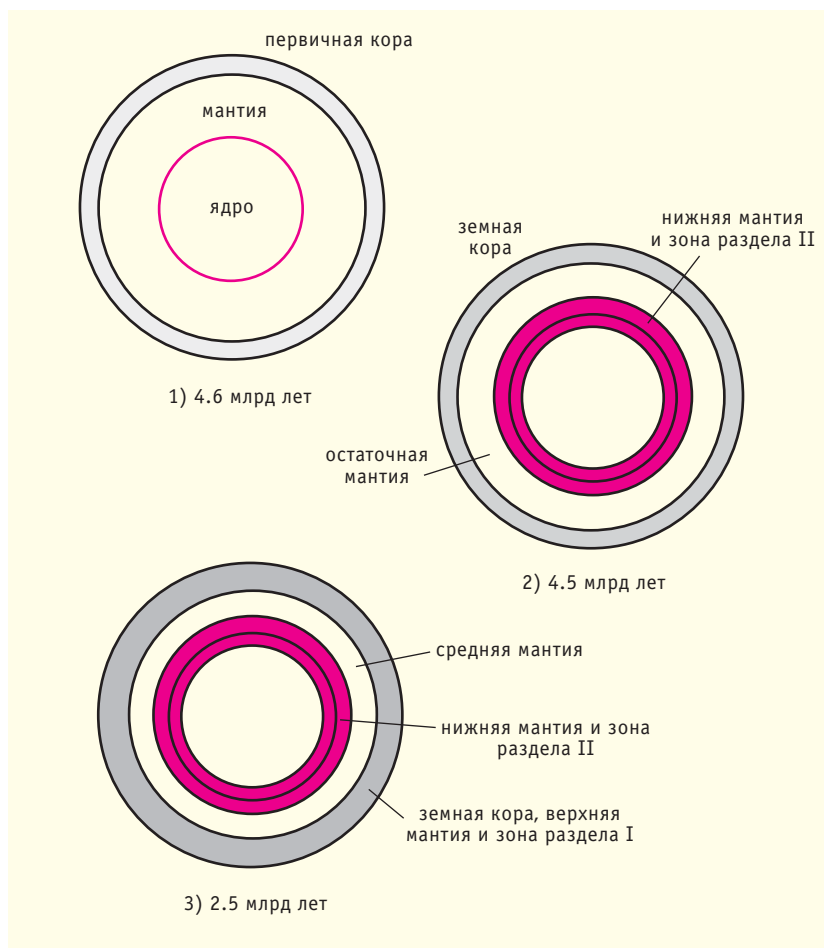


Рис.6. Стадии формирования геосфер мантии Земли.

ки, геодинамики и энергетики здесь не будут рассматриваться (им посвящена статья Ю.М.Пущаровского, опубликованная в «Вестнике РАН» в 2005 г.).

В первую очередь следует отметить неравномерность процесса тепловой эволюции Земли, на который оказывал влияние ряд факторов. Один из них — изменение энергетики ядра, меняющейся в связи с распадом радиоактивных элементов (прерывисто-непрерывный процесс). Другой фактор — дискретность метеоритной бомбардировки. Третий — изменчивость гравитационных полей, связанная с энергетическими затратами при перераспределении внутрпланетных масс. В конечном счете результатом стало образование внутриземных историко-геологических рубежей.

Итак, более или менее достоверное развитие оболочечной Земли началось с формирования первичной коры (протокры). Тогда же произошло и отслоение мантии от ядра с образованием промежуточного слоя D". Наименование этого слоя предложено К.Е. Булленом, давшим первую схему дробного деления мантии [9]. Упомянутые события происходили 4.6 млрд лет назад. Мощность слоя D" изменчива, но не превышает нескольких сотен километров. Кстати заметим, что изменчивость мощности отражает неравномерное поступление энергетических потоков из ядра в мантию.

Следующий важный этап в эволюции мантии связывается со временем 4.5 млрд лет назад. Тогда начался процесс дифференциации мантии на геосферы.

Слой D", как переходный, выделяется постольку, поскольку над ним залегает нижняя геосфера мантии (нижняя мантия). Однако переход между ними нерезкий, диффузного типа. Последнее позволяет рассматривать их как синхронные образования в геологической истории земных глубин. Соответствующая стадия эволюции мантии охватывает 600 млн лет, до рубежа 3.9 млрд лет назад (нижняя граница архейской эры). С этим временем связана смена первичной коры (базитовой) корой сиалического типа.

Следующий этап дифференциации мантии отвечает рубежу 2.5 млрд лет назад (граница архея и протерозоя). Ярчайшая характеристика данного рубежа — перелом в структурном развитии и составе магматизма (кратонная стадия с ее массовым кислым магматизмом) верхних геосфер Земли [7]. Становление верхней мантии нами связывается именно с этим рубежом.

Центральное положение в эволюционном ряду мантийных геосфер занимает средняя мантия. Ее саморазвитие определилось становлением геосфер раздела: зоны I и зоны II. Они разновременные. Зона II, охватывающая периферию нижней мантии, более ранняя. Структурное обособление ее относится к тому же времени, что и геосферы нижней мантии, т.е. около 3.9 млрд лет назад. Зона раздела I, разграничивающая среднюю и верхнюю мантию, зародилась одновременно с верхней мантией, т.е. 2.5 млрд лет назад.

Таким образом, в средней мантии сходятся две вещественно-структурные системы: нижняя мантия — зона перехода — средняя мантия и верхняя мантия — зона перехода — средняя мантия. Как этот факт влияет на специфику состава и строения средней мантии, показывают данные о глубинных минеральных преобразованиях и сейсмотомографии. В очень приближенной схеме можно принять, что минеральные ассоциации «симатиче-

ской» (преимущественно содержащей Si и Mg) мантии присущи нижнимантийным геосферам, а «сиалической» (преимущественно содержащей Si и Al) — верхним. Средняя мантия занимает промежуточное положение. Что касается строения, то рассмотрение сейсмографических карт показывает, что разделение верхней мантии Земли на Тихоокеанский и Индо-Атлантический тектонические сегменты прослеживается и в средней мантии, что позволяет говорить об известной общности их структурного развития. В этом случае речь идет не об одностороннем геодинамическом воздействии мантийных систем, а об их взаимодействии.

* * *

Заключая изложенное, можно зафиксировать в качестве основного вывода то, что мантия Земли имеет оболочечное строение, представленное шестью геосферами: нижней и средней мантиями, верхней мантией, состоящей из двух геосфер, и двумя зонами

раздела между мантиями — I и II. Облегающий ядро Земли слой D'' представляет базальную часть нижней мантии. Выделенные геосферы одновременны по образованию (рис.6).

Историко-геологические построения устанавливают следующую последовательность образования геосфер. Первичная кора, возникшая на самом раннем этапе истории Земли (4.6 млрд лет назад), с течением времени (~150 млн лет) в связи с формированием мантии сменилась корой иного состава и строения. Ее профилирующей составной частью стал кремнезем. Это время надо считать началом дифференциации мантии и становления системы: слой D'' — нижняя мантия — зона раздела нижней и средней мантии (раздел II).

В дальнейшей истории важной вехой стал рубеж 2.5 млрд лет назад, когда отслоилась верхняя мантия и определилась система: верхняя мантия — зона раздела I — средняя мантия. С этого времени началось массовое образование в мантии силикатной состав-

ляющей. Основное значение в этом качественном изменении магматизма имело охлаждение планеты, вызванное снижением энергетического потенциала земного ядра. Подобные процессы происходили и позднее. В этом отношении по значимости выделяется временной рубеж 1.6 млрд лет назад (граница раннего и среднего протерозоя), когда на Земле произошли большие тектонические преобразования. Земля вступила в фазу континентально-океанического развития. Но это уже внутригеосферные процессы, относящиеся к явлениям второго и более высоких порядков.

Из сказанного следует, что средняя мантия как обособленная геосфера определилась также ~2.5 млрд лет назад.

Общее заключение таково: геологическая история мантии Земли сложная. В ней выделяются крупные этапы вещественно-структурных преобразований, связанных с эндогенными энергетическими катаклизмами, с одной стороны, и статусом Земли как космического тела — с другой. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-07079-Д), грантов Президента Российской Федерации НШ 7091.2010.5 и НШ 4034.2010.5 и Федеральной программы «Научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт №14.740.11.0190).

Литература

1. Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю. Геосферы мантии Земли // Геотектоника. 1999. №1. С.3—14.
2. Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. М., 2010.
3. Пуцаровский Д.Ю. Минералы глубинных геосфер // Успехи физ. наук. 2002. Т.172. №4. С.480—485.
4. Пуцаровский Д.Ю., Оганов А.Р. Структурные перестройки минералов в глубинных оболочках Земли // Кристаллография. 2006. Т.51. №5. С.819—829.
5. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М., 2002.
6. Войткевич Г.В., Бессонов О.А. Химическая эволюция Земли. М., 1986.
7. Богатиков О.А., Коваленко В.И. Эволюция магматизма в истории литосферы // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М., 1993. С.115—128.
8. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М., 2001.
9. Буллен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М., 1966.