

УДК 548.736.6

Д.Ю. Пушаровский¹, Ю.М. Пушаровский²

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ГЛУБИННЫХ ОБОЛОЧЕК ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ³

Рассмотрены новые подходы, расширяющие представления о составе и строении мантии Земли и планет земной группы. Новые данные указывают на более дробную структуру глубинных оболочек Земли и Луны. Проанализированы результаты экспериментов при высоких давлениях и температуре, позволяющие смоделировать изменения структуры и свойств важнейших компонентов состава мантии и ядер Земли, Луны, «газовых» (Юпитера, Сатурна) и ледяных (Урана, Нептуна) «гигантов».

Ключевые слова: минеральные трансформации, минералогия мантии, состав ядер Земли и Луны.

The structure and composition of the Earth's mantle and of the terrestrial planets are considered in the light of the new scientific approaches. These data indicate on the further structural subdivision of the Earth's inner geospheres and of the Moon's deep seated zones. The results of HP- and HT-experiments related with the transformation of the main mantle's and core's components of the Earth, Moon, gaseous giants (Jupiter and Saturn) and ice giant planets (Uranus and Neptune) reveal the new structure and property changes.

Key words: mineral transitions, mantle mineralogy, composition of the Earth's and of the Moon's core.

Познание геологии мантии Земли и других планет Солнечной системы — одна из важнейших задач наук о Земле на современном этапе. Ключевые разделы этой проблемы занимают важное место в программах космических исследований. Вместе с тем новые возможности обработки геофизических и прежде всего сейсмотомографических данных в сочетании с прогрессом в техническом обеспечении экспериментов, направленных на изучение состояния вещества в условиях высоких давления и температуры, позволяют высказать новые идеи о составе, строении и эволюции Земли и ряда других планет. Статья посвящена анализу опубликованных в последнее время работ, связанных с изучением этой исключительно сложной проблемы.

Широко известная модель внутреннего строения Земли (деление ее на ядро, мантию и земную кору) была разработана в 1926 г. сейсмологами Г. Джеффрисом (H. Jeffreys) и Б. Гутенбергом (B. Gutenberg). В середине XX в. в науку вошли представления о более дробном глубинном строении Земли. На основании новых сейсмологических данных оказалось возможным разделить ядро на внутреннее и внешнее, а мантию — на нижнюю и верхнюю. Начало этой модели положил австралийский сейсмолог К.Е. Буллен в 1940 г. (рис. 1, а). Деление мантии Земли на верхнюю и нижнюю, введенное после выявления сейсмологами глу-

бинного сейсмического рубежа 670 км, оказалось очень стойким. С тех пор и до середины 1990-х гг. ни в геологии, ни в геофизике не было попыток расчленения нижней мантии на более дробные геосферы. В то же время ее мощность очень велика и составляет 2230 км. Априори можно принять, что состав и строение нижней мантии неоднородны хотя бы потому, что температура и давление по радиусу Земли сильно меняются. Вообще доктрина неоднородности структуры приложима к широчайшему кругу земных и внеземных объектов [Пушаровский, Пушаровский, 2010].

Глубинную неоднородность строения планеты в целом и нижней мантии в частности основательно раскрыли данные сейсмотомографии, в особенности сейсмотомографические карты, составленные для разных глубинных уровней. Такие карты опубликованы японскими исследователями для 14, а американскими — для 12 уровней. Данные сейсмотомографии позволяют оценить положительные и отрицательные изменения скорости сейсмических волн (%) по отношению к их средним значениям на одинаковой глубине, т.е. неоднородности мантии по латерали. При этом разница температуры на одной глубине варьирует от 500 °С в верхней мантии до 2000 °С в нижней мантии. Сопоставление этих карт наглядно выявляет естественные группировки сейсмонеоднородностей в объемном виде.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, декан, профессор, академик РАН; *e-mail:* dean@geol.msu.ru

² Геологический институт РАН, советник дирекции, академик РАН; *e-mail:* dean@geol.msu.ru

³ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-05-02051а) и гранта Президента РФ (НШ-1130.2014.5).

Приняв это за основу, Ю.М. Пушаровский в 1995 г. предложил первую более дробную схему строения мантии [Пушаровский, 1995], чем ее двучленное деление (рис. 1, а). В последующие годы эта схема совершенствовалась, особенно благодаря включению в анализ данных о возможных глубинных минеральных преобразованиях [Пушаровский, Пушаровский, 2010], а также сведений о внутримантийных сейсмических границах в мантии Земли. Таким образом, обособлено шесть геосфер:

- 1) верхняя часть верхней мантии — до глубины 410 км,
- 2) нижняя часть верхней мантии — до рубежа 670 км,
- 3) зона раздела I между верхней и средней мантией (670–840 км),
- 4) средняя мантия (840–1700 км),
- 5) зона раздела II, отделяющая среднюю мантию от нижней (1700–2200 км),
- 6) нижняя мантия (2200–2900 км).

Кроме того, в схему внесены новые представления в отношении строения внешнего (жидкого) ядра Земли, которое подразделяется на нижнюю геосферу с интенсивной конвекцией (*vigorously convecting lower layer*) и верхнюю, стратифицированную (*stably stratified upper layer*).

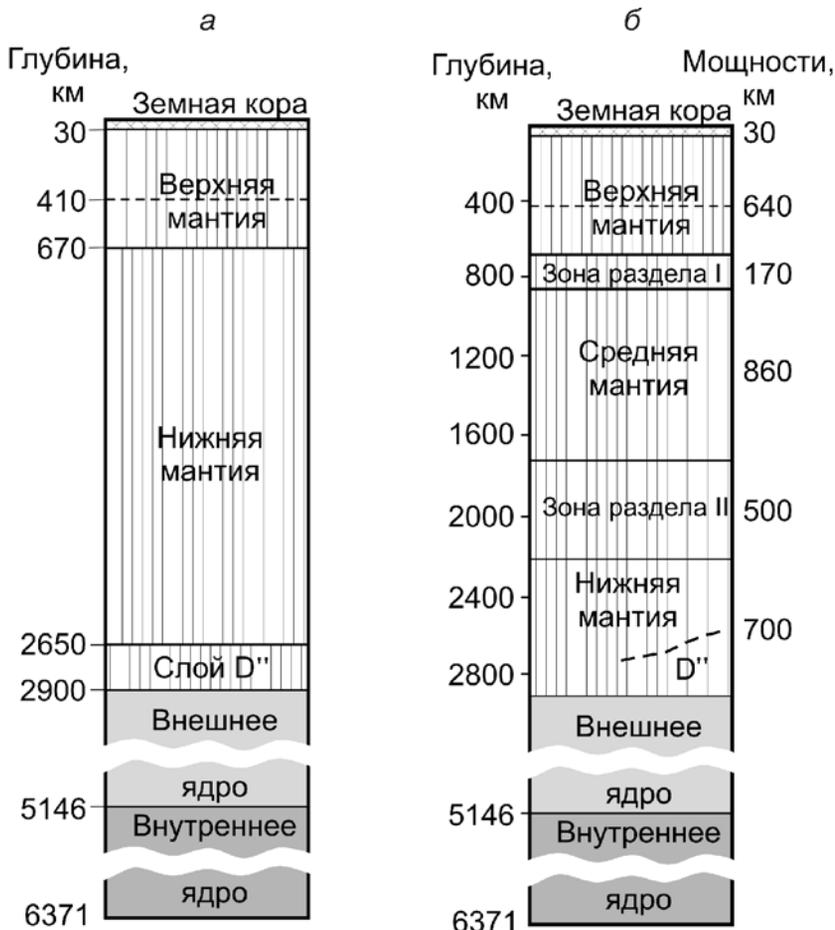


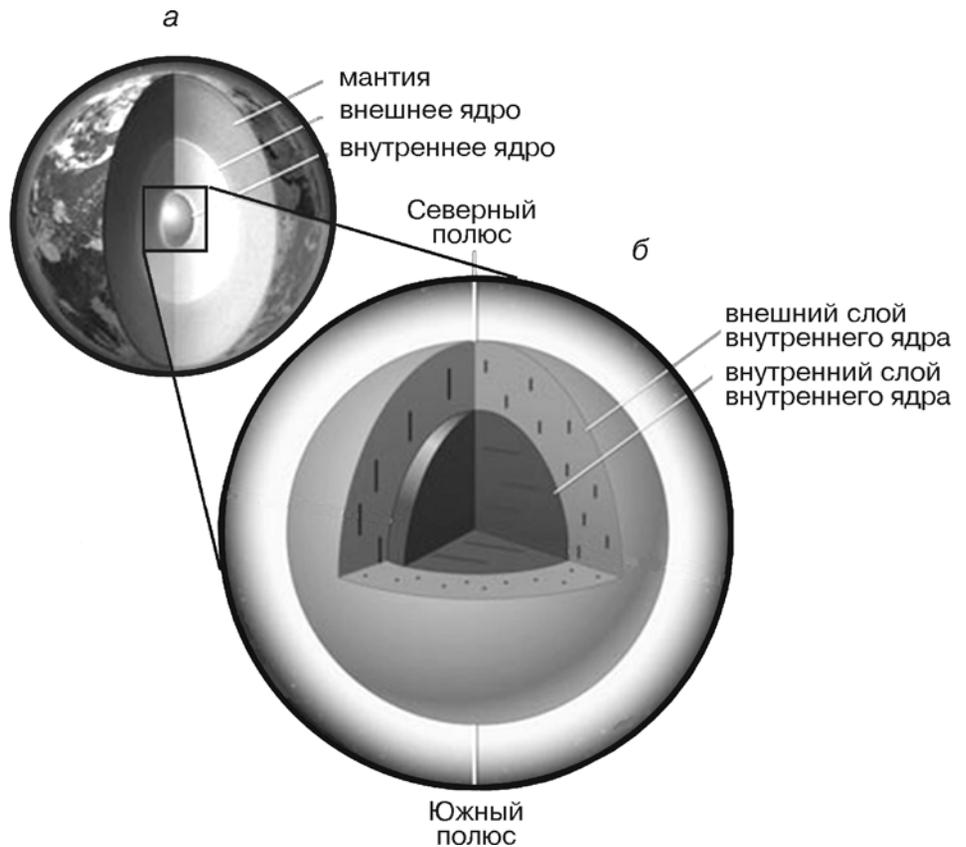
Рис. 1. Традиционная модель строения Земли (а) и новая модель строения Земли с выделением средней мантии (б)

Таким образом, новая модель внутреннего строения Земли существенно отличается от традиционной. В ее рамках меняется число геосфер, появляются новые геосферы, изменяется положение границ раздела. Следует особо отметить, что в пределах впервые выделенной средней мантии области сейсмических неоднородностей характеризуются увеличенными размерами. При этом акватория Тихого океана очерчена значительно слабее по сравнению с ее границами в верхней и в нижней мантии. Глубинные рубежи 850 и 1700 км, внутри которых расположена средняя мантия, подтверждаются результатами экспериментов в камерах высокого давления [Pushcharovsky, Pushcharovsky, 2012]. В частности, при значениях давления и температуры, соответствующих 850 км, установлена трансформация важной мантийной компоненты $MgAl_2O_4$ со структурой шпинели в структурный тип феррита кальция $CaFe_2O_4$ [Griffune et al., 1991]. При значениях этих параметров, моделирующих условия на глубине ~1700 км, стишовит (модификация SiO_2 с тетрагональной структурой рутила) перестраивается в пост-стишовит с ромбической структурой, аналогичной $CaCl_2$ [Kingma et al., 1995; Oganov et al., 2005].

Принятая модель наиболее глубинных оболочек Земли предполагает, что на глубине ~2,9 тыс. км под мантией расположено железоникелевое ядро. Оно имеет радиус около 3,5 тыс. км и состоит из двух слоев. Толщина внешнего слоя, так называемого внешнего ядра, достигает ~2,2 тыс. км. Внутренний слой (ядро) — твердый (1,3 тыс. км). По мнению большинства исследователей, железо во внутреннем ядре Земли при соответствующих значениях давления и температуры представлено ϵ -модификацией, структура которой описывается как гексагональная плотнейшая упаковка атомов Fe [Tateno et al., 2010].

Вместе с тем в последние годы в ряде публикаций обосновано разделение внутреннего ядра на две оболочки. Эти представления совсем недавно вновь привлекли внимание благодаря работе китайских и американских геофизиков [Tao Wang et al., 2015]. В рамках предложенной ими новой модели внутреннее ядро Земли характеризуется сейсмической (упругой) анизотропией, обладающей одной осью симметрии. Скорость продольных сейсмических волн зависит лишь от угла между этой осью и направлением их распространения. Ранее подобная модель, в которой ось симметрии

Рис. 2. Строение ядра Земли (а) и новая модель ядра по [Tao Wang et al., 2015] (б). Штрихи указывают на разную ориентировку кристаллов железа в соседних оболочках внутреннего ядра



параллельна оси вращения Земли, была предложена для внешнего слоя внутреннего ядра [Sun, Song, 2008]. По отношению к внутренней оболочке внутреннего ядра установлено, что ось симметрии сейсмической анизотропии находится почти в экваториальной плоскости. Скорость продольной сейсмической волны вдоль этого направления максимальна, как и во внешнем слое внутреннего ядра. Однако формы волновых фронтов для обеих оболочек внутреннего ядра оказываются разными.

Таким образом, согласно геофизическим данным внутреннее ядро состоит из двух частей. Но при этом возникает вопрос о возможных отличиях их состава. Одно из предположений допускает присутствие в них минеральных фаз с различной структурой. Другое — предполагает, что в обеих оболочках внутреннего ядра содержатся преимущественно гексагональные кристаллы ϵ -железа с пространственной группой $R\bar{6}_3/mmc$, различающиеся ориентировкой особого кристаллографического направления — оси b_3 (рис. 2). Во внешнем слое внутреннего ядра эти кристаллы ориентированы в направлении север–юг, тогда как во внутреннем слое — в направлении восток–запад.

Ядра малых планет земной группы и их спутников, включая Луну, в отличие от Земли, характеризуются меньшими величинами давления (ГПа) и температуры (К): Меркурий — давление $\sim 8\text{--}40$, температура $\sim 1700\text{--}2200$ [Chen et al., 2008]; Марс — давление $\sim 24\text{--}42$, температура $\sim 2000\text{--}2600$ [Bertka, Fei, 1998; Fei, Bertka, 2005]; Луна — давление $\sim 5\text{--}6$, температура $\sim 1300\text{--}1900$ [Wiczorek et al., 2006]. Соответственно, согласно данным [Tsuji no et al., 2013], в глубинных оболочках этих планет должна быть устойчива γ -модификация Fe с гранецентрированной кубической элементарной ячейкой.

Луна — единственный небесный объект земной группы (кроме Земли), на котором в рамках программы пилотируемых космических полетов на кораблях «Аполлон» были установлены приемники

сейсмических волн (рис. 3). Изменение скорости сейсмических волн в глубинах Луны коррелирует с увеличением ее плотности (рис. 4). На основе тщательного анализа этих данных, полученных по программе «Аполлон», а также значений лунного момента инерции недавно разработана новая

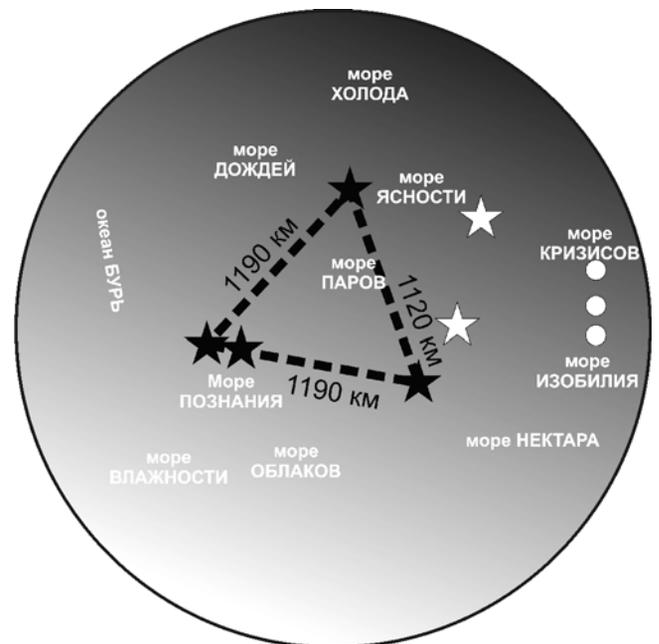


Рис. 3. Карта Луны с местами посадки пилотируемых космических кораблей серии «Аполлон» (звездочки). Места установки приемников сейсмических волн выделены черными звездочками, белые кружки — места отбора образцов, доставленных на Землю автоматическими станциями «Луна», по [Wiczorek, 2009]

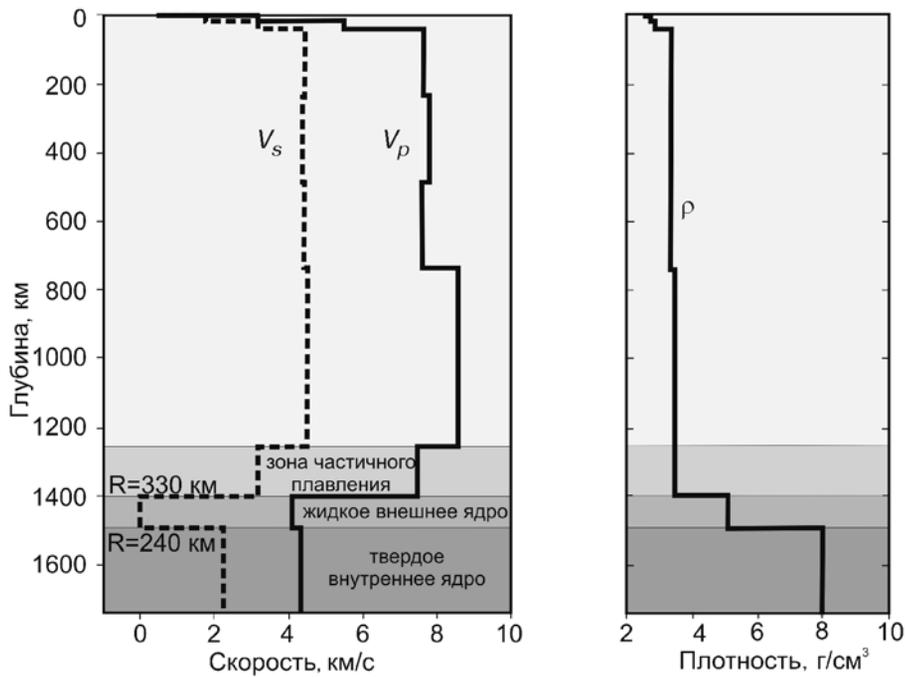


Рис. 4. Изменение скорости сейсмических волн и плотности в глубинных оболочках Луны, по [Antonangeli et al., 2015]

модель глубинного строения Луны [Antonangeli et al., 2015]. В соответствии с этой моделью радиус Луны составляет 1740 км, а мантия простирается до глубины 1240 км. В интервале 1240–1410 км выделяется зона частичного плавления. Оболочка с глубинными размерами 1410–1500 км — внешнее ядро, которое по сейсмическим данным обладает свойствами жидкости, а в центре Луны, между 1500–1740 км, расположено твердое внутреннее ядро. Максимальная плотность Луны во внутреннем ядре — 7,6–7,8 г/см³.

Важно отметить, что в ядре Луны при более умеренном по сравнению с Землей давлении значения скорости сейсмических волн оказываются меньше значений, характерных для чистого

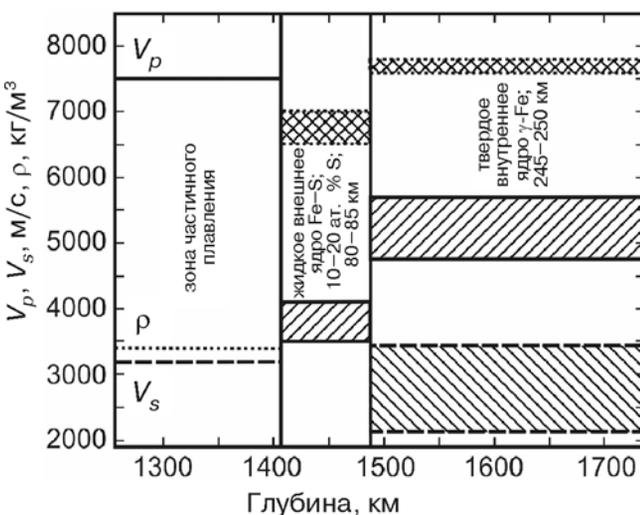


Рис. 5. Предполагаемая модель строения и состав ядра Луны, по [Antonangeli et al., 2015]. Указана мощность внешнего и внутреннего ядра (км)

γ-железа или его сплавов, и отличаются от аналогичных параметров в ядре Земли. Именно поэтому была предложена двухслойная модель ядра Луны, в которой в составе внешнего ядра кроме железа допускается присутствие серы в количестве 10–20 ат.%, а внутреннее ядро содержит твердое γ-Fe с гранцентрированной кубической элементарной ячейкой. На границе обеих выделяемых в ядре Луны оболочек температура оценивается в 1700–1900 К, а давление — в 5 ГПа. При этом общее содержание серы во всем лунном ядре составляет 3–6 масс.%, а во внешнем ядре оно повышается до 6–11 масс.% (рис. 5).

Ядра ряда других планет земной группы также содержат железо в качестве важнейшего компонента.

Соответственно, исследование свойств и структуры этого металла при высоких давлении и температуре представляется чрезвычайно важным (рис. 6). На рис. 7 выделены интервалы давления и температуры, характерные для ядер малых планет земной группы (Меркурий, Марс) и их спутников (Луна, Ганимед — спутник Юпитера), при которых устойчиво γ-Fe. Различия в значениях этих параметров определяются разной планетной массой.

Новые возможности структурных исследований при высоких давлении и температуре позволили в последнее время высказать ряд новых идей

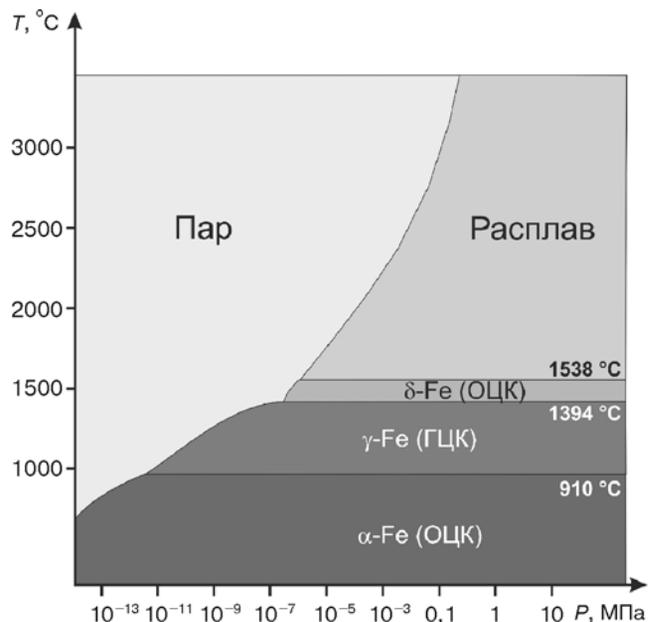


Рис. 6. Фазовая диаграмма Fe. ОЦК — объемно-центрированная ячейка, ГЦК — гранцентрированная ячейка

относительно состава и строения Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, которые классифицируются как гигантские газовые планеты в Солнечной системе [Bove et al., 2015]. Согласно приведенному на рис. 8 схематичному изображению внутренней структуры Юпитера под облаками (ниже 7 тыс. км) находится слой, содержащий смесь водорода и гелия, толщиной около 21 тыс. км. В нем водород постепенно изменяет свое состояние от газа к жидкости по мере увеличения давления и температуры (до ~5730 К). Четкой границы, отделяющей газообразный водород от жидкого, по-видимому, не существует. Это может выглядеть как непрерывное кипение глобального водородного океана.

Еще ниже расположен слой жидкого и металлического водорода толщиной 30–50 тыс. км. Температура этого слоя меняется от 6300 до 21 000 К, а давление — от 200 до 4000 ГПа. В этой оболочке допускается присутствие металлического Не, который образует сплав с H_2 .

В центре Юпитера может находиться твердое ядро диаметром ~20 тыс. км. На данный момент считается, что масса этого ядра эквивалентна приблизительно 10 массам Земли, а размер составляет ~1,5 диаметра нашей планеты. Как видно, в рамках этой простой трехслойной модели четкой границы между основными слоями в структуре Юпитера не существует.

С учетом преобладающего (более 80%) содержания молекулярного водорода в атмосферах Юпитера, Сатурна и других планет-гигантов сделано предположение о том, что он должен переходить в «металлическое» состояние в их недрах при высоких значениях температуры и давления, при котором электроны отделены от ядер и представляют собой свободную субстанцию. Это подтверждается наличием у всех планет-гигантов сильных магнитных полей со сложной (недипольной) структурой, связанной с присутствием металлического водорода в их промежуточных по радиусу проводящих оболочках.

До сих пор экспериментально такой водород в чистом виде не получен. Однако в декабре 2014 г. появилось пилотное сообщение о сверхпроводящем состоянии H_2S при температуре 190 К (-83 °С) и давлении 150 ГПа. Изучение его структуры показало, что высокое давление приводит к возникновению ангармонических колебаний атомов водорода — их больших смещений от положений равновесия. Несмотря на то что высокое давление ограничивает движение атомов, легкость атомов H позволяет им совершать такие перемещения. Это приводит к перестройке связей в веществе, сопровождающейся возникновением сверхпроводящих свойств [Drozdov et al., 2015].

Необычные свойства проявляют и другие главные компоненты состава газовых гигантов. Согласно работе [McWilliams et al., 2015], в поверхностных зонах Юпитера и Сатурна Не является

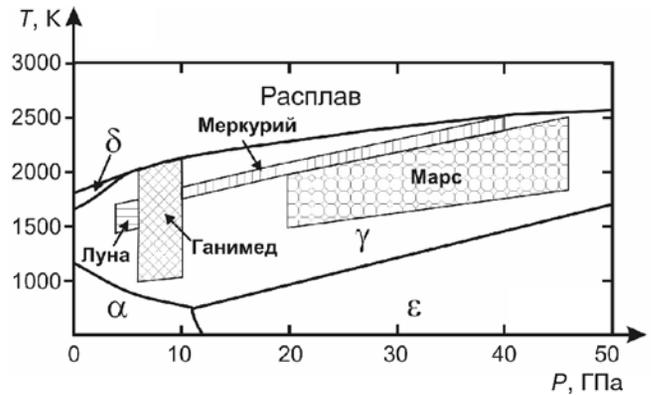


Рис. 7. Интервалы давления и температуры в ядрах Марса, Меркурия, Луны и Ганимеда. Выделены поля устойчивости α -, β -, γ - и ϵ -модификаций Fe, по [Antonangeli et al., 2015]

изолятором, но становится проводником вблизи ядер этих планет. Как отмечено выше, эти изменения происходят при давлении и температуре, при которых H_2 — главный компонент этих планет — также обладает свойствами металла. Отличие обеих планет заключается в поведении Не, который остается изолятором и в ядре Сатурна, предотвращая его эрозию, тогда как в ядре Юпитера (параметры эксперимента: $P \sim 50$ ГПа, $T \sim 28\,000$ К) Не приобретает металлическую проводимость.

В отличие от газовых гигантов Сатурна и Юпитера, состоящих в основном из водорода и гелия, эти элементы у Урана и Нептуна присутствуют лишь в атмосферах. В глубинных же оболочках этих планет металлический водород практически отсутствует. Вместе с тем они содержат много льда в его различных модификациях (рис. 9). По этой причине специалисты выделили эти две планеты в отдельную категорию «ледяных гигантов».

Помимо водорода и гелия в атмосфере Урана обнаружены облака из льда и твердого аммиака,

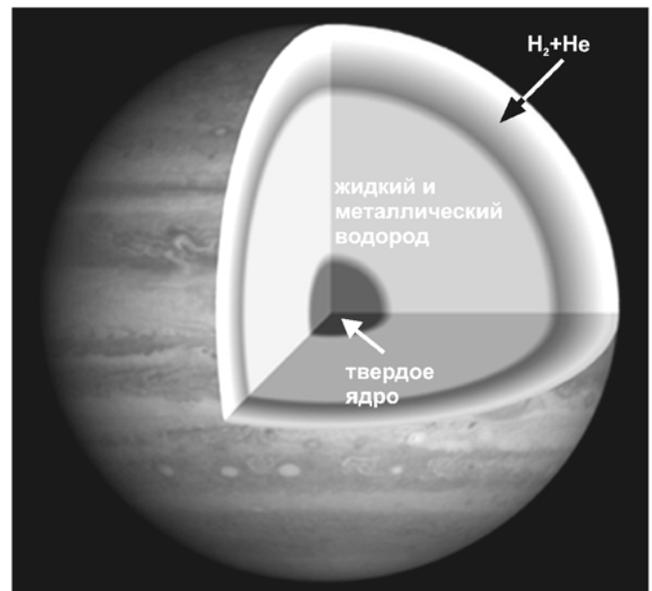


Рис. 8. Модель внутренней структуры Юпитера. Показаны оболочки, расположенные под атмосферными облаками

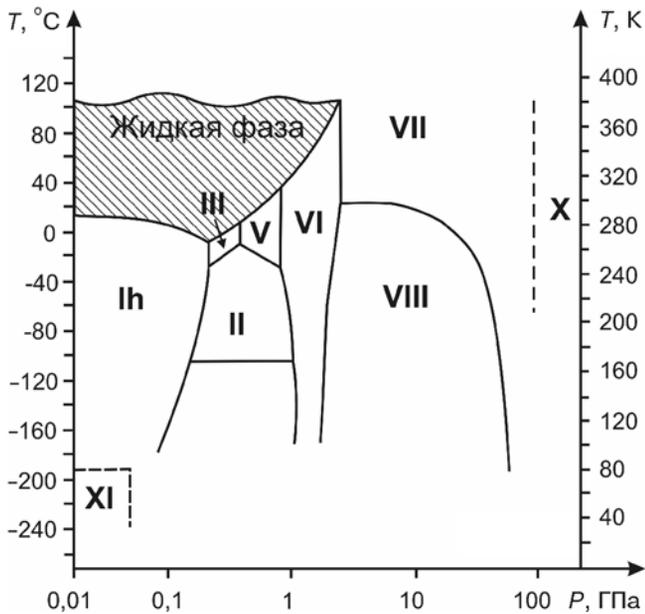


Рис. 9. Фазовая диаграмма льда. Давление (ГПа) в логарифмическом масштабе. Штриховкой выделена жидкая фаза. В природных условиях Земли вода кристаллизуется в одной модификации — I_h с гексагональной симметрией

а также небольшое содержание метана и других углеводородов, это самая холодная планетарная атмосфера Солнечной системы с минимальной температурой 49 К (−224 °С). Полагают, что Уран имеет сложную слоистую структуру облаков (рис. 10), где вода составляет нижний слой, а метан — верхний. Атмосфера Нептуна помимо водорода и гелия, наряду со следами углеводородов и, возможно, азота, содержит еще более высокую долю льда — водного, аммиачного, а также метанового. Ядра Нептуна и Урана состоят главным образом из «астрофизических» льдов и горных пород, которые с космогонической точки зрения должны включать силикатный компонент.

Под «астрофизическими льдами», которые могут присутствовать в ядрах «ледяных гигантов», подразумевают газгидраты или клатраты, которые подобно водяному льду в кристаллической структуре могут содержать другие молекулы и, таким образом, формировать более сложные соединения вплоть до органических. Среди органических молекул, установленных в межзвездном пространстве и в кометном веществе, наибольшими размерами характеризуются молекулы этиленгликоля $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ [Moore, Hudson, 2005].

Кроме того, в недрах Урана и Нептуна, а также многих экзопланет содержатся «экстремальные» модификации льда, устойчивые при высоких давлении и температуре. Эту особенность обеих планет недавно связали с присутствием в их составе каменной соли NaCl . Всего известно 16 модификаций льда. Считалось, что в недрах Урана и Нептуна могут существовать только две высокобарические и высокотемпературные его модификации: лед VII и лед VIII. Лед VII с раз-

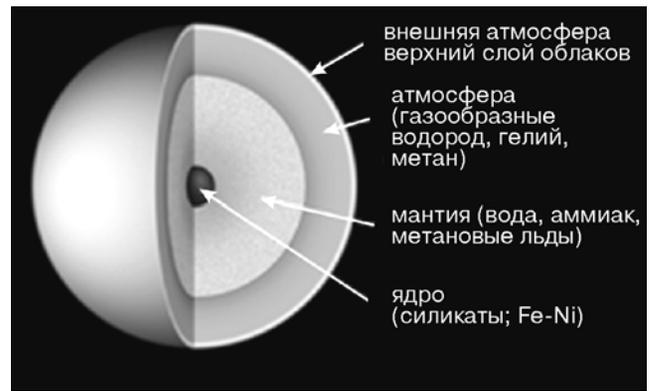


Рис. 10. Состав и строение глубинных оболочек Урана

упорядоченными водородными связями (proton-disordered) — кубический, плотность $1,65 \text{ г/см}^3$; лед VIII с упорядоченными водородными связями (proton-ordered) — тетрагональный. Согласно новым экспериментам в присутствии NaCl при давлении $P > 60 \text{ ГПа}$ структура льда VII приобретает структуру льда X с симметричными водородными связями (centered hydrogen bond) (рис. 11). Таким образом, немолекулярный лед рассматривается как наиболее вероятная форма воды в недрах «ледяных гигантов» [Bove et al., 2015].

Заключение. Рассмотрены новые подходы, расширяющие представления о геологии мантии Земли и планет земной группы. При этом внимание сосредоточено на их составе и строении. Каждый из этих разделов очень сложен для разработки, будучи по существу мультидисциплинарным.

Базисное положение, основанное на анализе имеющихся данных, — дробное деление мантии и ядер на геосферы и рассмотрение последних как индивидуализированных геологических тел. Отсюда открывается путь к изучению их историко-геологической эволюции. Очень существенная роль в разработке этой проблемы принадлежит сравнительной планетологии. Очевидно, что фактические сведения о глубинной геологии Земли и

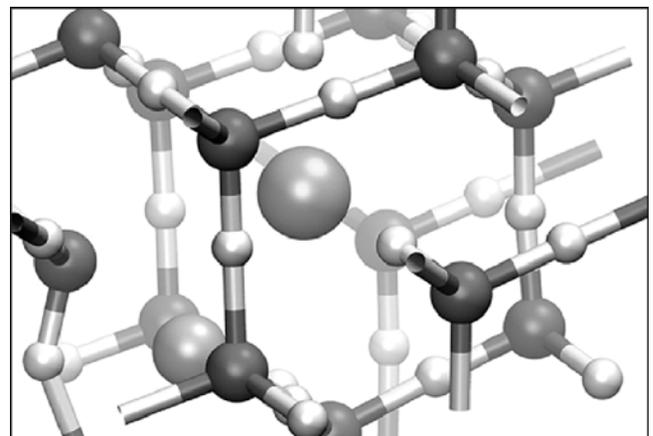


Рис. 11. Координационная (немолекулярная) структура льда с симметричными Н-связями, по [Bove et al., 2015]. Большой шар в центре — формализованное изображение включений NaCl

других планет Солнечной системы будут в дальнейшем накапливаться, что создаст предпосылки для новых модельных построений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пуцаровский Ю.М.* О трех парадигмах в геологии // Геотектоника. 1995. № 1. С. 4–11.
- Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю.* Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 2010. 138 с.
- Antonangeli D., Morard G., Schmerr N.C.* et al. Toward a mineral physics reference model for the Moon's core // Proceed. Nation. Acad. Sci. 2015. Vol. 112 (13). P. 3916–3919.
- Bertka C.M., Fei Y.* Implications of Mars Pathfinder data for the accretion history of the terrestrial planets // Science. 1998. Vol. 281 (5384). P. 1838–1840.
- Bove L.E., Gaal R., Raza Z.* et al. Effect of salt on the H-bond symmetrization in ice // Proceed. Nation. Acad. Sci. 2015. Vol. 112 (27). P. 8216–8220.
- Chen B., Li J., Hauck S.A.* Non-ideal liquidus curve in the Fe-S system and Mercury's snowing core // J. Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L07201.
- Drozdov A.P., Eremets M.I., Troyan I.A.* et al. Conventional superconductivity at 203 K at high pressures // Nature. 2015. Vol. 525. P. 73–76. doi:10.1038/nature14964.
- Fei Y., Bertka C.* Planetary science. The interior of Mars // Science. 2005. Vol. 308 (5725). P. 1120–1121.
- Irifune T., Fujino K., Ohtani E.* A new high pressure form of $MgAl_2O_4$ // Nature. 1991. Vol. 349. P. 409–411.
- Kingma K.J., Cohen R.E., Hemley R.J., Mao H.-K.* Transformation of stishovite to a denser phase at lower-mantle pressure // Nature. 1995. Vol. 374 (6519). P. 243–245.
- McWilliams R.S., Dalton D.A., Konôpková Z.* et al. Opacity and conductivity measurements in noble gases at conditions of planetary and stellar interiors // Proceed. Nation. Acad. Sci. 2015. Vol. 112 (26). P. 7925–7930.
- Moore M.H., Hudson R.G.* Production of Complex Molecules in Astrophysical Ices // Proceed. IAU Colloquim. 2005. N 231. P. 119–132.
- Oganov A.R., Gillan M.J., Price G.D.* Structural stability of silica at high pressures and temperatures // Phys. Rev. 2005. Vol. 71 (6). P. 064104 (8).
- Pushcharovsky D., Pushcharovsky Yu.* The Mineralogy and the Origin of Deep Geospheres: A Review // Earth-Sci. Rev. 2012. Vol. 113, N 2. P. 94–109.
- Sun Xinlei, Song Xiaodong.* Tomographic inversion for three-dimensional anisotropy of Earth's inner core // Phys. Earth and Planet. Inter. 2008. Vol. 167 (1). P. 53–70.
- Tao Wang, Xiaodong Song, Han H. Xia.* Equatorial anisotropy in the inner part of Earth's inner core from autocorrelation of earthquake coda // Nature Geosci. 2015. Vol. 8. P. 224–227.
- Tateno S., Hirose K., Ohishi Y., Tatsumi Y.* The structure of iron in Earth's inner core // Science. 2010. Vol. 330 (6002). P. 359–361.
- Tsujino N., Nishihara Yu., Nakajima Y.* et al. Equation of state of γ -Fe: Reference density for planetary cores // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. Vol. 375. P. 244–253.
- Wieczorek M.A.* The Interior Structure of the Moon: What Does Geophysics Have to Say? // Elements. 2009. February. Vol. 5. P. 35–40. doi:10.2113/gselements.5.1.35
- Wieczorek M.A., Jolliff B.L., Khan A.* et al. The constitution and structure of the lunar interior // Rev. Mineral. Geochem. 2006. Vol. 60. P. 221–364.

Поступила в редакцию
09.12.2015