

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Вода в Солнечной системе

М.Л. Литвак, А.Б. Санин

В последние полвека было осуществлено множество научных космических миссий, предназначенных для исследования различных объектов Солнечной системы. В большинстве случаев в список основных научных задач этих миссий был включён поиск воды или водяного льда на поверхности и под поверхностью исследуемых небесных тел, в том числе поиск внеземных океанов или их следов, изучение их эволюции и сравнение с историей образования гидросфера Земли. Представлен краткий обзор по данной тематике с акцентом на планеты земной группы с целью попытаться ответить на вопрос о том, почему на Земле образовались и до сих пор существуют океаны жидкой воды, а поверхности других планет превратились в безводные пустыни. Обсуждаются также вопросы, касающиеся возникновения и наблюдения водяного льда во внешней части Солнечной системы. Приведён список важных проблем, связанных с образованием и распространением воды в Солнечной системе.

Ключевые слова: вода, водяной лёд, океаны, Солнечная система, планеты земной группы, планеты-гиганты и их спутники

PACS numbers: 96.12.-a, 96.20.-n, 96.30.-t

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038277>

Содержание

1. Введение (865).
2. Происхождение гидросферы Земли (866).
3. Луна как ближайший к Земле резервуар реликтового водяного льда (868).
4. Парадокс Луны и Меркурия (870).
5. Венера — "сухая" сестра Земли (871).
6. Был ли Марс тёплым и влажным? (872).
7. Вода во внешней части Солнечной системы (875).
8. Заключение (877).

Список литературы (878).

1. Введение

Во Вселенной вода достаточно широко распространена. Она присутствует в форме водяного пара в атмосферах планет и их спутников, в жидкой форме в океанах, в виде водяного льда на поверхности и в недрах крупных и малых небесных тел, кроме того, химически связанная вода содержится в различных породообразующих минералах. Причём речь идёт не только о Земле и её океанах, но и о других планетах земной группы, спутниках газовых гигантов, кометах, астероидах и иных астрономических объектах.

Вода возникла в нашей Вселенной не сразу. Для этого должно было родиться и завершить свой жизненный

цикл, превратившись в сверхновые, первое поколение звёзд. В результате звёздного нуклеосинтеза во Вселенной появились тяжёлые элементы, в том числе кислород. Вода могла образовываться в холодных молекулярных облаках, где частицы пыли служили катализаторами, способствующими образованию молекул воды на их поверхности (см., например, [1]). Таким образом, при рождении Солнечной системы вода уже присутствовала в протопланетном диске. В связи с этим можно рассуждать о том, что либо объекты Солнечной системы могли унаследовать "звёздную" воду, либо вода, которую мы сейчас наблюдаем, является вторичным продуктом переработки, возникшим в процессе формирования самой Солнечной системы (см., например, [2]). Если верна первая гипотеза, то образование планет и малых тел Солнечной системы, обогащённых водой или водяным льдом, не является уникальным событием и протекания схожих процессов мы вправе ожидать и в других звёздных системах (см., например, [2]).

Наличие жидких океанов предполагается также на спутниках Юпитера и Сатурна (Европе, Ганимеде и Энцеладе) и даже на карликовой планете Церере, находящейся в поясе астероидов [3–5]. Все эти небесные тела образовались за так называемой *снежной линией* — воображаемой границей, разделяющей внутреннюю и внешнюю части Солнечной системы. За этой линией во время формирования Солнечной системы температуры были достаточно низки для того, чтобы молекулы воды из протопланетного облака могли конденсироваться в виде ледяных зёрен [6]. Снежная линия проходила примерно на расстоянии в три астрономические единицы (а.е.) от Солнца через пояс астероидов [6]. Самым крупным из объектов, возможно, имеющих океан, является Европа, спутник Юпитера размером с Луну. Поверх-

М.Л. Литвак, А.Б. Санин. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: mlitvak@gmail.com, anton.sanin@gmail.com

Статья поступила 11 января 2018 г.

ность Европы представляет собой застывший при экстремально низких температурах (порядка 102 К) водяной лёд, перемешанный с пылью, а жидкая вода находится на глубине и поддерживается в жидкой фазе благодаря приливным силам Юпитера [3]. Толщина ледяной коры может составлять 10–30 км, а глубина жидкого океана, находящегося под ней, может достигать 100 км. Это делает его самым большим океаном в Солнечной системе, превосходящим земные океаны в несколько раз.

На планетах земной группы (за исключением Земли) сейчас таких океанов нет, но на Марсе, Меркурии и Луне обнаружены залежи поверхностного и подповерхностного водяного льда. В целом, считается, что на ранних стадиях эволюции Земля, Марс и Венера развивались схожим образом и на каждой из этих планет могли образоваться первичные океаны и даже зародиться жизнь. Впоследствии Марс и Венера, в отличие от Земли, потеряли всю поверхностную жидкую воду, и их поверхности превратились в сухие пустыни, либо очень холодные, как на Марсе, либо очень горячие, как на Венере.

Ниже кратко обсуждаются возможные процессы, приведшие к образованию океанов на Земле и планетах земной группы, их последующие судьбы, текущее распределение воды/водяного льда на поверхности разных планет и их спутников. В заключении (раздел 8) суммируются важные проблемы, которые предстоит решить в ближайшем будущем.

2. Происхождение гидросферы Земли

Считается, что Солнечная система образовалась в плотном облаке молекулярного водорода 4,6 млрд лет тому назад. На ранних стадиях эволюции Солнечной системы вокруг молодого Солнца сформировался быстро вращающийся протопланетный диск, аккрецирующий на звезду. Во внутренней, наиболее горячей, части протопланетного диска (до снежной линии), где температуры были настолько высоки, что все летучие вещества, включая воду, могли существовать только в виде газа, по мере остывания стали конденсироваться пылевые зёрна, состоящие в основном из кремния, кислорода и различных металлов. За снежной линией такие зёрна могли формироваться не только из тяжёлых химических элементов, но и из летучих веществ, если позволяла температура их конденсации. В ходе эволюции диска в результате слипания твёрдых зёрн могли образоваться довольно крупные объекты (с характерными размерами 1–10 км), которые называются планетозималами. Таким образом, в протопланетном диске началась аккреция планетозималей, в ходе которой более крупные объекты поглощали более мелкие до тех пор, пока не сформировалось несколько десятков протопланетных эмбрионов, имеющих размеры, соответствующие размерам современных Марса или Луны. На последней стадии эволюции по мере исчерпания мелких планетозималей дальнейший рост происходил за счёт гигантских столкновений протопланет, во время которых выделялось огромное количество энергии (см., например, [7]). Считается, что в ходе такого гигантского столкновения могла сформироваться система Земля–Луна [8].

Современные теории происхождения воды на планетах земной группы, прежде всего на Земле, можно разделить на две категории, соответствующие двум основ-

ным сценариям, в зависимости от того, сколько времени прошло от момента образования Солнечной системы до момента, когда на Земле могла возникнуть гидросфера. Условно эти сценарии можно назвать эндогенными (*Earth accreting wet scenario*) и экзогенными (*Late-veneer hypothesis*).

В первом случае предполагается, что вода изначально могла находиться в веществе, из которого образовалась молодая Земля, или была привнесена на этапах формирования Земли до того момента, когда в результате дифференциации сформировалось железное ядро планеты. Газ в протопланетном диске состоял в основном из водорода, гелия и кислорода, а значит, в нём могли присутствовать и пары воды, поэтому определённое количество воды могло абсорбироваться внутри планетозималей [9]. Однако считается, что внутренняя область протопланетного диска, в которой формировалась Земля, была очень горячей, что препятствовало эффективной абсорбции водяного пара из протопланетного облака на поверхность пылевых зёрен. Если судить по метеоритам, изначально образовавшимся на разных расстояниях от Солнца, то можно увидеть, что наибольшее водосодержание (10–20 % по массовой доле) имеют углистые хондриты, сформировавшиеся во внешнем поясе астероидов на удалении в 2,5–4 а.е. В то же время, например, энстатитовые хондриты (образовавшиеся на расстоянии ~ 2 а.е.) содержат менее 0,1 % воды (см., например, [10]). Тем не менее лабораторные исследования и численное моделирование показывают, что абсорбция могла происходить и при температурах порядка 1000 °C, а при температурах около 500 °C из протопланетного облака могло абсорбироваться количество воды, в несколько раз превышающее то, которое содержится в земных океанах [11]. Масса земной гидросферы составляет лишь небольшую часть от общей массы планеты. По современным оценкам, если всю воду равномерно распределить по мантии, то получится характерное содержание примерно в 250 ppm (parts per million — частей на миллион). Такое небольшое количество (или даже в несколько раз большее) вполне могло изначально присутствовать в составе первородного материала.

Согласно наиболее популярной гипотезе в рамках эндогенного сценария (*Earth accreting wet*) считается, что основная масса современной гидросферы была привнесена на растущую Землю на поздних стадиях её формирования, когда наша планета уже прошла стадию роста протопланетного эмбриона (размером с Марс, или 1/10 от текущей массы), но ещё не испытала гигантского столкновения, в результате которого образовалась Луна [10, 12–14]. Согласно этой гипотезе, на ранних этапах на растущую Землю аккрециировали лишь "сухие" планетозимали, образовавшиеся в окрестности Земли. В то же время на более поздних стадиях (> 10 млн лет) по мере увеличения массы планеты и усиления гравитационных возмущений, вызванных Юпитером, на Землю стали попадать обогащённые водой планетные эмбрионы, образовавшиеся в более удалённых областях, прежде всего во внешнем поясе астероидов [10, 15]. Они образовывались за снежной линией, где температуры были настолько низкими, что происходила конденсация летучих веществ (в том числе воды и гидроксильной группы OH [6]). Таким образом на молодую Землю могла попасть вода в объёме до 10 земных океанов [10].

Основная проблема эндогенного сценария заключается даже не в том, как вода в сильно разогретой части протопланетного диска могла проникнуть в состав первородного планетного материала, а в том, как эта вода могла сохраниться в ходе дальнейшей эволюции. Аккрецирующие планетозимали, вероятно, были сильно разогреты за счёт радиоактивного распада большого количества короткоживущих изотопов (например, ^{26}Al [16]), а значит, связанная вода могла выгоняться на поверхность и испаряться. Кроме этого, в гигантских столкновениях протопланет могла расплываться за счёт большого энерговыделения вся или почти вся мантия, что приводило к образованию магматического океана и исчезновению летучих веществ с поверхности [17, 18]. Тем не менее современные исследования показывают, что в процессе неоднородного застывания магматического океана происходила дифференциация по вертикальному распределению воды [13, 19–21]. Её большая часть консолидировалась в верхней части мантии и могла выйти в виде паров в атмосферу, удерживаясь в ней силами гравитации [13].

Косвенным свидетельством существования древних океанов считается открытие отдельного класса минералов — детритовых цирконов. Их химический и изотопный состав (прежде всего, изотопный состав кислорода) указывает, что они образовались в магматическом источнике во взаимодействии с жидким гидросферой. Это наиболее древние образования, возрастом порядка 4,3–4,4 млрд лет [22, 23]. Другим косвенным свидетельством является изотопное соотношение ксенона $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$. Считается, что ^{129}Xe мог полностью образоваться в течение 100 млн лет в результате распада короткоживущего изотопа ^{129}I , который в свою очередь образовался в ходе звёздного нуклеосинтеза. Изотопное отношение $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ имеет разные значения в атмосфере и в мантии. Полагают, что решающую роль в таком разделении могла сыграть водная среда. Благородный газ ксенон легко улетучивается из воды в атмосферу, в то время как галоген йод хорошо растворяется в воде. Таким образом, ^{132}Xe преимущественно уходил в атмосферу, а ^{129}Xe по большей части образовывался из ^{129}I на дне океанов, увеличивая отношение изотопов $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$. Ввиду короткого периода распада ^{129}I можно предположить, что древний океан на Земле мог существовать уже 4,4 млрд лет назад [9].

С другой стороны, экзогенный (Late-veegeer) сценарий постулирует, что большая часть летучих веществ была доставлена уже после окончания дифференциации и образования земного ядра. Основными поставщиками в этом случае являются кометы и астероиды (углистые хондриты), а временной отрезок, в течение которого это происходило, растянулся на несколько сотен миллионов лет, включая время пика последней метеоритной бомбардировки (Late Heavy Bombardment) [24] 3,8 млрд лет назад, в результате которой образовалось большое количество кратеров на Луне и планетах земной группы.

Чтобы разобраться и выявить правоту какой-либо из представленных гипотез, как правило, используется анализ изотопного состава летучих веществ (вода, азот, благородные газы) и прежде всего отношения изотопов водорода D/H. Так, солнечная вода, возникшая из протопланетного облака, соответствует изотопному составу Юпитера и Сатурна и имеет отношение D/H порядка 2×10^{-5} (см., например, [25, 26], а также рис. 1), в то время

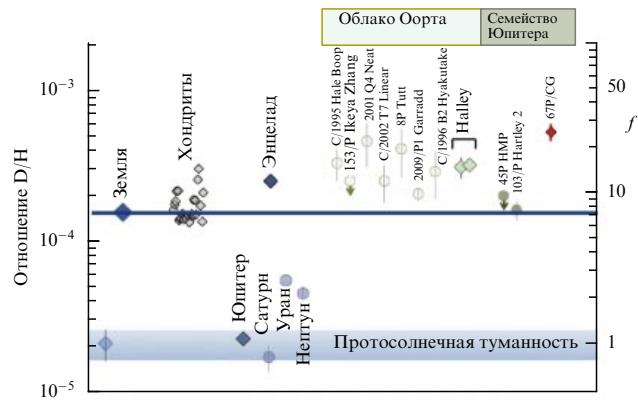


Рис. 1. Изотопное отношение D/H, измеренное для различных объектов Солнечной системы. f — коэффициент обогащения, равный отношению D/H данного объекта, делённому на отношение D/H протосолнечной туманности. (Из работы [26].)

как изотопное отношение D/H в земных океанах намного выше — около $1,6 \times 10^{-4}$. Что касается комет, то на сегодняшний день для них получены около 12 значений изотопного состава, причём два из которых — в ходе непосредственных измерений на космических аппаратах (КА) Европейского космического агентства (ЕКА) Giotto (комета 1P/Halley, которая, вероятно, происходит из Облака Оорта) и Rosetta (комета 67P/Чурюмова–Герасименко (CG) из семейства Юпитера) [25–27]. Все эти измерения сделаны в коме указанных комет, а не на поверхности их ядер.

В течение длительного времени считалось, что земная вода принесена на Землю кометами из пояса Койпера (семейство Юпитера), так как они имеют схожее с земным соотношение D/H, в то время как для комет из Облака Оорта (Halley, Hyakutake и Hale–Bopp) это отношение в два раза выше (см. рис. 1). Последние измерения на борту КА Rosetta, тем не менее, показали, что комета Чурюмова–Герасименко, относящаяся к семейству Юпитера, имеет отношение D/H даже большее, чем кометы из Облака Оорта, — $(5,3 \pm 0,7) \times 10^{-4}$ [26]. Это означает, что кометная гипотеза образования земных океанов сейчас испытывает достаточно большие трудности. Наилучшее объяснение — это доставка воды на Землю метеоритами и астероидами, состоящими из углистых хондритов, так как с их помощью можно объяснить происхождение изотопного состава летучих веществ на Земле, в том числе и отношения D/H, которое для них близко к земному (см., например, [12, 28]).

К сожалению, ситуация не настолько проста и необходимо учитывать, что отношение D/H могло изменяться в ходе многочисленных (иногда катастрофических) процессов формирования планеты, а значит, изначально низкое содержаниедейтерия в солнечной воде, попавшей в состав протопланетного материала, могло увеличиться. Наблюдаемое отношение D/H в кометах, скорее всего, говорит о том, что мы не полностью понимаем механизмы изменения содержаниядейтерия, поскольку наши измерения связаны только с комой комет и могут не отражать реального содержания изотопов водорода в ядре кометы.

Исходя из вышеизложенного, можно рассуждать о том, что вероятны несколько сценариев образования земных океанов. Во-первых, это поступление на Землю солнеч-

ной воды на ранних стадиях формирования нашей планеты в составе первородного материала (т.е. Земля почти всё время была влажной). Во-вторых, доставка воды могла осуществляться в первые 10 млн лет, когда Земля ещё не достигла своего окончательного размера, с помощью планетозималей и протопланетных эмбрионов из внешнего пояса астероидов. Наконец, гидросфера Земли могла сформироваться в эпоху поздней метеоритной бомбардировки в течение нескольких сотен миллионов лет в результате столкновений с кометами и метеоритами, относящимися к классу углистых хондритов. Очевидно, все указанные процессы могли иметь место, и главная проблема для дальнейшего изучения заключается в выяснении того, какой из них доминировал.

Например, одно из последних исследований [12] показывает, что, основываясь на результатах анализа изотопного состава земной воды и благородных газов, можно говорить о хондритном источнике воды. Результаты такого анализа приводят к выводу о том, что большая часть земной гидросферы образовалась вследствие столкновений формирующейся Земли с планетозималями с высоким содержанием воды. При этом менее 10 % остаётся на солнечную воду и всего несколько процентов — на кометную воду.

Одним из возможных вариантов исследования указанной проблемы, как ни странно, может стать освоение Луны и детальное изучение залежей её полярного льда, который мог сохраниться с доисторических времен, а значит, содержит геологическую запись процессов, повлиявших на формирование Земли и Луны, а также их резервуаров летучих веществ.

3. Луна как ближайший к Земле резервуар реликтового водяного льда

Принято считать, что Луна образовалась в результате гигантского столкновения Земли и протопланеты размечом с Марс, которую иногда называют Тейя [8]. Большая часть обломков Тейи оказалась на орбите вокруг Земли и впоследствии из этих обломков сформировалась Луна [8]. Эта гипотеза объясняет многие наблюдательные факты, вероятно за исключением удивительной схожести изотопного состава Земли и Луны. Так, Луна и Земля имеют очень близкие изотопные составы по кислороду, которые при этом существенно отличаются от состава метеоритов, попавших на Землю с Марса и из пояса астероидов [29, 30]. Исходя из гетерогенного распределения кислорода по Солнечной системе хорошее совпадение изотопного состава могло иметь место только в том случае, если предположить, что участники столкновения образовались в одной и той же окрестности протопланетного облака. Некоторые исследователи трактуют этот факт как указание на то, что в процессе формирования Луна могла унаследовать гораздо большую часть материала из земной мантии, чем полагали ранее [31], либо после столкновения, но до начала лунной аккреции произошло существенное смешивание вещества из земного и лунного магматических океанов [32].

Долгое время считалось, что подавляющее большинство летучих веществ (в том числе и вода) попало на Землю в результате гигантского столкновения. Анализ образцов лунных пород, доставленных на Землю в рамках программы "Аполлон", показал, что среднее содер-

жение воды крайне мало — в среднем не более 50 ppm по массовой доле [33], и, скорее всего, оно возникло в результате взаимодействия протонов солнечного ветра с лунной поверхностью [34]. Однако исследование вулканических стёкол, привезённых на Землю в ходе миссии "Аполлон-17", обнаружило существенно более высокие концентрации, доходящие до ≈ 750 ppm [35]. Последнее означает, что Луна не настолько обеднена летучими веществами, как полагали ранее. Согласно последним результатам численного моделирования гигантского столкновения и последующей аккреции, а также современным экспериментальным наблюдениям, Луна может содержать большое количество воды [36].

Основными резервуарами лунной воды всегда считались вечно затенённые полярные кратеры, температура которых настолько низка, что водяной лёд может сохраняться на поверхности в течение нескольких миллиардов лет. Первые исследования и дискуссия на эту тему были опубликованы в работах [37–40]. Впоследствии вывод о холодных полярных ловушках и сохранении в них водяного льда был подтверждён в работах [41, 42].

Наблюдения с помощью бистатического радара, установленного на борту КА НАСА (NASA — National Aeronautics and Space Administration) (США) Clementine, сначала подтвердили эту гипотезу [43], но впоследствии были поставлены под сомнение при получении как данных радиолокации лунных кратеров с Земли [44], так и результатов повторного анализа данных Clementine [45]. В 1998 г. нейтронный спектрометр LPNS (Lunar Prospector Neutron Spectrometer), установленный на борту лунного орбитального КА НАСА Lunar Prospector, обнаружил существенное понижение потока эпитетловых нейтронов с лунной поверхности в окрестности полюсов. Эти данные также были интерпретированы как свидетельство наличия водяного льда в вечно затенённых кратерах [46–48]. В том числе обсуждалось кометное происхождение водяного льда [49–52] и образование водородосодержащих элементов в результате бомбардировки поверхности Луны [53, 54]. Но установить это точно не представлялось возможным, так как пространственное разрешение LPNS было слишком низким для того, чтобы локализовать обнаруженный эффект с точностью до размеров лунных кратеров.

В 2009 г. НАСА запустило ещё одну лунную орбитальную станцию — LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), на которой был установлен российский прибор ЛЕНД (от англ. Lunar Exploration Neutron Detector — LEND), представляющий собой коллимированный нейтронный спектрометр [55, 56]. Его поле зрения было сужено до 10–20 км, что позволило разрешить многие крупные лунные кратеры и установить, что в некоторых из них находится водяной лёд [56, 57]. Среднее содержание льда на лунной поверхности оказалось достаточно значимым — от 1 до 10 % по массовой доле, если учсть, что лёд может залягать на глубинах до 0,5 м [58]. Это совпадает с непосредственными измерениями в одном из таких кратеров (Кабео), выполненными в рамках эксперимента LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite) по искусственной бомбардировке поверхности Луны, когда разгонный блок КА был специально перенаправлен с орбиты Луны в этот кратер [59]. Орбитальные измерения поднявшегося облака газа и пыли показали присутствие в выброшенной породе примерно 5 % паров воды по массовой доле [59].

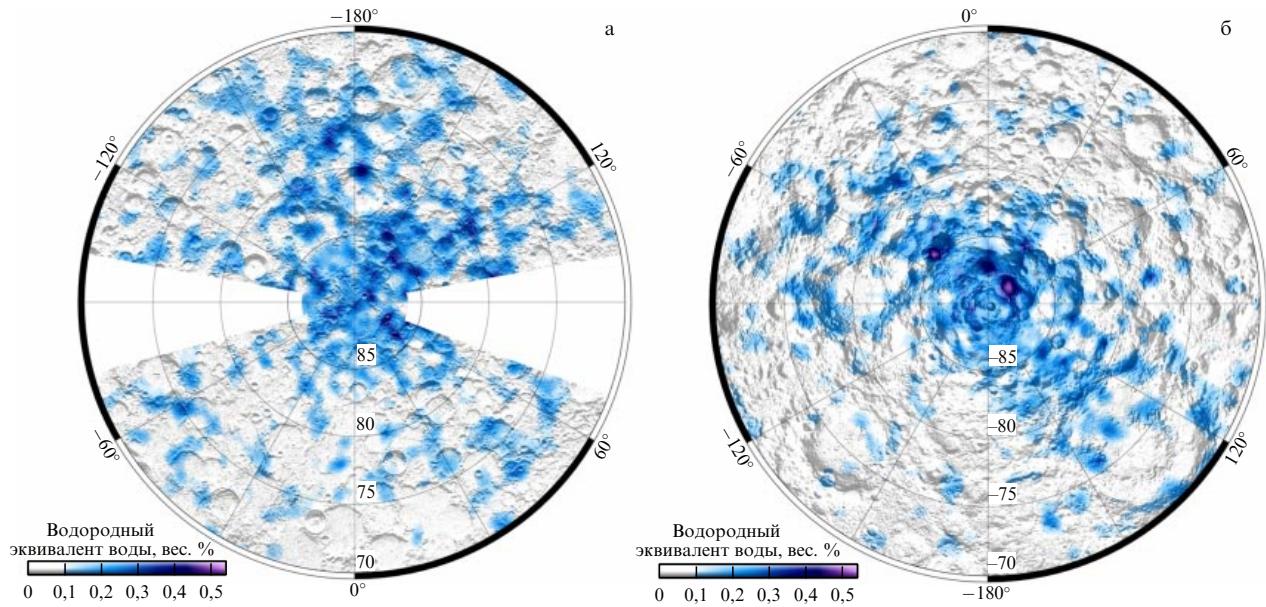


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Распределение воды/водяного льда (при предположении однородного распределения по глубине) в северной (а) и южной (б) полярных областях Луны по данным российского эксперимента ЛЕНД на борту КА НАСА LRO. (Из работы [58].)

Необходимо добавить, что эксперимент ЛЕНД открыл удивительную картину, показав, что не во всех вечно затенённых кратерах есть водяной лёд и, наоборот, освещённые окрестности некоторых таких кратеров могут обладать повышенным содержанием водяного льда [57]. Представленная на рис. 2 самая современная карта распределения подповерхностного водяного льда, полученная по данным ЛЕНД, показывает, что такие крупные образования, как кратеры Шумейкера, Фаустини и Хауорта, и их окрестности могут содержать до 0,5 % воды, если для расчёта использовать однородное по глубине распределение водяного льда [58].

Картографирование лунной поверхности по данным других приборов (Diviner и LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project)), установленных на борту КА LRO, позволило оценить температуру поверхности и измерить отражение поверхности в ультрафиолетовом диапазоне спектра. На основании этого была оценена возможная глубина, на которой может залегать водяной лёд, и получено указание на существование тонкого слоя поверхности водяного льда в окрестности некоторых вечно затенённых кратеров [60, 61]. На этом космическом аппарате установлен также радар Mini-RF (Miniature Radio-Frequency). Спустя 20 лет после проведения измерений на борту миссии Clementine был подготовлен специальный эксперимент, в ходе которого выполнены совместные наблюдения радаром на орбите вокруг Луны и радиотелескопом, находящимся в астрофизической обсерватории Аресибо. Эти наблюдения также показали, что особенности некоторых полярных кратеров могут быть интерпретированы как признаки существования приповерхностного водяного льда [62].

Итак, с одной стороны, имеется огромный объём наблюдательных данных, накопленный более чем за 20 лет различными лунными научными миссиями, а с другой — пока не удаётся представить целостную картину распределения и природы происхождения летучих веществ в полярных областях Луны. Главной проблемой является катастрофическое отсутствие полного соответ-

ствия между различными наблюдениями. В рамках анализа одних экспериментальных данных показано, что водяной лёд может находиться в определённых областях на поверхности Луны, в то время как другие эксперименты не обнаруживают признаков, подтверждающих этот результат. Можно предположить, что природа наблюданного явления, механизмы образования и распределения водяного льда являются гораздо более сложными, чем считалось ранее.

Полярные кратеры представляют собой холодные ловушки, способные захватывать и сохранять в течение геологически длительного времени летучие вещества, так или иначе попавшие на поверхность Луны. Можно выделить три механизма, объясняющие происхождение "полярной" воды. Протоны солнечного ветра, бомбардирующие поверхность Луны, могут вступать во взаимодействие с кислородом, входящим в состав лунных минералов, и образовывать гидроксильную группу OH и молекулы воды, которые в свою очередь могут мигрировать к полюсам [53, 54]. С другой стороны, на ранних этапах эволюции бомбардировка кометами и астероидами создавала кратковременную атмосферу, насыщенную водяными парами, которые конденсировались на холодных полюсах, образуя залежи водяного льда [37, 38, 41, 42]. Наконец, вулканическая активность, пик которой имел место примерно 3,5 млрд лет назад, также могла создать кратковременную (длительность диссипации примерно 70 млн лет) и достаточно плотную атмосферу (1–6 % от земной атмосферы) с водяными парами, выброшенными из недр молодой Луны [36]. Общее количество воды в такой атмосфере могло доходить до 10^{17} г [36].

Возможность наличия воды в недрах Луны подтверждается недавним наблюдением пирокластических отложений по данным инфракрасной спектрометрии, полученным прибором M³ (Moon Mineralogy Mapper), установленным на борту индийского орбитального аппарата Chandrayaan-1 [63]. В измеренных спектрах обнаружены полосы поглощения на длине волны 2,85 мкм. По этому признаку идентифицируют минералы, содержащие моле-

кулы воды или гидроксильную группу OH. Анализ данных показал, что относительная доля воды может составлять до 300–400 ppm [63]. Эти данные подтверждают, что обнаружение вулканических стёкол с богатым водосодержанием не является уникальной находкой, а может характеризовать реальный состав летучих веществ в недрах Луны [63]. Кроме того, ещё 10 лет назад, используя совместный анализ данных приборов M³ [64], VIMS (Visible and Infrared Mapping Spectrometer) на борту Cassini [65] и HRIIR (High Resolution Instrument – Infrared spectrometer) на борту КА Deep Impact [66], удалось показать, что молекулы воды и гидроксильные группы OH могут присутствовать не только на полярных, но и на умеренных широтах. Тем самым ещё раз подтверждается предположение, что Луна не является настолько сухой, как считали ранее.

Что касается полярных холодных ловушек, то одна из возможных гипотез их формирования состоит в том, что в результате перераспределения масс ось вращения Луны могла сместиться. Последнее привело к смещению лунных полюсов и изменению характера термодинамических процессов в полярных областях [67]. На это явление могут указывать границы областей возможного залегания водяного льда, полученные по данным нейтронных спектрометров [68, 69]. Указанные области смещены в сторону от южного и северного полюсов Луны, но при этом располагаются вдоль одной оси. Фактически сейчас мы не видим явных признаков наличия водяного льда непосредственно на полюсах Луны (как, например, в кратере Шеклтона [70]), хотя, казалось бы, именно полюсы Луны — наиболее благоприятное место для его залегания. Во времена поздней метеоритной бомбардировки 3,8 млрд лет назад (до смещения оси) современные полюсы ещё не являлись холодными ловушками и не могли захватывать и сохранять летучие вещества из атмосферы, созданной выбросами газа и пыли в результате столкновений с кометами и астероидами [67].

Итак, можно констатировать, что полярные области Луны, по всей видимости, являются огромными резервуарами водяного льда, но источники его происхождения (экзогенные или эндогенные) и причины, повлиявшие на характер его распределения, до сих пор не объяснены. В решении данных вопросов смогут помочь будущие полярные посадочные миссии, обладающие возможностями глубинного забора лунного вещества и проведения его детального анализа. Конечная цель подобных миссий — отбор полярных образцов (с обязательной консервацией для сохранения летучих веществ) и доставка их на Землю с целью проведения более углублённых исследований. К таким проектам относятся прежде всего российские миссии "Луна-Глоб" и "Луна-Ресурс", в которых активно участвует также ЕКА. Их запуск намечен соответственно на 2019 г. и 2022 г., а на их борту будут находиться грунтозаборные устройства и аналитические лаборатории, которые позволят достать с глубины до 1,5 м образцы лунного грунта, обнаружить в них летучие вещества и определить их химический и изотопный состав.

Необходимо отметить, что наличие холодных полярных ловушек не является уникальным свойством только одной Луны. Похожие объекты есть и в полярных областях Меркурия, и именно там недавно были обнаружены большие скопления водяного льда. В разделе 4 обсуждаются наблюдаемые различия этих небесных тел.

4. Парадокс Луны и Меркурия

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета, и ожидать найти на ней воду, на первый взгляд, кажется наивной идеей. Медленное вращение Меркурия вокруг собственной оси приводит к тому, что его сторона, обращённая к Солнцу, может разогреваться до температуры выше 400 °C. Тем не менее считается установленным, что водяной лёд на этой планете не просто есть, но и его довольно много. То, что ожидали найти на Луне, обнаружили на Меркурии. Ось вращения Меркурия, как и ось вращения Луны, имеет небольшой наклон, поэтому в некоторые полярные кратеры никогда не попадает солнечный свет, а значит, там создаются все условия для сохранения водяного льда и других летучих веществ, образовавшихся в результате метеоритной бомбардировки (см., например, [41, 42, 71, 72]).

Более 25 лет назад с Земли была проведена радиолокация полярных областей Меркурия и обнаружены яркие области, которые интерпретировались как скопления водяного льда [73, 74]. В 2004 г. к Меркурию отправилась автоматическая научная станция НАСА MESSENGER (Mercury Surface, Space Environment, Geo-chemistry and Ranging) [75]. Спустя семь лет станция была выведена на эллиптическую орбиту вокруг Меркурия и начала непрерывное картографирование его поверхности. С помощью фотокамер и лазерного альтиметра были построены детальные карты рельефа и определены полярные кратеры, которые являются холодными ловушками. Было обнаружено, что яркие особенности, идентифицированные в ходе радиолокации с Земли, удивительным образом (рис. 3) совпадают с такими кратерами, подтверждая обнаружение водяного льда [78, 79]. На КА MESSENGER был также установлен нейтронный

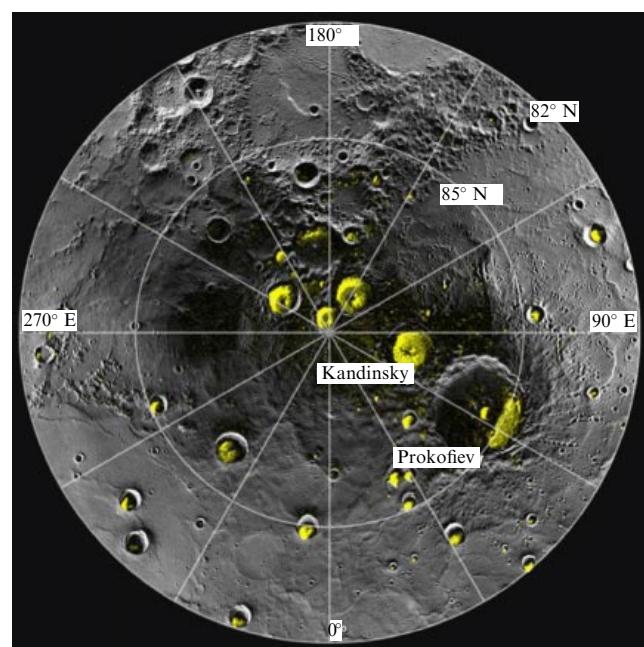


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Северный полюс Меркурия: наложение на изображение рельефа (по данным прибора WAC, установленного на КА НАСА MESSENGER) ярких областей (отмечены жёлтым цветом), в которых посредством радиолокации с Земли обнаружен водяной лёд. Отмечены положения кратеров Прокофьева и Кандинского. (Данные работ [76, 77].)

спектрометр, с помощью которого удалось обнаружить понижение потока эпитетловых нейтронов и интерпретировать это как повышенное содержание водорода (в составе водяного льда) в северной полярной области. Из-за широкого поля зрения (с высоты 200 км характерный размер разрешаемых областей составляет более 300 км) не удалось непосредственно оценить понижение нейтронного потока от поверхности относительно нейтронного потока от вечно затенённых кратеров, но численное моделирование с учётом экспериментальных данных подтвердило, что наблюдаемый эффект объясняется присутствием большого количества водяного льда в холодных ловушках [80].

Это существенно отличается от результатов исследований Луны, поскольку данные радиолокации с Земли и с орбиты Луны не показывают прямой корреляции с постоянно затенёнными кратерами, а результаты нейтронной спектроскопии высокого разрешения не позволяют отождествить все холодные ловушки с залежами водяного льда.

MESSENGER до окончания своей работы в 2015 г. находился на сильно вытянутой эллиптической орбите с перигелем на высоте 200 км над северным полюсом и афелием на высоте более 10000 км, поэтому большая часть экспериментальных данных относится только к северному полюсу, а детальной информации о южном полушарии было получено не так много. Тем не менее с помощью фотокамер КА удалось построить примерную карту расположения холодных ловушек на южном полюсе и показать, что она тоже согласуется с результатами повторной радиолокации, проведённой радиотелескопами обсерваторий Годстоун и Аресибо. Эти исследования были выполнены в 2005 и 2012 гг. [76]. Полученные данные подтверждают общую картину, согласно которой 90 % наиболее ярких радиолокационных особенностей находится внутри вечно затенённых кратеров, что соответствует гипотезе о наличии водяного льда [81]. При этом не все выявленные вечно затенённые кратеры демонстрируют подобные особенности, что, безусловно, требует дальнейшего исследования и построения более сложных моделей [81].

Современные оценки показывают, что толщина отложений водяного льда в полярных областях Меркурия может составлять несколько десятков метров [82, 83], а в качестве источника в основном рассматривается кометная и астероидная бомбардировка. Кроме того, необходимо учитывать наличие слабого дипольного магнитного поля и близость к Солнцу. Это позволяет предположить, что имплантация протонов солнечного ветра преимущественно в полярных областях могла играть гораздо большую роль, чем на Луне, а обнаруженный лёд может иметь и солнечное происхождение.

Возможно, ответ будет получен на основе данных следующей миссии к Меркурию — *BepiColombo*, планируемой ЕКА. Её запуск намечен на 2018 г. Орбита КА будет менее вытянутой, с перигелем на высоте 400 км и афелием на высоте 1500 км [84]. В состав научной аппаратуры включён российский нейтронный и гамма-спектрометр МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр), что позволит более тщательно изучить и сравнить элементный состав на южном и северном полюсах [85].

Если на Меркурии и на Луне есть водяной лёд, то какова тогда ситуация на других планетах земной группы,

Венере и Марсе? В разделах 5, 6 представлены результаты наблюдений Венеры и Марса, а именно: какая вода была найдена и как могла эволюционировать гидросфера на этих планетах.

5. Венера — "сухая" сестра Земли

Венера — планета земной группы, которую часто называют сестрой-близнецом Земли ввиду примерно одинаковых размера, массы, среднего химического состава и близкого расположения от Солнца. Также возможно, что на ранних стадиях эволюции Солнечной системы развитие Земли и Венеры происходило по схожим сценариям. На этом, правда, сходство заканчивается. Так, атмосфера Венеры в 92 раза плотнее земной и практически полностью состоит из углекислого газа. Кроме того, Венера — самая горячая планета Солнечной системы. Средняя температура на её поверхности выше 450 °C. Это даже больше, чем температура на поверхности Меркурия. Хотя в прошлом астрономы считали, что благодаря плотной атмосфере на Венере постоянно идут тропические дожди и существуют океаны, на самом деле из-за чудовищно высокой температуры её поверхность является экстремально сухой и даже в самой атмосфере содержание водяных паров в несколько сотен раз меньше, чем на Земле.

Полагают, что ввиду сходства процессов формирования Земли и Венеры на ранней Венере имелись океаны жидкой воды. Но испарения с поверхности океанов приводили к насыщению атмосферы водяными парами, что усиливала парниковый эффект и вызывало дальнейшее повышение температуры и, соответственно, испарение воды. Таким образом происходило неконтролируемое усиление парникового эффекта, приведшее к тому, что вся вода с поверхности Венеры испарилась в атмосферу [86, 87]. Под воздействием ультрафиолетового излучения происходила диссоциация воды на водород и кислород, которые затем уносились в космос солнечным ветром, так как у Венеры нет собственного глобального магнитного поля, как у Земли. Исследования с борта КА *EKA Venus Express* показали, что потери атмосферного водорода происходят до сих пор и составляют более 10^{24} атомов в секунду [88]. Необходимо также учитывать, что светимость молодого Солнца и интенсивность солнечного ветра могли существенно отличаться от таких при современных условиях (см., например, [89–91]). Через фотохимические реакции и фотоионизацию рентгеновское и жёсткое ультрафиолетовое излучение Солнца могло оказывать существенное влияние на эволюцию атмосфер планет земной группы [92]. Это тем более важно, потому что Венера находится ближе к Солнцу, чем Земля. По современным оценкам, экстраполируя потери кислорода и водорода в прошлое и моделируя излучение молодого Солнца, считают, что Венера могла потерять количество воды, сопоставимое с таким в земных океанах [92].

Дополнительным указанием на то, что на ранней Венере могли существовать океаны, является величина изотопного соотношения D/H. Измерения с Земли и борта космических аппаратов показали, что оно примерно в 150 раз больше земных значений. Это означает, что большая часть более лёгкого изотопа водорода (входившего в состав воды) улетучилась в космос [93–95]. Инфракрасное сканирование поверхности Венеры во время пролёта КА

Galileo показало, что высокогорные области выглядят более тёмными в инфракрасном диапазоне и, возможно, они сложены из гранита, который не мог образоваться без присутствия океанов [96].

В последние десятилетия Венера не была избалована вниманием исследовательских космических миссий. Прежде всего это касается посадочных аппаратов, срок жизни которых на поверхности Венеры составляет всего лишь считанные часы из-за экстремальных условий работы. В ближайшем будущем планируется подготовить несколько новых посадочных экспедиций, одна из которых — российский проект "Венера-Д". Можно надеяться, что в ходе работы этих миссий удастся получить много новой информации и, возможно, ответить на вопрос о том, что случилось с океанами на Венере.

6. Был ли Марс тёплым и влажным?

Современный Марс — сухой, холодный и, по всей видимости, необитаемый. У него тонкая атмосфера, что не позволяет обеспечить существование жидкой воды на поверхности. Тем не менее на высоких северных и южных широтах (выше $50-60^\circ$ северной и южной широты) обнаружены огромные запасы подповерхностного водяного льда, залегающего на небольшой глубине, от нескольких сантиметров до полуметра. Лёд смешан с грунтом, но его массовая доля составляет более 50 % [97–101]. В области полярных шапок лёд практически выходит на поверхность — так, остаточная северная полярная шапка Марса целиком состоит из льда. Запасы водяного льда настолько велики, что если его растопить, то вся поверхность планеты покроется равномерным слоем воды толщиной в несколько десятков метров. Поэтому, как правило, говорят не о гидросфере, а о криолитосфере Марса (см., например, [102]). Первоначально залежи льда были обнаружены с орбиты гамма- и нейтронными спектрометрами, в том числе российским прибором ХЕНД (от англ. HEND — High Energy Neutron Detector) [99]. Впоследствии эти измерения были дополнены наблюдениями с помощью радаров, установленных на орбитальных аппаратах ЕКА Mars Express и НАСА MRO, которые показали, что толщина ледяного щита под поверхностью планеты может составлять несколько километров (см., например, [103]).

Угол наклона оси вращения Марса существенно прецессировал в ходе его эволюции и эпизодически мог увеличиваться до $45-55^\circ$ [104]. Это означает, что в такие периоды льдом могли покрываться не только полярные области, но и области на более умеренных широтах. Уменьшение наклона, наоборот, вызывало таяние ледников. На современном Марсе по данным фотосъёмки высокого разрешения (миссия НАСА MRO) до сих пор заметны следы отступления ледников (например, в основании горы Олимп (см. [105])). Несмотря на то что сейчас наклон оси вращения планеты составляет около 25° , рельефный лёд, погребённый под толстым слоем грунта, мог сохраниться на умеренных широтах [106, 107].

Подтверждение того, что лёд может находиться близко к поверхности на высоких широтах, получено и по данным посадочной миссии Phoenix, которая работала на поверхности Марса в 2008 г. [108]. Её место посадки было выбрано в северной высокотропической области (около 70° северной широты) на основе данных гамма-спектроскопии орбитальной миссии Mars Odyssey, пока-

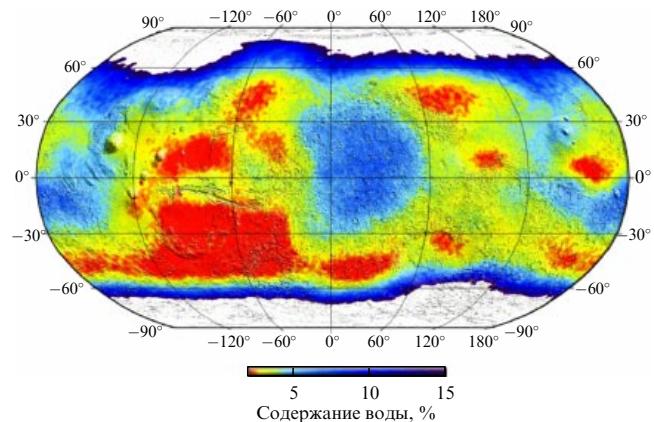


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Карта распределения подповерхностной воды на Марсе по данным российского прибора ХЕНД, установленного на КА НАСА Mars Odyssey. Белым цветом отмечены высокотропические области, в которых в подповерхностном грунте доминирует водяной лёд, градацией цвета показано распределение связанный воды.

завших близкое расположение к поверхности залежи подповерхностного льда в районе посадки [108]. Выкопав с помощью манипулятора небольшую траншею, космический аппарат зафиксировал на её дне скопления светлого материала, который испарился в атмосферу в течение нескольких дней. Дальнейшее изучение показало, что это был водяной лёд [109–111].

Картографирование поверхности планеты (орбитальные КА НАСА MGS (Mars Global Surveyor), Odyssey, MRO) показало, что вода в различных формах может присутствовать не только в полярных и приполярных областях, но и в экваториальных широтах [99, 112, 113]. Исследование марсианской поверхности с помощью нейтронной и гамма-спектроскопии на борту орбитального аппарата выявило повышенное содержание воды в 10–15 % по массовой доле в грунте областей Аравии и Мемнона [99, 112]. В основном это физически и химически (в составе минералов) связанные воды. Современная карта распределения воды на поверхности Марса представлена на рис. 4 (по данным эксперимента ХЕНД).

С помощью инфракрасной спектроскопии с борта орбитальных КА MGS, Mars Express, Mars Odyssey и MRO обнаружены отложения различных минералов, в том числе филлосиликатов, которые могли образоваться только при длительном пребывании пород в водной среде при высоких температурах (см., например, [114]). Марсоходы Spirit и Opportunity на протяжении многих лет исследовали кратер Гусева и Плато Меридиана и также идентифицировали огромное количество признаков, свидетельствующих об активной гидрологической истории Марса на ранних стадиях его эволюции [115–118]. Наконец, несколько раз за время исследований Марса на склонах возвышенностей и валов кратеров были обнаружены следы вытекания жидкости, которая была интерпретирована как вода или солевые растворы, прорвавшиеся на поверхность из подповерхностных источников [119, 120].

В 2012 г. внутри кратера Гейла ($5,37^\circ$ южной широты, $137,81^\circ$ восточной долготы) совершил посадку тяжёлый марсоход НАСА Curiosity, предназначенный для поиска следов внеземной жизни, которая могла зародиться на раннем Марсе [121]. Работа этого марсохода продол-

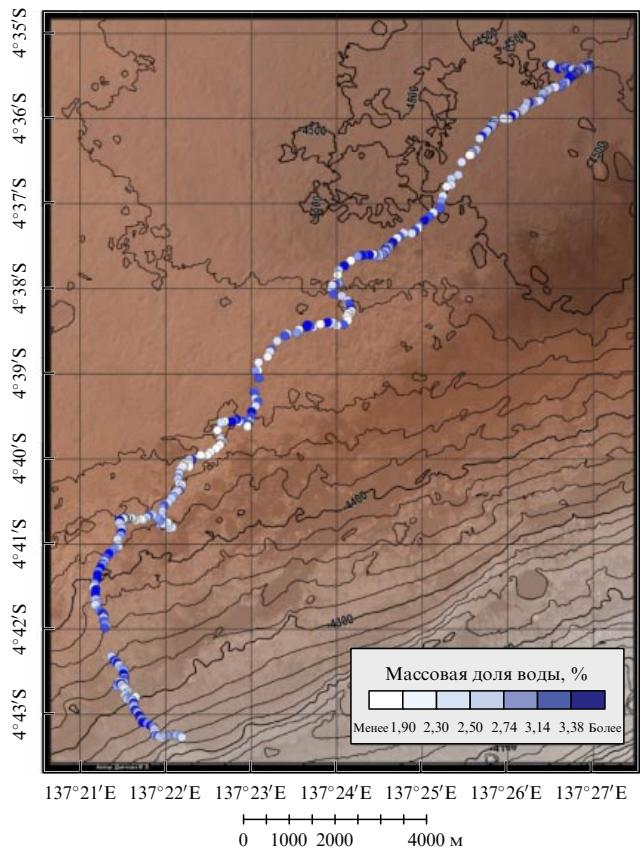


Рис. 5. Содержание подповерхностной воды вдоль траектории марсохода Curiosity по данным российского прибора ДАН.

жается уже более пяти лет, в течение которых он прошёл около 20 км, исследуя слоистые отложения внутри кратера. Хотя современный кратер Гейла выглядит довольно сухим, даже по сравнению с другими экваториальными областями, было показано, что на более ранних этапах эволюции он несколько раз заполнялся водой, превращаясь в озеро [122–124]. На рисунке 5 показан профиль подповерхностной связанной воды, измеренный российским прибором ДАН (Динамическое альбедо нейтронов) вдоль трассы движения марсохода [125–129]. Слоистые осадочные отложения внутри кратера Гейла представляют собой геологическую запись событий, связанных с эволюцией гидрологии и климата Марса в позднюю нойскую и раннюю гесперийскую эры [130]. Гипотезу о существовании озера и, соответственно, длительного присутствия воды на поверхности подтверждают находки глинистых минералов (филосиликатов), дельтовых и сульфатно-цементированных отложений [122, 123, 131]. Для объяснения условий их образования и распределения внутри кратера можно использовать модели подповерхностной и поверхностной гидрологии, показывающие, как грунтовые воды и внешние источники жидкой воды сочетались друг с другом на разных ступенях эволюции [132]. На основе анализа полученных данных был даже сделан вывод о том, что во время существования озера кратер Гейла представлял собой благоприятную среду для возможного зарождения и поддержания жизни [122].

Многолетние исследования Марса показывают, что вода существенно влияла на ход его геологической истории. С помощью лазерной альтиметрии поверхно-

сти с борта КА MGS составлены подробные карты рельефа поверхности Марса, на которых хорошо видны разветвлённые сети долин, выводных каналов, дельтовидные и озёрные отложения, разбросанные по обширной территории экваториальных областей и южных нойских возвышенностей, свидетельствующие о протекании огромных объёмов жидкой воды [123, 133, 134]. Более того, анализируя рельеф северной низменности, исследователи идентифицировали черты береговой линии океана [135, 136], покрывавшего примерно треть планеты.

Обобщая указанные факты, можно прийти к выводу о том, что на ранних этапах эволюции (нойская и гесперийская эры) Марс, по-видимому, был тёплым и влажным, а на его поверхности, возможно, даже существовал океан. Затем, вероятно, в результате катастрофических событий Марс потерял глобальное магнитное поле, большую часть своей атмосферы и всю жидкую воду.

Начиная с сентября 2014 г. на орбите вокруг Марса работает миссия НАСА MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN mission), предназначенная для изучения структуры, состава и переменности верхних слоёв марсианской атмосферы и в конечном итоге призванная ответить на вопрос о том, что случилось с атмосферой Марса в ходе его эволюции [137]. Текущие потери атмосферы в результате взаимодействия с солнечным ветром можно экстраполировать на прошлую эпоху и, соответственно, попытаться оценить толщину атмосферы раннего Марса. Анализируя изотопное отношение $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, можно судить о том, сколько летучих веществ было потеряно за несколько миллиардов лет эволюции. Химически инертный газ аргон может служить хорошим индикатором того, как исчезали летучие вещества из марсианской атмосферы. Данные наблюдений, полученные миссией MAVEN, показывают, что около двух третей атмосферного аргона улетучилось в космос [138]. С учётом многих неопределённостей, связанных с экстраполяцией текущих измерений на несколько миллиардов лет назад, можно предположить, что в далёком прошлом толщина атмосферы Марса была такой же, как и у Земли (примерно 1 бар или даже немного больше). А если все потери кислорода и водорода представить в виде воды, то её можно распределить по всей поверхности Марса слоем толщиной в несколько десятков метров.

Современные численные модели марсианского климата пытаются использовать эти данные и, соответственно, установить, какова была средняя годовая температура на планете в раннюю эпоху. Для того чтобы обеспечить на поверхности постоянные условия для сохранения жидкой воды, необходимо повысить среднюю годовую температуру до величины выше 273 К. Это достаточно непростая задача, учитывая, что сегодня средняя годовая температура на планете всего 225 К. Только атмосфера углекислого газа, подобная земной, способна создать парниковый эффект, но и то явно недостаточный, чтобы существенно повысить температуру, даже если мы приравняем альбедо поверхности к нулю. Важно также учесть, что светимость молодого Солнца 3–3,8 млрд лет назад (а именно этим периодом датируется возникновение сети флювиальных долин) составляла всего 70–80 % от современных значений [91]. Добавление паров воды в атмосферу повышает среднюю температуру, но всего лишь до ~ 240 К [139–143].

Последние исследования предполагают возможность включения в рассмотрение других парниковых газов, в

частности водорода и метана. В случае водорода можно создать модель атмосферы, согласно которой средняя температура превысит точку плавления водяного льда, но для этого потребуется четыре земных атмосферы CO_2 и более 5 % водорода, что противоречит современным данным (в марсианском грунте просто нет такого количества карбонатов, которого можно было ожидать исходя из такой толстой атмосферы). В то же время добавление в рассмотрение метана может решить поставленную задачу. Если смешать в равных пропорциях водород и метан (каждого по $\sim 3,5\%$) в атмосфере из CO_2 с давлением 1,5 бар, то можно обеспечить требуемые условия [142]. Основной проблемой здесь является происхождение источников необходимого количества парниковых газов. В качестве таковых рассматриваются вулканическая активность (возможный источник водорода), падения метеоритов и серпентинизация оливиновых пород (возможный источник метана). Все эти условия ограничивают длительность существования подобной атмосферы короткими периодами в несколько сотен тысяч лет, означая, что Марс лишь эпизодически мог быть тёплым и влажным даже на ранних этапах своей эволюции.

На основе большинства климатических вычислений можно предположить, что в нойскую эру Марс был ледяным и холодным со средними годовыми температурами 210–240 К. Поэтому необходимо объяснить, как в таких условиях могли образоваться различные геоморфологические особенности, которые современной наукой идентифицируются как признаки существования и протекания жидкой воды по поверхности Марса. Для того чтобы сформировать наблюдаемую систему долин и каналов, заполнить озёра и образовать дельты рек, необходимо от 3 до 100 м эквивалентного слоя воды (толщина слоя воды в пересчёте на всю поверхность планеты [144]). Время, которое для этого требуется, составляет от 10^5 до 10^7 лет [145], т.е. в худшем случае это всё равно существенно меньше, чем длительность нойской эры (немного менее 1 млрд лет). Если максимальная температура в течение летнего сезона не поднималась выше 273 К, то на помощь могут прийти только эпизодические, но катастрофические события, связанные с интенсивным вулканизмом или падениями метеоритов (именно то, чем характеризуется нойская эра). Если же предположить, что летом дневные температуры всё-таки регулярно поднимались выше 273 К, то можно обратиться к земным аналогам и в качестве примера рассмотреть сухие долины в Антарктиде, где средняя температура составляет 253 К, а средние дневные температуры во время южного лета в течение многих недель могут быть выше нуля градусов Цельсия. Это позволяет растопить лёд и образовать формы рельефа и отложения, аналоги которых мы наблюдаем на Марсе [146].

Последние исследования, объединяющие в себе результаты численного моделирования марсианского климата и анализа существующих флювиальных форм рельефа, доказывают, что условия для подобных гипотез могут быть соблюдены. Для этого требуется, чтобы в окрестности экваториальных областей, где располагается сеть долин, находилось достаточно большое количество льда, а сезонные температуры поднимались выше нуля, чтобы его растопить. Процесс таяния льдов должен периодически повторяться в течение 10^8 лет, для того чтобы полностью обеспечить формирование всей

наблюдаемой сети долин. Для этого на раннем Марсе достаточно было иметь давление в 1 бар, наклон оси вращения 25° , круговую орбиту вокруг Солнца и небольшое количество парниковых газов (чтобы повысить среднегодовую температуру до ~ 243 К). Последнее условие можно опустить, если эксцентриситет орбиты Марса изменить до 0,17 [147].

Гипотеза о холодном и ледяному Марсе, но с сезонным таянием льдов, должна объяснять кроме различных флювиальных форм рельефа большое разнообразие минералов, которые находят в марсианском грунте и которые, как считается, образовались в тёплой и влажной среде в присутствии большого количества воды. Недавние работы показывают, что отложения глинистых минералов, по всей вероятности, формировались как под поверхностью, так и на поверхности Марса, поэтому они могут служить источником дополнительной информации о том, как изменился марсианский климат. Смеси смектитов, хлоритов и карбонатов, скорее всего, образовывались под поверхностью, в то время как на формирование залежей чистых Fe^{3+} -смектитов и сульфатов больше влияли условия на самой поверхности [148]. Для того чтобы обеспечить формирование гидратированных минералов в холодном климате, необходимо компенсировать эффект низких температур с помощью большего количества времени, которое надо затратить для завершения процесса образования минералов. Численное моделирование показывает, что такие минералы, как смектиты, вполне могли образоваться в ходе кратковременных тёплых сезонов, которые случались либо периодически, либо спорадически на холодном и влажном в целом Марсе [148].

В итоге возникает правдоподобное объяснение экспериментальных данных, которое не требует постоянного наличия на Марсе тёплого и влажного климата в течение поздней нойской и ранней гесперийской эр. Следовательно, по-прежнему остаётся актуальным вопрос о том, являлся ли Марс на ранних стадиях своей эволюции всё время тёплым и влажным. Возможно, он всё время был холодным и ледистым и лишь изредка оттаивал в результате сезонных изменений, спорадической вулканической активности или столкновений с крупными астероидами.

Исследования Марса активно продолжаются. Сейчас на орбите проходит стадию аэродорможения орбитальный космический аппарат ЕКА TGO (Trace Gas Orbiter), в состав которого включён российский коллимированный нейтронный спектрометр ФРЕНД (от англ. FRENDS — Fine Resolution Epithermal Neutron Detector). Этот инструмент позволит повысить до ~ 40 км пространственное разрешение при картографировании залежей подповерхностного льда и воды и обеспечить прямое сопоставление с данными, полученными с борта марсоходов вдоль пути их следования (каждый из них уже прошёл несколько десятков километров). Кроме того, в 2020 г. будут запущены ещё два марсохода. Один из них создаётся под эгидой ЕКА — совместный европейско-российский проект ExoMars [149], а другой — под эгидой НАСА (аналог марсохода Curiosity).

Новые исследования на поверхности позволят собрать и проанализировать больше образцов грунта, впервые провести глубинное бурение (до 2 м), а значит, выполнить непосредственный анализ подповерхностных осадочных пород. Последнее может помочь в подтверж-

дении гипотез тёплого/влажного или холодного/льдистого Марса.

7. Вода во внешней части Солнечной системы

В современной Солнечной системе снежная линия располагается примерно на расстоянии 2,7 а.е. от Солнца, где температура радиационного равновесия опускается ниже ~ 150 К и водяной лёд стабилен на поверхности безатмосферных тел на геологических временных масштабах. Карликовая планета Церера, самый массивный объект в основном поясе астероидов, находится на расстоянии $\approx 2,77$ а.е. от Солнца, имеет низкую объёмную плотность ($2,16 \text{ г см}^{-3}$) и, вероятно, содержит до 50 % летучих элементов по массе [150], а в нескольких областях на её поверхности был обнаружен водяной лёд [151, 152].

Вода может заключаться, помимо льда, в филлокатах и других гидратированных минералах. Кроме воды Церера содержит заметное количество аммиака и CO/CO₂. Об этом свидетельствует широкое распространение на поверхности Цереры аммиачных соединений и карбонатов, обнаруженных на основе наземных наблюдений [153, 154] и подтверждённых миссией НАСА Dawn [155]. Несколько других объектов из пояса астероидов имеют сходные признаки присутствия летучих веществ: достаточно крупный астероид 10 Hygiea и меньшие по размеру (< 200 км) астероиды демонстрируют полосу поглощения на длине волн 3,15 мкм, связываемую с соединениями аммиака [156]. Наиболее вероятным представляется образование этих объектов во внешней части Солнечной системы, что подтверждают современные динамические модели образования Солнечной системы, согласно которым на ранних этапах развития происходят массовые миграции планетозималей в области размером от 8 до 15 а.е. [157]. Альтернативные сценарии подразумевают образование этих астероидов примерно там же, где мы их наблюдаем, но на них происходит аккреция планетозималей, мигрировавших из внешних частей Солнечной системы [158, 159]. Однако миграция планетозималей через относительно расчищенное Юпитером пространство в протопланетном диске могла привести к источению в них запасов наиболее летучих соединений, особенно аммиака [160]. Следовательно, образование Цереры и других крупных астероидов во внешних областях Солнечной системы можно рассматривать как наиболее вероятное.

На больших гелиоцентрических расстояниях водяной лёд является основной составляющей поверхности и внутренних частей спутников, вращающихся вокруг внешних планет, и он также доминирует в составе объектов пояса Койпера. Считается установленным присутствие воды в недрах планет-гигантов, однако её количество там остаётся плохо известным. Вода может существовать не только в нескольких твёрдых фазах водяного льда, в зависимости от температуры и давления (кристаллические или аморфные, полиморфные низкого или высокого давления), но и в жидким состоянии, по крайней мере, в недрах нескольких ледяных лун Юпитера и Сатурна и, наконец, в газообразном состоянии, особенно в экзосферах малых тел и глубоких слоях атмосфер планет-гигантов.

Следует отметить, что водный лёд редко встречается в чистом виде. Вода легко смешивается с другими ве-

ществами, переходя либо в гидратированные минералы, либо в структуру клатрат-гидратов — соединений, образующихся посредством включения молекул воды в полости кристаллической решётки, состоящей из молекул другого типа. На то, в какой форме существует вода на том или ином небесном теле, влияют давление и температура, характер присутствующих летучих веществ и их обилие по отношению к количеству воды. Несмотря на то что в наших знаниях о планетах-гигантах, их внутренней структуре и структуре их атмосфер есть имеются многочисленные неопределённости, космические миссии и наземные наблюдения предоставили достаточно информации для выяснения их основных характеристик.

Юпитер и Сатурн состоят в основном из водорода и гелия, но, скорее всего, они содержат и больше летучих веществ, чем все вместе взятые другие объекты Солнечной системы, за исключением Солнца. Предполагается, что Юпитер содержит элементы тяжелее гелия в количестве от 10 до 40 масс Земли (M_E), а Сатурн содержит таких элементов в количестве от 20 до $30 M_E$ [161–165]. Причём если внутренняя структура значительно отличается от адиабатической, то тогда может быть ещё большее количество тяжёлых элементов [166]. Часть этих тяжёлых элементов находится в центральном ядре планеты, а другая их часть распределена в его оболочке. Результаты экспериментальных исследований гравитационных полей Юпитера и Сатурна накладывают ограничение на массу этого ядра: менее $20 M_E$ [162, 164, 165, 167].

В настоящее время обсуждаются два альтернативных сценария образования планет-гигантов: модель акреции на центральное ядро и модель развития гравитационных неустойчивостей в протопланетном диске (обе модели представлены, например, в [168]). В обеих этих моделях описанное выше центральное ядро является важным компонентом для формирования планеты-гиганта. Аккреционный сценарий предполагает, что планета-гигант может образоваться в результате сжатия водородно-гелиевой оболочки вокруг плотного ядра с массой, оценённой приблизительно в $10 M_E$ [169–172]. Другая модель подразумевает гравитационную неустойчивость протопланетного диска с образованием плотного ядра, за которым следует захват тяжёлых элементов [173, 174]. В обоих случаях наличие большого количества твёрдых частиц (в виде пылевых зёрен и мелких камней) во внешней части формирующейся Солнечной системы, по-видимому, имеет важное значение для образования планет-гигантов, поскольку оно помогает быстро сформировать ядро [175–177].

Естественно, вода, как и другие летучие вещества, присутствует в атмосферах планет-гигантов. Водосодержащие облака располагаются ниже облаков с соединениями углерода, азота и серы, что делает их наиболее сложными для наблюдения, тем не менее они являются самыми важными с точки зрения теорий динамики атмосферы и происхождения планет. Конденсация облаков водяного льда происходит при давлении около 5 бар на Юпитере, 10 бар на Сатурне и при давлении в несколько сотен бар на ледяных гигантах — Уране и Нептуне. Идентификация этого облачного слоя по данным дистанционного зондирования является сложной задачей ввиду широкого диапазона поглощения газов и аэрозолей над ним. Только на Юпитере облака были идентифицированы на той высоте, где должны располагаться облака из льда H₂O [178–180]. Активность молний, связанная с

разделением электрических зарядов в облаках водяного льда, непосредственно наблюдалась также на Юпитере [181, 182]. Спектроскопически идентифицируемый водяной лёд наблюдался только космическим аппаратом Voyager на длине волны около 44 мкм [183].

Газообразная вода, находящаяся над облачным слоем и следующая кривой давления насыщенного пара, была обнаружена на Юпитере с борта КА Galileo и Cassini по присутствию в измеренных спектрах особенностей на длине волны 5 мкм [184, 185]. Однако точно оценить её концентрацию и вертикальное распределение чрезвычайно сложно. Учитывая, что измерения зондом Galileo во время спуска в атмосфере показывали увеличение концентрации воды до тех пор, пока они не оборвались вблизи отметки давления 22 бар [186–188], вопрос о распределении концентрации воды в глубь Юпитера остаётся нерешённым. Возможно, вскоре можно ожидать новых данных, поскольку микроволновый радиометр на борту КА Juno нацелен на то, чтобы определить распределение H_2O и NH_3 на глубину до отметки давления 100 бар.

Мощная буря на Сатурне в 2010 г. позволила выявить спектроскопические особенности, которые могли соответствовать смеси водяного льда, аммиачного льда и гидросульфида аммония (NH_4SH) [189], однако такая интерпретация наблюдательных данных зависит от предполагаемых оптических свойств частиц. Признаки газообразной воды наблюдались в верхней тропосфере в данных КА ISO (Infrared Space Observatory) на длине волны 5 мкм [190], но спектральное разрешение инструментов на борту КА Cassini недостаточно высоко для того, чтобы построить карту планеты, а наземные наблюдения сильно "загрязнены" водой в земной атмосфере. Учитывая трудность непосредственных измерений воды на Сатурне [191], концентрацию неустойчивых соединений (CO , PH_3 и т.д.), которые вступают в химические реакции с водой, можно использовать для косвенного определения концентрации воды [192]. Однако такой способ включает в себя множество неопределённостей.

Уран и Нептун выглядят не совсем гигантскими планетами при массах $14 M_{\oplus}$ и $17 M_{\oplus}$ и плотностях 1,2 и 1,7 г см^{-3} соответственно. Несмотря на то что Уран и Нептун кажутся довольно похожими, большая средняя плотность Нептуна по сравнению с таковой Урана указывает на несколько иной состав: либо на большее количество элементов тяжелее водорода и гелия, либо на большее отношение силикатной составляющей к ледяной. Измерения параметров гравитационного поля показывают профили распределения плотности, близкие к тем, которые должны иметь "льды" (т.е. смесь, первоначально состоявшая, например, из H_2O , CH_4 и NH_3 , но быстро превращающаяся в жидкость с усреднённым химическим составом внутри планеты), за исключением самых внешних слоёв, плотность которых близка к плотности водорода и гелия [193, 194]. Большинство моделей строения этих планет предполагают наличие трёх слоёв: центрального ядра (богатого магнием, силикатами и железом), слоя льда и водородно-гелиевой газовой оболочки (см., например, [195, 196]).

Согласно моделям [196] Уран содержит как минимум 1,8–2,2 земных массы водорода и гелия, а Нептун — 2,7–3,3 земных массы этих газов. Среднее соотношение между льдом и силикатами очень велико: 19–36 для

Урана и от 3,6 до 14 для Нептуна. Эти значения намного больше, чем отношение льда к силикатам для протосолнца, составляющее 2–3. Здесь под "льдом" подразумеваются все элементы, конденсирующиеся при низких температурах, а "силикатами" считаются все оставшиеся более тугоплавкие элементы. Тот факт, что одна из планет могла набрать гораздо меньше силикатов, чем льдов, является загадочным и необъяснимым с точки зрения современных моделей образования планет. Вероятно, это означает, что неверно предположение о том, что льды расположены в оболочке вокруг ядра, а силикаты и железо находятся в ядре.

На самом деле, по-видимому, все рассматриваемые выше модели Урана и Нептуна неадекватны из-за предположения об адиабатическом ходе температуры на границах сред с различными составами. Показано, что высокая распространённость метана препятствует конвекции в области образования облачности (давление от 1 до 2 бар) и приводит к суперадиабатическому градиенту температуры, который наблюдался по данным КА Voyager [197]. Если концентрация воды более чем в десять раз превышает солнечную, то может возникнуть аналогичный, но количественно более сильный эффект, характеризующийся наличием глубокой зоны радиационного переноса энергии с большим повышением температуры при увеличении глубины [198]. Ещё более глубокая диффузионная конвекция должна происходить в областях с изменениями состава вещества, что также приводит к суперадиабатическому градиенту температуры (см., например, [199]). Так же как и в случае Юпитера и Сатурна (см. [200]), это приведёт к более высоким температурам во внутренних частях планеты и различным ограничениям на их химический состав. В этом случае количество каменистого материала, необходимого для соответствия средней плотности гравитационным моментам инерции, несомненно, будет возрастать, что, возможно, позволит решить проблему соотношения льда и каменистого материала.

Несмотря на то что Уран и Нептун называют ледяными гигантами, вода на этих планетах ещё более недоступна непосредственным наблюдениям, чем на Юпитере и Сатурне, — облака жидкой воды и ледяных кристаллов формируются при давлении несколько сотен бар и пока они не обнаружены. Косвенные оценки, основанные на концентрации CO [201–203], позволяют предположить, что отношение O/H для ледяных гигантов может достигать нескольких сотен. Микроволновые наблюдения Урана позволили предположить существование глубокого поглощающего слоя, который может быть связанным с водяными облаками [204, 205], тогда как анализ микроволновых данных наблюдений Нептуна [206] позволил только зарегистрировать наличие воды. Метод измерения концентрации воды по микроволновым спектрам имеет ограниченную чувствительность к воде в глубоких слоях, однако оценка её концентрации должна быть основной задачей любой будущей миссии к ледяным гигантам.

Можно резюмировать, что в верхних облаках газовых и ледяных планет-гигантов доминируют аммиак и метан, тогда как водяные облака глубоко скрыты от дистанционного зондирования. Это представляет собой серьёзную проблему для оценки химического состава этих миров, так как ни орбитальные зонды, ни дистанционное зондирование с Земли не проникли в хорошо

перемешанные глубокие слои этих планет. Сравнение среднего элементного состава и изотопных отношений четырёх планет-гигантов полезно с точки зрения выяснения распределения летучих веществ в протопланетном диске ранней Солнечной системы, из которого шло формирование планет. Объёмное распределение содержания кислорода имеет решающее значение ввиду его важности для образования водяного льда при рождении protoplanет во внешней Солнечной системе. Микроволновая спектроскопия в сочетании с отбором и анализом образцов на месте могут дать некоторую надежду на получение новых данных о четырёх планетах-гигантах.

Гипотезы образования многочисленных спутников планет-гигантов выглядят сейчас примерно следующим образом. Накопление материала в протопланетном облаке на орбите Юпитера в итоге привело к образованию планеты-гиганта и его внутренних лун, подобно тому как формировались само Солнце и планеты. Высокая температура аккреционного диска в области образующегося Юпитера могла препятствовать конденсации летучих веществ на расстояниях орбит внутренних спутников. Следовательно, Ганимед и Каллисто, самые удалённые из восьми внутренних лун, могут быть значительно богаче водой и другими летучими соединениями, чем более близкие к планете луны.

Многочисленные малые внешние луны с их сильно вытянутыми орбитами со значительными наклонениями к эклиптике имеют другое происхождение. Они, скорее всего, являются захваченными объектами. Но место их зарождения остаётся до конца не ясным. Зародыши этих лун, возможно, сначала образовались во внешней части туманности Юпитера, затем были выброшены из системы планеты-гиганта, а потом снова захвачены ею на другие орбиты. Возможно, они образовывались независимо в протопланетном диске солнечной туманности, а затем были захвачены Юпитером. В любом случае процесс захвата, по-видимому, привёл к разрушению исходных тел и образованию тех обломков, которые наблюдаются сегодня как внешние луны. Продолжающиеся исследования этих объектов и их возможных родственников среди троянских астероидов могут пролить свет на их происхождение.

Распределение водяного льда на поверхности ледяных лун планет-гигантов было картографировано с использованием комбинации спектральных особенностей в инфракрасном спектре (длины волн 1,65; 1,5 мкм; 2,0 и 3,1 мкм (см., например, [207])).

На основе данных, полученных на борту Galileo инфракрасным спектрометром NIMS (Near Infrared Mapping Spectrometer), работающим в диапазоне длин волн 0,7–5,2 мкм [208], обнаружено, что ледяные луны Юпитера в основном содержат, за некоторыми исключениями, кристаллический лёд. На Каллисто спектры NIMS показали, что лёд присутствует в кристаллической форме везде, где его достаточно для регистрации. На Ганимеде частицы льда достигают холодных полярных областей вдоль линий магнитного поля Ганимеда, образуя тонкий слой инея. Граница раздела между открытыми и замкнутыми силовыми линиями поля отчётливо видна в цветных снимках поверхности [209]. На Европе холодные температуры и высокие дозы радиации способствуют образованию аморфного льда [210].

Мультиспектральные данные, полученные спектрометром VIMS на борту орбитального КА Cassini, охва-

тывающие спектральный диапазон 0,35–5,1 мкм [211], позволили провести тщательный сравнительный анализ ледяных спутников Сатурна. Показано, что на их поверхностях в основном доминирует кристаллический водяной лёд [212].

Характер и распределение льдов летучих веществ и их связь с водяным льдом являются решающими факторами для выяснения происхождения и эволюции поверхностей ледяных спутников, поскольку поверхностный материал может являться связующим звеном с внутренней частью лун, и накладывают ограничения на окружающую среду, в которой эти небесные тела были сформированы и существуют в настоящее время.

8. Заключение

В качестве кратких выводов отметим некоторые глобальные проблемы, связанные с происхождением и распространением воды в Солнечной системе, которые надо решить в обозримом будущем.

Необходимо расширять список объектов Солнечной системы (лунные полюсы, астероиды, малые планеты, ядра комет и т.д.), для которых можно измерить изотопное отношение D/H. Необходимо также совершенствовать наши знания о процессах, которые могут влиять на величину отношения D/H. Это один из важных индикаторов, характеризующий распространение воды различного типа внутри Солнечной системы. Так как дистанционные методы не всегда эффективны, наиболее интересными, хотя и наиболее ресурсоёмкими, представляются космические миссии, которые смогут доставить на Землю образцы материалов с различных объектов Солнечной системы. Часть таких миссий уже находится на стадии реализации.

Проблема происхождения земной гидросферы до сих пор остаётся нерешённой. Формировалась ли земная гидросфера вместе с самой планетой начиная с ранних стадий эволюции, или вода была принесена астероидами и кометами значительно позднее? Если каждый из источников внес свой вклад, то какой процесс доминировал и какой воды в земных океанах и недрах больше: солнечной или принесённой на Землю из дальних областей Солнечной системы?

Если существенную роль в процессе образования земных океанов играла вода, абсорбированная непосредственно из протопланетного облака, то можно ли рассуждать об общих закономерностях эволюции различных планетных систем и предполагать, что океаны, подобные земным, могли сформироваться и на экзопланетах?

Какое количество летучих веществ попало на Луну? Современные модели образования Луны в результате гигантского столкновения и последние экспериментальные данные показывают, что лунные недра не такие "сухие", как считалось ранее.

В полярных областях Луны находятся большие залижи реликтового водяного льда, исследуя которые, можно получить новую информацию об эволюции системы Земля – Луна и в итоге о самой Солнечной системе. Пока происхождение водяного льда и его распределение по поверхности Луны остаются не до конца изученными и объясняемыми. Внесли ли основной вклад кометы и астероиды, или лёд образовался в результате воздействия солнечного ветра, или это вода из недр Луны? Для ответа на эти вопросы необходимо осуществить лунные

посадочные полярные миссии, оснащённые глубинными грунтозаборными устройствами и приборами, позволяющими анализировать химический и изотопный состав образцов грунта. В идеале наиболее интересную часть собранных образцов грунта необходимо доставить в земные лаборатории для детального анализа.

Луна и Меркурий имеют схожие условия для формирования и сохранения залежей водяного льда в полярных областях. Почему тогда так сильно различается наблюдаемая картина, в рамках которой лунные вечно затенённые кратеры не являются по определению местами наибольшего скопления водяного льда? Какие условия отличали Луну от Меркурия в ходе её эволюции?

Как происходила эволюция Венеры и каким образом Венера потеряла всю свою воду?

Последние экспериментальные данные показывают, что Марс утратил более 90 % атмосферы и превратился в сухую и холодную пустыню. Что инициировало этот катастрофический процесс и куда делась вода — улетучилась в космос вместе с атмосферой или ушла в глубь планеты?

Утверждение о том, что на ранних стадиях эволюции Марс являлся тёплым и влажным, оспаривается современной наукой. Этот спор длится уже несколько десятилетий. Возможно, атмосфера Марса никогда не была достаточной плотной и не имела необходимого количества парниковых газов для того, чтобы обеспечить среднегодовую температуру, превышающую точку замерзания воды. В этом случае потепление и присутствие жидкой воды на поверхности носили лишь кратковременный и эпизодический характер. Выбрать одну из этих альтернатив помогут дальнейшие исследования подповерхностных осадочных пород в различных областях планеты.

Уже на ранних этапах эволюции Солнечной системы за снежной линией сложились благоприятные условия для конденсации водяных паров из протопланетного облака на поверхность формирующихся небесных тел. Наиболее интересными объектами исследования представляются луны Юпитера и Сатурна, на которых сформировались океаны, по размеру сопоставимые с земными. Каковы их химический, минеральный состав и биохимия? Являются ли они колыбелями жизни? На эти вопросы, возможно, помогут ответить будущие миссии к спутнику Юпитера Европе.

Для количественного рассуждения о воде, содержащейся в планетах-гигантах, сейчас не хватает наблюдательных данных. Необходимо провести непосредственные измерения концентрации воды или кислорода в глубине атмосфер Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

Список литературы

- Tielens A G G M *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005)
- Cleeves L I et al. *Science* **345** 1590 (2014)
- Greenberg R *Europa: The Ocean Moon: Search for an Alien Biosphere* (Berlin: Springer, 2005)
- Iess L et al. *Science* **344** 78 (2014)
- McCord T B, Sotin C J. *Geophys. Res.* **110** E05009 (2005)
- Martin R G, Livio M *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **425** L6 (2012)
- Montmerle T et al. *Earth Moon Planets* **98** 39 (2006)
- Canup R M, Asphaug E *Nature* **412** 708 (2001)
- Drake M, Campins Y "Origin of water on the terrestrial planets", in *Asteroid, Comets, Meteors. Proc. of the 229th Symp. of the Intern. Astronomical Union, Rio de Janeiro, Brasil, August 7–12, 2005* (IAU Symp. and Colloquium Proc. Series, Vol. 229, Eds D Lazzaro, S F Mello, J A Fernández) (Cambridge: Cambridge Univ. Pres, 2006)
- Morbidelli A et al. *Meteorit. Planet. Sci.* **35** 1309 (2000)
- Stimpfl M et al. *Meteorit. Planet. Sci.* **39** A99 (2004)
- Marty B *Earth Planet. Sci. Lett.* **313–314** 56 (2012)
- Tikoo S M, Elkins-Tanton L T *Phil. Trans. R. Soc. A* **375** 20150394 (2017)
- Wood J A, in *Chondrites and the Protoplanetary Disk. Proc. of a Workshop, 8–11 November 2004, Hawaii* (ASP Conf. Series, Vol. 341, Eds A N Krot, E R D Scott, B Reipurth) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2005) p. 953
- Raymond S N et al. *Icarus* **183** 265 (2006)
- Hevey P J, Sanders I S *Meteorit. Planet. Sci.* **41** 95 (2006)
- Reese C C, Solomatov V S *Icarus* **184** 102 (2006)
- Tonks W B, Melosh H J *J. Geophys. Res. Planets* **98** 5319 (1993)
- Solomatov V *Treatise Geophys.* **9** 91 (2007)
- Elkins-Tanton L T *Earth Planet. Sci. Lett.* **271** 181 (2008)
- Elkins-Tanton L T *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **40** 113 (2012)
- Wilde S A et al. *Nature* **409** 175 (2001)
- Mojzsis S J, Harrison T M, Pidgeon R T *Nature* **409** 178 (2001)
- Claeys P, Morbidelli A, in *Encyclopedia of Astrobiology* (Eds M Gargaud et al.) 2011 ed. (Berlin: Springer, 2011) p. 909
- Eberhardt P et al. *Astron. Astrophys.* **302** 301 (1995)
- Altweig K et al. *Science* **347** 1261952 (2015)
- Ксанфомалити Л В УФН **187** 311 (2017); Ksanfomality L V *Phys. Usp.* **60** 290 (2017)
- Alexander C M O'D et al. *Science* **337** 721 (2012)
- Wiechert U et al. *Science* **294** 345 (2001)
- Franchi I A et al. *Meteorit. Planet. Sci.* **34** 657 (1999)
- Touboul M et al. *Nature* **450** 1206 (2007)
- Pahlevan K, Stevenson D J *Earth Planet. Sci. Lett.* **262** 438 (2007)
- Fegley B (Jr.), Swindle T D, in *Resources of Near-earth Space* (Eds J S Lewis, M S Matthews, M L Guerrieri) (Tucson: Univ. of Ariz. Press, 1993) p. 367
- Haskin L A, Warren P H, in *Lunar Sourcebook: a User's Guide to the Moon* (Eds G Heiken, D Vaniman, B M French) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991) p. 357
- Saal A E et al. *Nature* **454** 192 (2008)
- Needham D H, Kring D A, in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas* (LPI Contribution No. 1964) (2017) p. 1192
- Watson K, Murray B, Brown H J. *Geophys. Res.* **66** 1598 (1961)
- Arnold J R J. *Geophys. Res. Solid Earth* **84** 5659 (1979)
- Watson K, Murray B, Brown H J. *Geophys. Res.* **66** 3033 (1961)
- Lanzerotti L J, Brown W L, Johnson R E J. *Geophys. Res. Solid Earth* **86** 3949 (1981)
- Butler B J. *Geophys. Res. Planets* **102** 19283 (1997)
- Vasavada A R, Paige D A, Wood S E *Icarus* **141** 179 (1999)
- Nozette S et al. *Science* **274** 1495 (1996)
- Stacy N J S, Campbell D B, Ford P G *Science* **276** 1527 (1997)
- Simpson R A, Tyler G L J. *Geophys. Res. Planets* **104** 3845 (1999)
- Feldman W C et al. *Science* **281** 1496 (1998)
- Feldman W C et al. *J. Geophys. Res. Planets* **105** 4175 (2000)
- Feldman W C et al. *J. Geophys. Res. Planets* **106** 23231 (2001)
- Бережной А А, Клумов Б А *Письма в ЖЭТФ* **68** 150 (1998); Berezhnoi A A, Klumov B A *JETP Lett.* **68** 163 (1998)
- Шевченко В В *Астрон. вестн.* **32** 310 (1998); Shevchenko V V *Solar Syst. Res.* **32** 272 (1998)
- Шевченко В В *Астрон. вестн.* **33** 456 (1999); Shevchenko V V *Solar Syst. Res.* **33** 400 (1999)
- Klumov B A, Berezhnoi A A *Adv. Space Res.* **30** 1875 (2002)
- Crider D H, Vondrak R R J. *Geophys. Res. Planets* **105** 26773 (2000)
- Starukhina L V, Shkuratov Yu G *Icarus* **147** 585 (2000)
- Mitrofanov I G et al. *Space Sci. Rev.* **150** 183 (2010)
- Mitrofanov I G et al. *Science* **330** 483 (2010)
- Mitrofanov I G et al. *J. Geophys. Res.* **117** E00H27 (2012)
- Sanin A B et al. *Icarus* **283** 20 (2016)
- Colaprete A et al. *Science* **330** 463 (2010)
- Hayne P O et al. *Icarus* **255** 58 (2015)
- Paige D A et al. *Science* **330** 479 (2010)
- Patterson G W et al. *Icarus* **283** 2 (2017)
- Milliken R E, Li S *Nature Geosci.* **10** 561 (2017)

64. Pieters C M et al. *Science* **326** 568 (2009)
65. Clark R N *Science* **326** 562 (2009)
66. Sunshine J M et al. *Science* **326** 565 (2009)
67. Siegler M A et al. *Nature* **531** 480 (2016)
68. Lawrence D J et al. *J. Geophys. Res.* **111** E08001 (2006)
69. Litvak M L et al. *J. Geophys. Res.* **117** E00H22 (2012)
70. Zuber M T et al. *Nature* **486** 378 (2012)
71. Butler B J, Muhleman D O, Slade M A *J. Geophys. Res.* **98** 15003 (1993)
72. Berezhnoi A A, Klumov B A *Icarus* **195** 511 (2008)
73. Harmon J K, Slade M A *Science* **258** 640 (1992)
74. Slade M A et al. *Science* **258** 635 (1992)
75. Solomon S C et al. *Science* **321** 59 (2008)
76. Harmon J K et al. *Icarus* **211** 37 (2011)
77. Chabot N L et al. *Geology* **42** 1051 (2014)
78. Paige D A et al. *Science* **339** 296 (2013)
79. Neumann G A et al. *Science* **339** 300 (2013)
80. Lawrence D J et al. *Science* **339** 292 (2013)
81. Chabot N L et al., in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas* (LPI Contribution, No. 1964) (2017) p. 1103
82. Deutsch A N et al., in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas* (LPI Contribution, No. 1964) (2017) p. 1634
83. Susorney H C M et al., in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas* (LPI Contribution, No. 1964) (2017) p. 2059
84. Benkhoff J et al. *Planet. Space Sci.* **58** 2 (2010)
85. Mitrofanov I G et al. *Planet. Space Sci.* **58** 116 (2010)
86. Rasool S I, de Bergh C *Nature* **226** 1037 (1970)
87. Kasting J F *Icarus* **74** 472 (1988)
88. Delva M et al. *Geophys. Res. Lett.* **36** L01203 (2009)
89. Girardi L et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **141** 371 (2000)
90. Lean J L et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **29** 917 (1997)
91. Gough D O *Solar Phys.* **74** 21 (1981)
92. Kulikov Yu N et al. *Planet. Space Sci.* **54** 1425 (2006)
93. Donahue T M et al. *Science* **216** 630 (1982)
94. De Bergh B et al. *Science* **251** 547 (1991)
95. Krasnopolsky V A et al. *Icarus* **224** 57 (2013)
96. Hashimoto G L et al. *J. Geophys. Res.* **113** E00B24 (2008)
97. Boynton W V et al. *Science* **297** 81 (2002)
98. Feldman W C et al. *Science* **297** 75 (2002)
99. Mitrofanov I G et al. *Science* **297** 78 (2002)
100. Mitrofanov I G, in *Water on Mars and Life* (Ed. T Tokano) (Berlin: Springer-Verlag, 2005) p. 99
101. Litvak M L et al. *Icarus* **180** 23 (2006)
102. Кузьмин Р О *Криолитосфера Марса* (M.: Hayka, 1983)
103. Plaut J J et al. *Science* **316** 92 (2007)
104. Laskar J et al. *Icarus* **170** 343 (2004)
105. Head J W et al. *Nature* **434** 346 (2005)
106. Mellon M T, Jakosky B M *J. Geophys. Res. Planets* **98** 3345 (1993)
107. Mellon M T et al. *J. Geophys. Res. Planets* **102** 19357 (1997)
108. Smith P H et al. *J. Geophys. Res.* **113** E00A18 (2008)
109. Arvidson R E et al. *J. Geophys. Res.* **114** E00E02 (2009)
110. Mellon M T et al. *J. Geophys. Res.* **114** E00E06 (2009)
111. Mellon M T et al. *J. Geophys. Res.* **114** E00E07 (2009)
112. Maurice S et al. *J. Geophys. Res.* **116** E11008 (2011)
113. Feldman W C et al. *J. Geophys. Res.* **116** E11009 (2011)
114. Bibring J P et al. *Science* **312** 400 (2006)
115. Squyres S W et al. *Science* **306** 1709 (2004)
116. Grotzinger J *Nature Geosci.* **2** 231 (2009)
117. Squyres S W et al. *Science* **336** 570 (2012)
118. Arvidson R E et al. *Science* **343** 1248097 (2014)
119. Malin M C, Edgett K S *Science* **288** 2330 (2000)
120. Ojha L et al. *Nature Geosci.* **8** 829 (2015)
121. Grotzinger J P et al. *Space Sci. Rev.* **170** 5 (2012)
122. Grotzinger J P et al. *Science* **343** 1242777 (2014)
123. Grotzinger J P et al. *Science* **350** aac7575 (2015)
124. Vasavada A R et al. *J. Geophys. Res. Planets* **119** 1134 (2014)
125. Litvak M L et al. *Astrobiology* **8** 605 (2008)
126. Litvak M L et al. *J. Geophys. Res. Planets* **119** 1259 (2014)
127. Mitrofanov I G et al. *Space Sci. Rev.* **170** 559 (2012)
128. Mitrofanov I G et al. *J. Geophys. Res. Planets* **119** 1579 (2014)
129. Litvak M L et al. *J. Geophys. Res. Planets* **121** 836 (2016)
130. Stack K M et al. *Icarus* **280** 3 (2016)
131. Buz J et al. *J. Geophys. Res. Planets* **122** 1090 (2017)
132. Yen A S et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **471** 186 (2017)
133. Craddock R A, Howard A D *J. Geophys. Res. Planets* **107** 5111 (2002)
134. Fassett C I, Head J W *Icarus* **198** 37 (2008)
135. Clifford S M, Parker T J *Icarus* **154** 40 (2001)
136. Di Achille G, Hynek B M *Nature Geosci.* **3** 459 (2010)
137. Jakosky B M et al. *Space Sci. Rev.* **195** 3 (2015)
138. Jakosky B M et al. *Science* **355** 1408 (2017)
139. Wordsworth R, Pierrehumbert R *Science* **339** 64 (2013)
140. Wordsworth R et al. *Icarus* **222** 1 (2013)
141. Wordsworth R D *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **44** 381 (2016)
142. Wordsworth R et al. *Geophys. Res. Lett.* **44** 665 (2017)
143. Forget F et al. *Icarus* **222** 81 (2013)
144. Rosenberg E, Head J W *Planet. Space Sci.* **117** 429 (2015)
145. Hoke M R T et al. *Planet. Sci. Lett.* **312** 1 (2011)
146. Head J W, Marchant D R *Antarctic Sci.* **26** 774 (2014)
147. Palumbo A M, Head J W, Wordsworth R D *Icarus* **300** 261 (2018)
148. Bishop J L et al., in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas* (LPI Contribution, No. 1964) (2017) p. 1804
149. Vago J L et al. *Astrobiology* **17** 471 (2017)
150. McCord T B, Sotin C J. *Geophys. Res.* **110** E05009 (2005)
151. Combe J P et al. *Science* **353** aaf3010 (2016)
152. Platz T et al. *Nature Astron.* **1** 0007 (2016)
153. King T V V et al. *Science* **255** 1551 (1992)
154. Rivkin A S et al. *Icarus* **185** 563 (2006)
155. De Sanctis M C et al. *Nature* **528** 241 (2015)
156. Takir D, Emery J P, McSween H Y (Jr.) *Icarus* **257** 185 (2015)
157. Walsh K J et al. *Nature* **475** 206 (2011)
158. Mousis O et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **383** 1269 (2008)
159. Grazier K R, Castillo-Rogez J C, Sharp P W *Icarus* **232** 13 (2014)
160. Turner N J et al. *Astrophys. J.* **748** 92 (2012)
161. Guillot T *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **33** 493 (2005)
162. Nettelmann N et al. *Astrophys. J.* **750** 52 (2012)
163. Helled R, Guillot T *Astrophys. J.* **767** 113 (2013)
164. Hubbard W B, Militzer B *Astrophys. J.* **820** 80 (2016)
165. Miguel Y, Guillot T, Fayon L *Astron. Astrophys.* **596** A114 (2016)
166. Leconte J, Chabrier G *Astron. Astrophys. Rev.* **540** A20 (2012)
167. Militzer B, Hubbard W B *Astrophys. J.* **774** 148 (2013)
168. D'Angelo G et al., in *Exoplanets* (Ed. S Seager) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 2010) p. 319
169. Mizuno H *Prog. Theor. Phys.* **64** 544 (1980)
170. Pollack J B et al. *Icarus* **124** 62 (1996)
171. Wuchterl G, Guillot T, Lissauer J J, in *Protostars and Planets IV* (Eds V Mannings, A P Boss, S S Russell) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 2000) p. 1081
172. Alibert Y et al. *Astron. Astrophys.* **434** 343 (2005)
173. Boley A C et al. *Icarus* **207** 509 (2010)
174. Nayakshin S, Helled R, Boley A C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440** 3797 (2014)
175. Lambrechts M, Johansen A *Astron. Astrophys.* **544** A32 (2012)
176. Guillot T, Gautier D, in *Treatise on Geophysics* Vol. 10 (Ed.-in-Chief G Schubert) 2nd ed. (Amsterdam: Elsevier, 2015) p. 529
177. Levison H F, Kretke K A, Duncan M J *Nature* **524** 322 (2015)
178. Nixon C A et al. *Icarus* **150** 48 (2001)
179. Banfield D et al. *Icarus* **135** 230 (1998)
180. Bjoraker G L et al. *Astrophys. J.* **810** 122 (2015)
181. Little B et al. *Icarus* **142** 306 (1999)
182. Giersch P J et al. *Nature* **403** 628 (2000)
183. Simon-Miller A A et al. *Icarus* **145** 454 (2000)
184. Roos-Serote M et al. *Nature* **405** 158 (2000)
185. Giles R S, Fletcher L N, Irwin P G J *Icarus* **257** 457 (2015)
186. Niemann H B et al. *J. Geophys. Res. Planets* **103** 22831 (1998)
187. Wong M H et al. *Planet. Space Sci.* **52** 385 (2004)
188. Wong M H et al. *Icarus* **171** 153 (2004)
189. Sromovsky L A, Baines K H, Fry P M *Icarus* **226** 402 (2013)
190. de Graauw T et al. *Astron. Astrophys.* **321** L13 (1997)
191. Mousis O et al. *Planet. Space Sci.* **104** 29 (2014)
192. Visscher C, Moses J I, Saslow S A *Icarus* **209** 602 (2010)

193. Marley M S, Gómez P, Podolak M *J. Geophys. Res. Planets* **100** 23349 (1995)
194. Podolak M, Podolak J I, Marley M S *Planet. Space Sci.* **48** 143 (2000)
195. Helled R et al. *Astrophys. J.* **726** 15 (2011)
196. Nettelmann N et al. *Planet. Space Sci.* **77** 143 (2013)
197. Guillot T *Science* **269** 1697 (1995)
198. Leconte J et al. *Astron. Astrophys.* **598** A98 (2017)
199. Rosenblum E et al. *Astrophys. J.* **731** 66 (2011)
200. Leconte J, Chabrier G *Astron. Astrophys.* **540** A20 (2012)
201. Lodders K, Fegley B (Jr.) *Icarus* **112** 368 (1994)
202. Marten A et al. *Astrophys. J.* **406** 285 (1993)
203. Cavalié T et al. *Astron. Astrophys.* **562** A33 (2014)
204. Hofstadter M D, Muhleman D O *Icarus* **81** 396 (1989)
205. Hofstadter M D, Butler B J *Icarus* **165** 168 (2003)
206. de Pater I, Romani P N, Atreya S K *Icarus* **91** 220 (1991)
207. Mastrapa R M et al. *Astrophys. J.* **701** 1347 (2009)
208. Carlson R W et al. *Space Sci. Rev.* **60** 457 (1992)
209. Khurana K K et al. *Icarus* **191** 193 (2007)
210. Hansen G B, McCord T B *J. Geophys. Res.* **109** E01012 (2004)
211. Brown R H et al. *Space Sci. Rev.* **115** 111 (2004)
212. Filacchione G et al. *Icarus* **206** 507 (2010)

Water in the Solar system

M.L. Litvak, A.B. Sanin

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
E-mail: mlitvak@gmail.com, anton.sanin@gmail.com*

Over the past half century, numerous research space missions have been launched to explore various objects in the Solar system, primarily to find surface or subsurface water or water ice (in particular, to discover extraterrestrial oceans or their traces and to study their evolution in the light of Earth's hydropheric history). This paper briefly reviews the subject with an emphasis on the terrestrial planets to find out why it is that while liquid water oceans once formed and still exist on the Earth, the surfaces of other planets turned into arid deserts. Also reviewed are issues related to the origin and observation of water ice in the outer part of the Solar system. A list of important problems related to the origin and distribution of water in the Solar system is presented.

Keywords: water, water ice, oceans, Solar system, terrestrial planets, giant planets and their moons

PACS numbers: **96.12. – a, 96.20. – n, 96.30. – t**

Bibliography — 212 references

Received 11 January 2018

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (8) 865–880 (2018)

Physics – Uspekhi **61** (8) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038277>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038277>