

## ASTRONOMİYA

УДК 520.2

АЗАД МАМЕДЛИ

### О ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

*Работа посвящена одной из актуальных задач астрономии: исследованию основных характеристик планет земной группы. Определение химического состава, физических свойств этих планет играет ключевую роль для изучения проблемы об их происхождении. Для фундаментальных наук о Земле — геофизики, геологии, петрологии и геохимии, Луна представляет первостепенный интерес. Луна привлекает особое внимание с точки зрения возможности лучшего понимания геологической истории Земли. Ведь наиболее древние породы на Земле были разрушены появлением гидросферы, атмосферы, биосферы, в то время они сохранились только на поверхности Луны. Образно говоря, Луна — это окно в раннюю историю Земли. По этой причине в данной работе уделено особое внимание изучению проблемы происхождения Луны, ее физических свойств и геологических структур. Для решения таких задач, ключевую роль призваны сыграть космические аппараты нового поколения — луноходы и автоматические аппараты-роботы для забора и доставки на Землю лунного грунта.*

*Особого внимания заслуживают Венера и Марс, как две предельные модели Земли, при изучении ключевой проблемы ее происхождения и эволюции. Данные сравнительной планетологии этих планет, позволяет оценить перспективы возникновения неблагоприятные трендов в дальнейшей эволюции. В этом состоит прикладное значение планетных исследований, которое позволяет осознать человечеством бережное отношение к окружающей среде и предотвращение развития опасных сценариев.*

*Основной целью настоящей работы является не только исследование проблем происхождения и эволюции планет земной группы, но и привлечение внимания к экологическим проблемам, осознанию человечеством необходимости беречь уникальную жизнь на Земле.*

**Ключевые слова:** планетная геология, основные характеристики планет земной группы, система Земля-Луна, эндогенные и экзогенные факторы, Солнечная система.

В отличие от газовых и ледяных планет-гигантов, сохранившихся, по существу, неизмененными по структуре и составу со временем рождения Солнечной системы ~ 4,57 млрд. лет назад, планеты земной группы (табл. 1) претерпели значительные изменения в ходе их последующей эволюции. В состав этих планет вошли в различных сочетаниях такие наиболее важные породообразующие элементы, рожденные в глубинах космоса, как магний, железо, кремний, алюминий, кальций. Эволюция, подтверждаемая особенностями внутреннего строения, геологии, морфологии поверхности, свойств атмосфер, контролировалась как эндогенными, так и экзогенными факторами, включая расстояние от Солнца, ударную бомбардировку, аккумулирование первичных радионуклидов. Структура недр включает ядро, мантию, кору. Вблизи поверхности выделяют твердую оболочку – литосферу и частично расплавленную астеносферу, переходящую в жидкую верхнюю мантию, в то время как нижняя мантия граничит с горячим ядром.

С энергетической точки зрения основную роль в формировании планет земной группы играли эндогенные процессы – генерация внутреннего тепла вследствие распада долгоживущих радиоактивных изотопов (уран, торий, калий), накопление которых сильно зависит от размера планеты. Экзогенные факторы, оставившие на поверхности

многочисленные кратеры от соударений с телами различных размеров, в том числе с крупными астероидами, также внесли существенный вклад в процессы тепловой эволюции, особенно в формирование поверхностных структур. Пик интенсивности, обусловленный выпадением остатков тел, формировавших планеты (планетезималей) с участием миграционных процессов, пришелся на эпоху поздней тяжелой бомбардировки,  $\sim 4,0$  млрд. лет назад. В совокупности внутреннее тепловыделение предопределило характер тектонических процессов и широко распространенного раннего вулканизма. В свою очередь, расстояние планеты от Солнца, от которого зависит приток падающего на нее излучения (инсоляции), определяет тепловой баланс и климатические свойства. Для планет земной группы вклад в тепловой баланс внутреннего тепла из недр вследствие продолжающегося распада радионуклидов незначителен, в отличие от планет-гигантов, у которых этот источник в 2-3 раза превышает приток тепла от Солнца.

**Таблица 1**  
**Основные характеристики планет**

Планета	Радиус, км	Масса, $10^{24}$ кг	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Геометрическое альбедо	Большая полуось орбиты, а.е.	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к эклиптике, градусы
Меркурий	2440	0,329	5,427	0,138	0,3871	0,206	7,005
Венера	6051,8	4,868	5,204	0,84	0,7233	0,007	3,394
Земля	6378 $\times$ 6357	5,9736	5,515	0,367	1,0000	0,017	0,0
Марс	3396 $\times$ 3376	0,639	3,933	0,150	1,5237	0,093	1,850

Система Земля-Луна – уникальное образование в Солнечной системе с самым большим соотношением масс спутник/планета, составляющим 1/81, хотя по размерам Луна только в 3,7 раза меньше Земли. Луна – первое и пока единственное небесное тело, на котором побывали люди. Как ближайшее к Земле небесное тело и уникальный представитель ранней истории Земли и других планет земной группы, Луна представляет первостепенный интерес для фундаментальных наук о Земле – геофизики, геологии, петрологии (изучении горных пород), геохимии. Конечно, Луна привлекает особое внимание с точки зрения возможности лучшего понимания геологической истории Земли, потому что наиболее древние породы сохранились только на поверхности Луны, в то время как на Земле они были разрушены появлением гидросферы, атмосферы, биосфера. Вот почему, образно говоря, Луна – это окно в раннюю историю Земли.

Луну естественно рассматривать в качестве форпоста на пути освоения человечеством космического пространства. Освоение Луны как стратегического плацдарма, создание элементов ее будущей инфраструктуры и начало использования местных ресурсов находится сегодня в повестке дня ведущих космических держав. Луна открывает и новые научные перспективы. Наряду с уникальными геологическими и геохимическими исследованиями, она представляет удобный плацдарм для астрономических наблюдений, в первую очередь, для радиоастрономии, поскольку развертывание антенн на обратной стороне полностью экранирует их от земных радиошумов.

Как практически лишенное атмосферы тело, Луна наиболее четко сохранила на поверхности многочисленные кратеры (импактные структуры) разных размеров. Она испытала, в частности, соударения с очень крупными телами, оставившими на ее по-

верхности огромные котловины (исторически названные «морями»), соседствующие с крупными возвышенностями. По степени кратерирования поверхности с Луной сопоставим Меркурий – ближайшая к Солнцу (0,4 а. е.) и самая маленькая планета в Солнечной системе, интерес к которой значительно возрос после открытия экзопланет на орбитах, близких к родительской звезде. У Меркурия уникальная структура недр, основную часть занимает массивное ядро, содержащее до 83% железа, и, возможно, частично расплавленное, о чем свидетельствует наличие у планеты дипольного магнитного поля напряженностью 350 нанотесла. Оно в сотни раз слабее земного, тем не менее, создается магнитосфера, по конфигурации аналогичная земной, что определяет характер обтекания Меркурия солнечным ветром. Это сильно отличает Меркурий от Венеры и Марса, лишенных магнитного поля, хотя у Марса оно было на ранней стадии эволюции, оставив в поверхностных породах следы палеомагнетизма. У Меркурия практически нет атмосферы – давление у поверхности в пятьсот миллиардов раз меньше, чем у поверхности Земли, суточные перепады температуры достигают 500 К.

Для геологии Венеры и Марса наиболее характерны процессы вулканизма, что сильно отличает их от геологии Земли, для которой основным механизмом является глобальная тектоника плит. На Венере в ее раннюю геологическую эпоху, по-видимому, происходили локальные тектонические процессы, с которыми можно связать некоторые геологические структуры на ее поверхности, представленные обширными равнинами, долинами, горными хребтами сжатия и бороздами простирания (тессерами). Эти структуры были выявлены посредством радиолокационной съемки, поскольку при наблюдениях в оптическом диапазоне поверхность Венеры полностью закрывают ее плотная атмосфера и облака и лишь в УФ диапазоне на верхней границе облаков различимы отдельные детали. На планете обнаружены следы многочисленных вулканов, с которыми, главным образом, связана тепловая эволюция планеты.

Сильно кратерированные ландшафты также сохранились на поверхности Марса, хотя из-за наличия даже не очень плотной атмосферы древние кратеры были частично разрушены процессами выветривания. Такие ландшафты характерны для южного, более древнего, полушария, в то время как морфология северного полушария представлена более поздними геологическими процессами и значительно меньшим числом кратеров. В северном полушарии Марса выделяются громадные щитовые вулканы на плоскогорье Фарсида, возвышающиеся на 23-26 км относительно среднего уровня поверхности, несмотря на небольшой размер самой планеты, затмевая Эверест на Земле. Гора Олимп высотой 26 км и размером основания 600 км с кратером (кальдерой) на вершине почти 70 км уступает лишь пику Рейясильвия на астероиде Веста. Вдоль экватора на расстояние свыше 4500 км простирается Долина Маринера – гигантский каньон шириной до 600 км и глубиной 7-10 км, вероятно, тектонического происхождения. Замечательными геологическими особенностями Марса являются котловины Эллада и Аргир попечником, соответственно, около 2000 км и 900 км и Великая северная равнина – гигантская пустыня протяженностью в несколько тысяч километров, которая могла быть дном древнего океана с мощным накоплением осадков, а возможно, и грязевых отложений.

С тепловой эволюцией планеты во многом связано формирование ее атмосферы. Современные газовые оболочки планет земной группы рассматриваются как атмосферы вторичного происхождения, поскольку первичная атмосфера, вероятно, образовавшаяся

в процессе аккумуляции планеты была потеряна, и современная атмосфера сформировалась в ходе дальнейшей эволюции. Атмосферами обладают все планеты земной группы, за исключением Меркурия, у которого чрезвычайно разреженная газовая оболочка, по плотности сопоставимая с экзосферой Земли. Основные свойства атмосфер планет земной группы суммированы в таблице 2.

Как видим, атмосферы Венеры и Марса значительно отличаются от земной: давление на поверхности Венеры достигает 92 атм., а температура составляет 735 К, в то время как на поверхности Марса среднее давление не превышает 0,006 атм., а средняя температура приблизительно 220 К. В отличие от азотнокислородной и влажной атмосферы Земли, атмосферы соседних планет состоят, главным образом, из углекислого газа с примесью азота (а на Марсе также аргона) и крайне малым содержанием водяного пара. На Венере практически нет кислорода, в незначительных количествах (на уровне тысячных долей процента) содержатся окись углерода (CO), серосодержащие газы ( $\text{SO}_2$ , COS,  $\text{H}_2\text{S}$ ), хлористый и фтористый водород (HCl и HF), которые, тем не менее, играют важную роль в метеорологии Венеры, в первую очередь, образовании и свойствах ее облаков. На Венере нет сезонных колебаний температуры из-за небольшого наклона экватора к эклиптике, в то время как на Марсе, у которого наклон оси вращения к эклиптике почти такой же, как у Земли, сезонные вариации четко выражены, и температурные колебания между летним и зимним полушариями достигают 100 градусов.

**Таблица 2**  
**Основные параметры атмосфер планет земной группы**

Параметр	Меркурий	Венера	Земля	Марс
Температура на поверхности Т (К)	100–725	737	288	215
Равновесная температура Т (К)	434	232	255	210
Температура экзосферы Т (К)	600	27 – 320	800 – 1250	200 – 300
Среднее давление на поверхности, бар	$10^{-15}$	92	1,013	0,00636
Средняя плотность, на поверхности, г/см <sup>3</sup>	$10^{-17}$	$61 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Венера во многом уникальная планета с необычными природными условиями, хотя и очень похожая на Землю по размеру, массе и средней плотности. При высокой температуре и плотности атмосфера Венеры обладает облаками своеобразной структуры и состава, и специфической динамикой. Планетарная циркуляция на Венере, играющая важную роль в формировании ее теплового режима, характеризуется, помимо глобального переноса между экватором и полюсами, также механизмом суперротации, которую иногда называют карусельной циркуляцией. Она отчетливо наблюдается на высоте приблизительно 60 км, где находится верхний слой облаков, перемещающихся в направлении вращения планеты со скоростью почти 100 м/с, в то время как скорость ветра на поверхности не превышает 0,5-1 м/с. Облака Венеры состоят из капелек концентрированной (~ 80%) серной кислоты. Этот необычный состав дополняет картину экзотической и негостеприимной окружающей среды соседней планеты, которая по своим природным условиям еще до середины прошлого столетия считалась близнецом Земли.

Марс, который по размерам вдвое, а по массе на порядок меньше Земли, с точки зрения природной среды является антиподом Венеры. По своим климатическим условиям он гораздо более благоприятен для будущих пилотируемых полетов, а в далекой

перспективе – и возможного терраформирования и колонизации. Исторически эта планета рассматривалась как наиболее подходящий объект для существования даже высокоразвитой жизни вне Земли, а в настоящее время в полной мере сохраняет свою актуальность задача ее обнаружения на микробном уровне. Действительно, необходимая для жизни вода, вероятно, играла важную роль в истории Марса на рубеже Нойской и Гесперийской эры 3,8-3,6 млрд лет, до времени вероятно произошедшего на планете катастрофического изменения климата, причины которого до конца не ясны. К этой геологической эпохе относятся многочисленные примеры водной эрозии – устья высохших рек, следы потоков разрушительной силы на крутых склонах, подобные району Кандор в центральной части Долины Маринера. О появлении на поверхности воды в современную эпоху свидетельствуют следы ее просачивания снизу (*seepage*) и обнаружение со спутника «Марс-Экспресс» ледяного озера внутри одного из ударных кратеров, а совсем недавно – вероятного подледного озера в южном полушарии. Еще более широкомасштабные процессы таяния льдов связывают с вероятными изменениями климата на интервалах от сотен тысяч до миллионов лет, которые могли бы быть вызваны периодическими изменениями наклонения оси вращения Марса под влиянием гравитационного поля Юпитера.

Геологические структуры дают также основание считать, что на Марсе был древний океан, средняя глубина которого составляла ~ 0,3 км, что всего лишь на порядок меньше средней глубины Мирового океана Земли (2,8 км). Заметим, что нельзя исключить наличие древнего океана и на Венере, но в отличие от Марса он был потерян вследствие развития необратимого парникового эффекта. Вполне вероятно, что современный Марс, относимый к периоду Амазонийской эры от ~ 2,9 млрд лет назад, сохранил значительную часть водного резервуара в слое вечной мерзлоты в виде водных линз и прослоев. Их средняя толщина в современную эпоху оценивается величиной ~ 30 м. Существенная влажность поверхностного слоя (приблизительно до 1м) с максимумом в приполярных областях обнаружена с марсианской орбиты методом нейтронного мониторинга. Все это подкрепляет сценарий эволюции, согласно которому у древнего Марса был гораздо более мягкий климат, и существовала довольно плотная атмосфера, сменившаяся холодной пустыней, где водный лед оказался захороненным под толстым слоем пыле-песчаных отложений, а в разреженной атмосфере периодически возникают мощные пылевые бури.

У Марса есть два небольших спутника нерегулярной формы: Фобос (27×22×18 км) и Деймос (15×12×10 км). В переводе с древнегреческого – «Страх» и «Ужас», имена сыновей Ареса, сопровождавших отца в сражениях. Оба спутника, проблема происхождения которых остается до сих пор нерешенной, обращаются вокруг Марса синхронно с периодами их собственного вращения, вследствие чего они, подобно Луне, всегда обращены к Марсу одной и той же стороной. Их орбиты лежат вблизи плоскости марсианского экватора. Интересно, что период обращения Фобоса вокруг Марса почти в два раза короче, чем период вращения самого Марса вокруг своей оси, и поэтому, наблюдатель на поверхности Марса видел бы дважды в день восход и заход Фобоса, быстро пересекающего марсианский небосвод в течение ночи. Период обращения Деймоса гораздо длиннее, и оба спутника часто могут наблюдаваться одновременно.

К сожалению, пока мы не можем дать ответ на вопрос о жизни на Марсе. Экспе-

рименты, как ранее проведенные на «Викингах», так и значительно более поздние – на марсоходе «Кьюриосити», имели отрицательные результаты. Большой ажиотаж вызвали результаты изучения метеоритов класса SNC, происхождение которых связывают с Марсом, в которых, как сообщалось, были найдены следы бактериальных ископаемых. Однако последующие анализы опровергли эти выводы, связав найденные формы и их минеральный состав со структурами неорганического происхождения.

Естественно, что из всех планет земной группы для нас первостепенный интерес представляет собственная планета обитания Земля, образующая вместе с ее естественным спутником Луной систему Земля-Луна. Мы изучаем другие планеты, исходя, прежде всего, из стремления лучше понять особенности этой системы в Солнечной системе. Луна предоставляет уникальную возможность для понимания важных этапов ранней геологической истории Земли. Меркурий, Венера и Марс по космическим масштабам располагаются очень близко к Земле, но развивались совершенно иными путями. Особого внимания заслуживают Венера и Марс, как две предельные модели эволюции Земли с отличными от нее природными механизмами обратной связи. Другими словами, Земля воспринимается нами в контексте всего семейства планетных тел, которые в совокупности хранят неоценимые данные о генезисе Солнечной системы, и одновременно служат важной основой для понимания путей формирования природных условий на планетных телах. Это дает подход к решению ключевой проблемы происхождения и эволюции Земли, приведшей к созданию уникальных условий для зарождения и развития жизни, а, опираясь на данные сравнительной планетологии, позволяет оценить перспективы возникновения неблагоприятные трендов в дальнейшей эволюции. В этом состоит прикладное значение планетных исследований, которое сводится к необходимости осознания человечеством последствий неконтролируемого роста антропогенного влияния на окружающую среду и предотвращению развития опасных сценариев.

В заключение еще раз обратим внимание на важность ответа на вопрос, почему у ближайших соседей Земли Венеры и Марса эволюция пошла по другому пути. Необходимо, опираясь на сравнительный подход, установить, какие существуют пределы регулирования для механизмов обратной связи на Земле, чтобы предотвратить неблагоприятные тренды ее эволюции. С этим тесно связаны оценки допустимых пределов антропогенных воздействий на окружающую природную среду, как открытой нелинейной диссипативной системы, накопление изменений в которой может привести к потере устойчивости и резкой смене (бифуркации) состояния. Необходима интеграция наук о Земле и планетах, нацеленная на лучшее понимание настоящего, прошлого и будущего Земли и решения кардинальных проблем планетной космогонии – происхождения и эволюции Солнечной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. Фрязино: Век 2, 2015, 575 с.
2. Климишин И.А. Астрономия наших дней. Москва: Наука, 2001, 453 с.
3. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. Москва: УРСС, 2011, 544 с.
4. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. Москва: УРСС, 2002, 688 с.
5. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. Москва: Наука, 1986, 318 с.