

Лекция 3.

Показ слайдов.

Здесь масса планеты. Она идет в таком порядке: Луна, Меркурий, Марс, Венера, Земля... (заглушено помехой). Диаметры, те же самые цвета: красное – Марс, голубая Венера, черная Земля, Луна желтая. Вот как меняется плотность. Уже совершенно в другом порядке: Луна, Марс, Меркурий, Венера, Земля. Т.е. Марс с Меркурием поменялись местами, за счет того, что Меркурий находится ближе к Солнцу, он содержит больше железа, чем Марс. Посмотрите, как резко изменяется относительное содержание железа. На Луне практически ничтожное количество железа в ядре может быть. А на первое место вылезает Меркурий, где доходит процент железа в планете до 67% при том, что Земля и Венера практически одинаковы ... (помеха). Значит, порядок содержания тяжелых элементов, труднолетучих элементов резко различен, что нам подтверждает то, что планеты исходно имеют разный состав.

Следующий, пожалуйста.

Я вам говорил об асимметрии планет. Здесь хорошо видно, что асимметрия, скажем, Луны является не следствием неравномерности метеоритной бомбардировки, которая дает кратеры, а явилась результатом эндогенных процессов, в результате которых выплавление базальтовых морей произошло на одной стороне. Вот это – исходное распределение крупных ударных структур на видимой стороне Луны и на обратной стороне Луны. Вы видите, практически идет, в пределах статистической однородности, равномерное покрытие крупными кратерами. Излияние морей произошло позднее, так что заполнило только кратеры видимой стороны Луны.

Следующий, пожалуйста.

Вот асимметричность строения Марса здесь видна. У Марса не восточные и западные, как видимая и невидимая стороны Луны имеют асимметрию, а равнины занимают северное полушарие. Равнины, которые, вероятно, связаны тоже с базальтовыми излияниями, потому что вблизи этих равнин мощные вулканические системы ... (помеха). Тут тоже четко проявляется асимметрия. Но уже здесь не сняты структуры кратерные, которые могли быть ... (помеха).

Следующий, пожалуйста.

Здесь я вам хотел показать разницу между типичными ударными структурами по результатам и типичными излияниями. Вот это кратер Коперника с лучами, причем лучевая система здесь обрезана, она, на самом деле, идет на тысячи километров. Видите, какой мощный взрыв дал такой разброс вещества. Вулканические структуры на Луне имеют совершенно другой тип, это спокойные излияния.

Следующий, пожалуйста.

Вот это гавайская лава Мауна-Лоа. Здесь видны несколько участков. Вот эти вот участки, с такой запекшейся корочкой, они показывают, что очень жидкая лава, но все-таки на поверхности остывает, корочка ломается, в результате возникают всякого рода неровности. А вот здесь, вот этот участок ... (помеха) это более свежая лава, совершенно жидкая, ровный такой поток. Дунные излияния похожи на эту часть. Лунные лавы еще более жидкие, менее вязкие, чем лавы гавайского типа. Это для сравнения еще раз посмотрите лунную морскую поверхность. Она совершенно в другом масштабе дана, потому что поверхность Луны перекрыта чехлом реголита, и вблизи рельеф другой, я показывал вам по снимку лунохода. Вот, общий характер равнины вы здесь видите.

Вот это отдельные какие-то выжимки, может быть по трещинам, может быть это фронт потока, идущего сверху вниз, здесь. Ну, в общем, это совершенно спокойная равнина, кратеры на которой не связаны с вулканизмом, а имеют прямую связь с ударным процессом.

Спасибо. Вот это то, что мы не посмотрели в прошлый раз.

Геофизическое изучение Луны пока что не имеет однозначного истолкования. Хотя там действовал целый ряд станций, определены скорости волн. Но интерпретации несколько различные. Наиболее вероятная принята интерпретация такая, что сверху поверхность Луны покрыта реголитом – обломочной породой, очень интересной, примерно на 3-15 метров (в среднем около 5 метров принимается для поверхности Луны), на материках это доходит до 20-25 метров, на морях от 2 даже, ну, 3-15 принимают. Дальше от 3 до 5 км, местами до 15, очевидно, километров, идет трещиноватый базальт. Если не базальт, то, во всяком случае, очень сильно трещиноватая (или «сильно трещиноватая»?) система, которая в разных местах имеет разную мощность. И резкий **скачок** скорости волн с примерно с 250-300 м/с до 7 км/с наблюдается на 25 км. Это скачок, который отвечает с одной стороны окончанию трещиноватости, а с другой стороны, может быть, тем, что базальт начинает уже подстилаться под анортозитовым габбро системой материковых пород. Тут разные есть толкования. И следующий скачок наблюдается с 7 км/ч до 8 км/ч по скорости на 60-65 км. Это считается пределом мощности лунной коры, после чего идет уже мантия. Существуют другие трактовки.

Сложность заключается в том, что лунная кора **очень** неоднородна. И первые интерпретации, которые исходили и из геохимической однородности, и из физической однородности, они все время сейчас пересматриваются.

Тепловой поток на Луне примерно равен половине земного. Это соответствует около $3 \cdot 10^6$ Ватт/см² в год. Хондритовая модель не обеспечивает по содержанию калия, урана и тория такого теплового потока. Значит, либо тут имеется какое-то ошибочное определение, хотя оно проверялось несколько раз, либо надо исходить из более сложной системы образования. Но все-таки, вот если исходить из такого теплового потока, то возможно частичное плавление недр Луны примерно на глубине около 1000 км, где температура должна достигать приблизительно 1000°. Радиоактивные элементы по поверхности тоже неравномерно распределены, имеется несколько максимумов, из которых наиболее интересный это на северо-западе Океана Бурь в районе Моря Дождей, плато Аристарх, там, где наблюдаются как раз наиболее часто временные явления на Луне. Это один из возможных последышей вулканической деятельности на Луне. Интересно, что это совпадает с максимумом радиоактивности.

На луне встречаются лунотрясения. Мощность их очень невелика. Явно прослеживается два типа: один, который связан с поверхностными явлениями, связан, например, с движением терминатора по поверхности Луны, т.е. с переходом от дня к ночи - с температурными колебаниями, с мелкими метеоритными падениями - поверхностные землетрясения; и имеется очаг глубинных землетрясений, которые находятся на глубине 700-

800 км. Но лунотрясения очень невелики. Максимально в гипоцентре это 2-3 балла с общей энергией 10^{15} эргов/год, т.е. на девять порядков примерно меньше энергии земных землетрясений. Значит, Луна все-таки очень спокойное тело по эндогенной деятельности, почти неподвижное.

Когда начали привозить образцы с Луны (сейчас привезены на Землю образцы с семи точек), то казалось, что Луна очень однородна. Разделяли морские породы, породы материковые, и казалось, что морские породы очень однородны. Сейчас ясно, что в среднем, в общем, морские породы должны быть отнесены по геохимической классификации к базальтам, но петрологически, петрографически это разные вещи совершенно, начиная от сильностекловатых базальтов и кончая, через долериты, до микрогаббро и хорошо кристаллического габбро.

По химическому составу сначала говорилось о том, что все лунные базальты титанистые. Это не так. Существует, по крайней мере, несколько групп: это титанистых базальтов, алюминиевых базальтов, глинозёмистых и обычных, в общем, ферробазальтов. Опять-таки, я вам покажу, насколько пятнистое распределение их по поверхности, скажем по содержанию титана, и насколько преждевременно говорить об однотипности пород на Луне. Значит, имеются все фации по глубинности в образцах. В частности, определялись скорости остывания некоторых минералов из сборов «Луны-24^{ая}», и они показали, что есть скорости остывания, которые выражаются в градусах в часы и в градусах в год, т.е. совершенно поверхностные излияния и относительно глубинные выбросы. Все образцы, привезенные с Луны, все сборки реально представляют собой аллохтонные породы, не в коренном залегании. Это включение в реголите. И реголит собирает в себя с довольно значительных площадей материал. Значит, привязать к конкретному месторождению что-то далеко не всегда удастся. Достаточно сказать, что на «Луне-24^{ой}» детальный анализ, дешифровка крупномасштабных снимков показывает, что там возможно, по крайней мере, шесть источников вещества, которые собираются в реголите.

Несмотря на те различия, о которых я говорил, все-таки имеются общие четкие, геохимически выраженные, отличия лунной коры от земной коры. Это дефицит летучих элементов во всех породах, таких, как свинца, висмута, таллия. По подсчетам Андерса, скажем, отношение таллия к урану в 10 000 раз меньше космической распространенности, т.е. очень резкое обеднение таллием, как летучим элементом происходит. Затем, обеднение калием рубидием, цезием, галогенами, и очень резкое обеднение водой и углекислотой.

На Луне встречаются пористые базальты, с пористостью порядка 40% известны образцы, но, очевидно, не больше. Газовый состав внутри этих пузырьков, он все-таки остается по-настоящему неопределенным. Вероятно, это углекислота была, но 40% по

объему это в весовом отношении очень мало. Следов дегазации никаких нет. Больше того, расчет равновесия лунных минералов показывает очень восстановительные условия, в которых образовались лунные породы, как материкового типа, так и морского типа. На Луне нет, практически нет, там отдельные зернышки сомнительные какие-то, магнетита; нет гидросиликатов. И типичной, в смысле окислительно-восстановительной обстановки, является ассоциация железа: троилит и ильменит, т.е. трехвалентного железа на Луне реально нет.

Характерным является избыток, наоборот, тугоплавкими, труднолетучими элементами. Это титаном, цирконием, иттрием, скандием, отчасти редкими землями. Вот это общие черты геохимии лунных пород, о которых можно говорить смело, потому что более детально сейчас имеется колоссальная литература по описанию лунных образцов, наверно, не существует на Земле образцов, столь детально изученных, как эти лунные образцы. Но пока что всё изучение, в общем, идет к тому, что разные образцы из разных мест довольно существенно отличаются друг от друга, и вот общими закономерностями, наверно, надо считать то, что я вам сказал.

Среди лунных базальтов выделяются еще интересная группа, так называемых KREEP-базальтов, KREEP – это по начальным обозначениям элементов: калий, редкие земли, фосфор, породы, обогащенные вот этими тремя группами. Они же обладают несколько повышенной радиоактивностью. Происхождение их неясно. Встречаются они или в виде стекол вторичных, или в виде отдельных кусков, тоже связанных с определенными территориями, в частности, в восточной части их существенно меньше, чем в западной части.

Известны отдельные образцы ультраосновных пород – дунитов. Положение их геологическое неясно.

Значит, в целом имеются лунные моря, которые характеризуются накоплением железа и магния, в противовес материкам, континентам, которые характеризуются несколько другой серией пород – полевошпатовой, с большим количеством анортита. Сейчас их объединяют в серии, так называемые ANT – анортозит, норит, троктолит, которые характеризуются обогащением кальцием и алюминием.

Средний возраст пород довольно сильно различается. Если все морские излияния, базальтовые укладываются в возраст примерно от 3,6 млрд. лет до 2,7-2,8 млрд. лет, то материка существенно старше, т.е. они занимают время от 3,6 млрд. примерно до 4 млрд. лет. Выше 4 млрд. лет известны отдельные какие-то пробы, несколько сомнительные.

Надо еще сказать, что практически анортозитовых пород и пород серии ANT материковых неметаморфизированных неизвестно. Это породы, подверженные ударному

метаморфизму в большой степени, остеклованные, с двойникованием, с целым рядом других следов ударного процесса.

Значит, материка сложены не столько вот теми породами, которые я вам назвал, сколько материковыми брекчиями, которые представляют брекчии из этих пород. Это спекшиеся образования с сильным аморфизированием.

Третий тип породы – это реголит, который покрывает поверхность Луны. В значительной степени связан по составу с подстилающими породами, но в то же время обладает рядом особенных свойств. Изучение реголита представляет большой интерес потому, что при образовании реголита в малом масштабе проходят, собственно, те же процессы, которые шли в конце процесса аккреции. И значит, это моделирует: по химическому составу, по физическому изменению пород мы можем там хорошо видеть, что может происходить при ударном преобразовании. И в реголите надо выделить два типа частиц, очень четко разделяющихся, которые можно назвать первичными – представляющие малоизмененные осколки пород и минералов магматических, и вторичные породы или зёрна, точнее говоря, которые представляют собой стекла, агглютинаты, т.е. спёки, – это зернышки, подвергшиеся сильной степени ударного метаморфизма.

Давайте посмотрим, как выглядит реголит, чтобы это было нагляднее.

Здесь карта Луны. На этой карте показаны все точки, из которых взяты лунные образцы. Еще «Луна-24^{ая}» взяла образец из южной части Моря Кризисов. Таким образом, советские станции - это «Луна-24^{ая}», «Луна-20^{ая}», «Луна-16^{ая}», они находятся почти на одной линии и реально связывают два моря и материк между ними. Тут интересной особенностью является то, что вот эта часть материка, очевидно, является выбросом из бассейна Моря Кризисов до того, как Море Кризисов было залито еще. Она остаток первичной коры материковой представляет. И таким образом, что дальние участки вот кратера, лежащие в районе падения «Луны-20^{ой}», соответствуют более высоким горизонтам древней коры; а те частицы материковых пород, которые попадают в пробу «Луны-24^{ой}», они соответствуют самым низам выброшенной толщи. Таким образом, мы получаем не только пространственный разрез, но определенный и временной разрез.

Следующий, пожалуйста.

Это внешний вид реголита «Луны-16^{ой}», как видите очень такая тонкозернистая однородная масса. Это отпечатки, связанные просто с процессом, при полировке. Больше всего похоже на цементный такой порошок, хотя содержит довольно большое количество и крупных зерен. Существует очень интересный процесс созревания реголита, в результате которого происходит не только постепенное дробление его, но и целый ряд химических изменений.

Следующий, пожалуйста.

Если посмотреть на более крупные частицы реголита под микроскопом, то мы увидим разные типы. Это или стекла, или мономинералы, тут может быть перепутано, они выглядят почти что одинаково. Это вот богатые полевошпатом континентальные породы, которые попали сюда. Это, вероятно, габбро крупнозернистые там видны. Это похожие по количеству светлых пятен, но имеющие окатанный, такой округлый вид брекчии, континентальные брекчии, которые являются результатом спекания уже тонкозернистой части реголита. И вот процессы оплавления этих частиц в разной степени выражены в этой части образцов. Вот это спеки или агглютинаты, которые представляют собой очень пористые, слегка спаянные частицы. Здесь вы видите блестящие поверхности, частично остеклованных брекчий. И здесь, наконец, капли расплава, которые застыли во время полета в виде таких шариков.

Следующий, пожалуйста.

Тут несколько типов пород дано. Я, честно говоря, не помню, что это. Мне кажется, что (переговоры с Олегом и Машей, которые помогают понять, что на снимке) очень сильно стекловатый витрофировый, черный – это значит всё реально стекло.

Следующий, пожалуйста.

Это пример, наоборот, хорошо раскристаллизованного габбро.

Следующий.

Должен сказать, что лунная терминология пород не вполне соответствует земной, потому что все реально там гораздо более мелкозернистое, чем на Земле. Значит, при той же структуре отдельные минералы, во всяком случае, в наших образцах реголитовых, они имеют очень маленькие зерна. Это, если я не ошибаюсь, континентальная порода, сильно брекчированная. И здесь то же самое: это стекло, черное; это порода, типа анортозита какого-то или не анортозита, точнее говоря, а вот из серии ANT, подвергнувшиеся сильному ударному метаморфизму. Вы видите, как полевые шпаты сильно растресканы, и как много здесь стекла.

Следующий, пожалуйста.

Это следы ударных процессов на отдельных частичках реголита. Вы видели там шарики, которые имеют диаметр порядка десятой миллиметра, и вот на этом шарике тоже ударный кратер. Вот эта часть явно оплавлена. Значит, стеклянная частица, в которую с большой скоростью попала космическая частица ничтожных размеров. Что это за вырост, я, честно говоря, не знаю, мы так и не определили, что это за штука, но вот на частице такая имеется.

Следующий.

Вот кратер такого же типа с очень четким оплавлением. Вот видите, вот это всё зона оплавления, тоже на поверхности шарика. Интересно, что вот этот вал, который имеется здесь, и в ряде случаев второй вал, он не вполне соответствует валам на крупных кратерах,

это немножко другое явление, тут это не видно, но связанное со сколом, а не со сдвигом, как это имеет место в крупных кратерах.

Спасибо.

К чему сводятся процессы созревания так называемого реголита, т.е. изменения при нахождении на поверхности? Во-первых, идет дробление частиц с уменьшением среднего размера. Навстречу идет появление какого-то количества спекшихся частиц. Значит, устанавливается определенное равновесие по зернистости. Появляются магнитные свойства за счет частичного восстановления железа, за счет увеличения агрегации железа. И крайне интересным процессом является резко восстановительный процесс, который наблюдается на поверхности частиц под влиянием, вероятно, протонов солнечного ветра, может быть других типов космических излучений, главным образом. Может быть, частично за счет конденсации при ударном испарении и обратной конденсации появляются пленки, пленки восстановленных элементов, которых мы на Земле в восстановленном виде никогда не видим. Это не только пленки железа, которые уже несколько лет тому назад были описаны, но и пленки металлического титана, алюминия, кремния, которых, как вы знаете, на Земле не встречается. Я лично подозреваю, что должны быть и пленки менее устойчивых элементов, таких как магний. Это не доказано, но, вероятно, тончайшие пленки таких активных элементов в земных условиях настолько быстро окисляются, что их просто не удастся как следует поймать. Во всяком случае, судя по той группе элементов, которую я вам назвал, это не наиболее легко восстанавливаемые элементы, а наиболее **устойчивые** в земных условиях металлы, которые, вероятнее всего, сохраняются.

Происходит существенное улетучивание, потеря реголитом таких элементов как щелочи, калий, натрий, в некоторых случаях железо и даже кремний. В отдельных случаях отдельные зерна реголита показывают потерю кремния, достигающую до 30% номинала, т.е. процесс геохимического превращения реголита очень серьезный. Вероятно с этим же связано то, что попытки определить абсолютный возраст, скажем по рубидиево-стронциевый методу, приводит к тому, что возраст реголита оказывается старше возраста вмещающих пород. Вероятнее, это связано с тем, что рубидий испаряется, стронций, как менее летучий сохраняется, и поэтому возраст становится старше. Частицы, подвергаясь космической бомбардировке, имеют ряд внедрений. Внедрения, связанные с солнечным ветром – это протоны, т.е. водород там обнаруживается, гелий, инертные газы; водород при химическом анализе может давать видимость некоторого количества воды, хотя реально он не связан с водой, а связан с вторичными реакциями уже восстановления лунной породы и, соответственно, окисления водорода в процессе выделения.

По возрасту разделяют для реголита возраст абсолютный или возраст кристаллизации, и возраст экспозиции, экспозиционный возраст, который соответствует времени пребывания реголита на поверхности Луны. Определять его можно как по количеству внедренных ядер вторичных, так и по трекам, т.е. по следам частиц высоких энергий, которые можно вытравить и сосчитать возраст пребывания на поверхности. Если мы сравним земную кору и лунную, то увидим, что происхождение базальтов легко объединяется одним сходным процессом. Этот процесс – выплавление легкоплавкой фракции, вероятнее всего по типу зонного плавления, но во всяком случае это кристаллизационная дифференциация с выплавлением легкоплавких фракций. Нормальный базальт. Если мы посмотрим на континентальную, более древнюю кору, богатую полевым шпатом, обогащенную, значит, кальцием, алюминием, то этот процесс так просто не проходит. Считается, что эта кора, имеет толщину порядка 60 км, но не зависимо от принятой мощности, она там, наверно, можно принять её 60 км. Для её объяснения можно привлечь два механизма. Наиболее распространенный механизм, он заключается в том, что Луна с поверхности должна была быть расплавлена примерно на 200 км вглубь, и произошла такая флотация или всплытие легкого полевого шпата из первичного какого-то вещества. Вот это один механизм. Но, вообще говоря, всплыть с двухсот километров, чтобы образовать сильно обогащенную кору, это не так просто. Может ли обеспечить гравитационная дифференциация такой процесс – это не очень ясно.

Второй возможный путь объяснения этого, он связан с разделением вещества во время самой аккреции. Механизм можно представлять себе так (рисует на доске). Если мы берем какую-то ванночку, скажем моделируем так, и пропускаем тепловое поле, спираль, с медленным движением сюда, и расплавляем в каждой зоне, то у нас получается такой процесс, что тугоплавкая фракция начинает кристаллизоваться сзади, движение идет в эту сторону, как я показал, а легкоплавкая фракция постепенно оттесняется сюда. Значит, здесь будет легкоплавкая фракция, а здесь тугоплавкая. Если за основу мы возьмем метеоритное, скажем, хондритовое вещество, то в результате такой прогонки мы здесь получаем определенную базальтовую зону. Для того, чтобы произошло такое разделение вещества нужно, чтобы вещество двигалось относительно теплового поля или тепловое поле относительно вещества. Обычный механизм образования базальтовой коры, он объясняется тем, что разогретая зона плавления постепенно подвигается к поверхности Земли (?) и оттесняет легкоплавкую фракцию к поверхности, образуя вот эту базальтовую кору. Но, значит, нужно, чтобы тепловое поле двигалось относительно вещества, и тогда тугоплавкая фракция остается за тепловым полем, легкоплавкая оттесняется вперед. Мы можем себе представить, что в процессе аккреции (вот это, если у нас поверхность Луны) у нас за счет

энергии аккреции, за счет других процессов возникает какая-то тепловая зона, через которую проходит вещество, падающее сверху путем нарастания. Т.е. тепловая зона у нас оттесняется вот сюда все время, движется (точнее говоря, вещество движется относительно тепловой зоны сюда). При этом, учитывая возможность частичного разделения, мы можем получить вот такую тугоплавкую кору, находящуюся сверху в процессе аккреции. Такой же процесс может привести к тому, что древнейшие закристаллизованные породы, которые мы видим на Луне, являются дегазированными породами. Значит, один и тот же процесс как будто бы действует в две стороны, тут за счет легкой летучести газов и воды они будут оттесняться на поверхность, улетать. И если поле тяготения не достаточно большое, то они покидают систему. Если поле тяготения достаточно большое, так как на Земле, они образуют летучую оболочку.

Если мы в историческом аспекте посмотрим развитие коры Луны и Земли, то мы увидим вот такую вещь (рисует на доске), здесь у нас будет современность, а здесь –(минус)4 млрд. лет. Здесь возьмем энергию образования, энергию геологического процесса. Вот не прибегая ни к каким гипотетическим построениям, а исходя только из того, что мы видим на поверхности, мы можем утверждать, что энергия кратерообразования шла вот по такому закону. Где-то мы прерываем, потому что начинаем фантазировать. А вот начиная с этого места, мы видим вот так вот. На уровне примерно 3 млрд. лет тому назад она выходит практически на современный уровень, энергия, может быть, с точностью в два раза, может быть, чуть-чуть можно изменить, но очень незначительно. В течение 2,5-3 млрд. лет, количество соударений с поверхностью, количество выпадающего метеоритного вещества на поверхность Луны, соответственно энергия поверхностных процессов, она практически постоянна. Но начиная с этого времени, она **очень** резко меняется, очень резко. Если мы возьмем радиоактивный разогрев планеты, то окажется, что максимум разогрева где-то, примерно, через миллиард-полтора миллиарда лет после начала чего-то. Что такое вот это начало? (показывает на доске) Не очень ясно, конечно. Если представлять себе, что планета образовалась в результате аккреции, то сейчас время аккреции, наиболее вероятно, оценивают в порядок сотен миллионов лет, вот это наиболее вероятные вещи, на 10^8 лет от нуля до образования 99% массы, т.е. вот до какой-то вот такой точки. Но это величина в достаточной мере неопределенная, существуют модели **очень** быстрой аккреции, которые утверждают, что чуть ли не за тысячи лет может образоваться; существуют модели, которые говорят, что это может доходить до миллиарда лет. Но наиболее вероятная величина – это сотни миллионов лет. Так вот, если мы за начало примем величину, когда планета в основном уже сформировалась, скажем, 90% ее образовалось, то процесс радиоактивного разогрева её будет вот таким образом идти (рисует). Примерно через миллиард-полтора

миллиарда лет разогрев достигнет максимума. И вот это вот время (показывает), где и энергия соударения достаточно велика, и энергия радиоактивности уже достаточно велика, это время соответствует максимуму излияний на лунной поверхности. Это период образования лунных морей, которое занимает время от 3,6 до 2,7-2,8, может быть лучше взять 3, хотя практика показывает, что такие границы всегда раздвигаются, а не сдвигаются, миллиарда лет.

Сопоставим хронологию земной и лунной истории. Здесь возраст от нуля (чертит) ... раз, два, три, четыре, пять, здесь современный момент. Для Земли, что мы имеем? Фанерозой 600 млн. лет. Затем систему, мало изменяющуюся, и в возрасте, по крайней мере, в 3,5 раз (? возможно, млрд.) – здесь мы уже видим сформированную биосферу и практически те же самые горные породы, которые встречаются у нас. Может быть, какие-то тонкие отличия в относительном содержании железистых кварцитов, эффузивных и интрузивных пород. Но, в общем-то, здесь достоверно то же самое, что здесь. Имеется гидросфера, имеется окислительная атмосфера того же порядка, имеется биосфера, имеется гранитная оболочка – сформированная Земля. Что мы имеем для Луны? Давайте, пойдем снизу. В возрасте до 4 млрд. лет – это становление материковой коры. Здесь мы видим потерю газов, уже потеряли к этому моменту, потерю воды, потерю легколетучих, т.е. практически современное состояние по летучим элементам. Вот этот период от 4 млрд. до 3 млрд. лет – это вот массовые излияния, образование морей, которое соответствует становлению биосферы на Земле. И после этого практически неизменное состояние до современности. Постоянный метеоритный поток, постоянство действующих факторов, которые различают по периодам, по периодам крупных отдельных образований кратеров, но которые принципиально ничего нового не имеют. Скажем, фанерозой соответствует к(К?) оперниковский период, но несколько больше он – порядка миллиарда лет, это сохранение лучей у кратеров, т.е. практическая неизменность самого поверхностного слоя. Но это уже такие подразделения не принципиальные совершенно. Вот какое соотношение истории Луны и Земли мы видим.

На Луне я остановился так долго, потому что, с одной стороны, Луна наиболее изученным телом является, а с другой стороны – это пример наиболее малой планеты, наиболее примитивного тела, тела в котором, заведомо, циклы осуществляются, геохимические циклы, только в пределах реголита и то, в общем, очень однонаправленные. Циклы, очевидно, геохимические циклы, могли идти в период вот этот (показывает), в период роста Луны, в период аккреции. Там могли идти, а это (показывает) – однонаправленное движение. В то время, как на Земле до сих пор преобладают, конечно, циклические процессы, хотя на них накладывается, в какой-то степени, движение из

глубины, но оно имеет второстепенное значение. Что делалось вот в этот период (показывает) мы не знаем.

Давайте, сейчас посмотрим несколько картинок, которых я даже особенно объяснять не буду, которые показывают просто неоднородность строения поверхности Луны по химии. Объяснения к этой картинке я даже не знаю. Она была продемонстрирована в Хьюстоне месяц тому назад, и объяснительного текста к ней нет. Но тут выделены разные типы горных пород по петрографическому принципу. Не по возрастному какому-то, как в обычной геологической карте, а по петрографическим характеристикам. Вот видите, какая степень пятнистости у них получается.

Следующий, пожалуйста.

Здесь алюминий-кремний. Вы видите, какая пестрота? Это по данным рентгенофлуоресцентного анализа при орбитальном полете. И здесь отношение магния к алюминию. Вот при такой пестроте явно, что говорить о каком-то очень определенном петрографическом типе пород нельзя. Можно говорить только в тех пределах, как я вам сказал.

Следующий.

Вот картинка, на которой вы видите пестроту в содержании титана в лунных морях. Это лунные моря. Значит, красное – это максимум, по-моему, больше 6%, а голубое – 2-3%, это белый, если не ошибаюсь, – минимум, меньше 2%, может быть наоборот. Опять-таки, говорю, – несущественно. Значит, говорить о том, что лунные базальты – титанистые базальты, как говорили несколько лет назад, нет никаких оснований. (Из зала задан вопрос: «это методом сканирования было получено?») Это? Да. Сканирование, рентгенофлуоресцентный. Данные «Аполлона».

Спасибо.

Сейчас я сильно задержал ваше внимание на Луне, чтобы наилучшим образом понять простое тело.

Давайте сейчас посмотрим Меркурий. Он очень похож на Луну, хотя имеет другой состав. Химия его не изучена. А поверхность практически неотличима от поверхности материковой Луны.

Это кратерированная поверхность, перекрытая местами излияниями, очевидно, базальтовыми излияниями типа лунных морей, которые в меньшей степени там (серенькие, должны быть четыре). Это более крупный кратер, поверхность. Немножко другие границы

получаются по размерам, по типам, в связи с тем, что на Меркурии больше сила тяжести, и разлет в момент взрыва идет немножко по-другому закону.

Вот разные типы поверхности Меркурия, разные участки. Немножко выделяется вот такая мелкосетчатая структура, нетипичная для Луны, очевидно, связанная с некоторой морщинистостью, ну что ли, исходной поверхности, которая проглядывает сквозь кратерный узор.

Вот полушария Меркурия. Видите, совершенно то же самое, что Луна.

Значит, это Луна и Меркурий. Пример планет, на которых нет атмосферы, на которых эрозия очень слабо развита и которые сохранили черты своего первоначального происхождения.

Марс является очень интересной планетой вообще. Но на Марсе имеется уже несколько четко выраженных типов поверхности, более богатых. Имеется четко выраженный аппарат центрального типа, это вот *Nix Olympica* («Снега Олимпа»), вулкан, который имеет высоту около 12 км (? в Википедии – 21,2 км), вулкан центрального типа. Очевидно, очень спокойными излияниями образован, но интересно то, что если лавы на Луне и на Меркурии не имеют подъемной силы, т.е., очевидно, дегазированы в высокой степени, на Марсе для того, чтобы обеспечить подъем на такую высоту и заполнение кратера, лава должна иметь уже некоторое количество газов. Количество газов недостаточное для того, чтобы образовать мощные взрывные структуры, как я говорил, для производства вулканического взрыва на Земле нужно несколько процентов воды в лаве, чтобы она могла дать взрыв, на Марсе этого нет. Это спокойное излияние, но с высоким ростом. Это щитовой такой, громадный щитовой вулкан.

Следующий, пожалуйста.

Вот тот же самый вулкан, вид сбоку. Вот он, видите? Как лепешка такая. Вот его кратер. Такой очень типичный щитовой. На Луне аппаратов центрального типа практически **очень** мало. Резко преобладают трещинные излияния.

Следующий, пожалуйста.

Тут я хотел обратить ваше внимание на то, что у Марса имеется ряд специфических особенностей. Мы их дальше увидим в процессе эрозии поверхности очень четко выраженные. И здесь видно в виде выбросов. Если на Луне вокруг кратеров имеются чисто баллистические выбросы, то здесь мы имеем типа потоков, но это не лавовые потоки, это потоки типа грязевых. Вероятней всего, что это так и есть: потоки, типа грязевых потоков при нагреве тела планеты.

Следующий, пожалуйста.

Это тип поверхности, тоже совершенно отсутствующий на Луне, эоловая дюнная поверхность. На Марсе имеется атмосфера, небольшая атмосфера, порядка 6 мбар (миллибар) давление на поверхности. Старые определения, которые давали до 100 мбар, они ошибочны. Но, тем не менее, достаточно для того, чтобы эоловая деятельность проявилась. Очень интересно, что на разных планетах, несмотря на очень резко разную плотность атмосферы (ну вот скажем, на Марсе – 6 мбар, а на Венере – порядка 100 атм (атмосфер), 90 атм, на Земле – 1 атм), вот скоростной напор преобладающих ветров он примерно одинаков. Скоростной напор – это произведение плотности на скорость ветра в квадрате и напололам: $\rho \cdot v^2 / 2$, соответствует кинетической энергии. Так чем более разрежена атмосфера, тем сильнее её движение. На Венере почти застойная атмосфера, на Марсе очень сильные ветра, пылевые бури, а эффект приблизительно такой же, как на Земле. Вот такой типичный эоловый дюнный, барханный рельеф.

Следующий, пожалуйста.

Вот то же самое. Здесь пятнышко в увеличенном, подчеркнутом виде. Совершенно как волноприбойные знаки у нас на воде.

Следующий.

Это очень интересная область на Марсе. Эта большая трещина – грабен или сейчас его определяют как рифт, который изрезан с боков долинами, которые очень похожи на водно-эрозионные. И вот такая деятельность водной эрозии, она довольно четко проявляется на Марсе, несмотря на то, что в современных условиях, жидкой воды на Марсе быть не может. Там давление ниже тройной точки воды, лед непосредственно переходит в пар – жидкая вода не должна существовать на поверхности Марса. Несмотря на это, такого эрозионного типа явления широко развиты. Максимум явлений, связанных с водной эрозией, судя по соотношению с крупными кратерами должен быть отнесен к самым ранним периодам истории Марса, к возрасту порядка тоже 3 млрд. лет. Но самые поздние проявления неизвестно, к какому периоду относятся. Должен сказать, что некоторые затруднения в интерпретации таких вещей вызывает то, что на Марсе, несомненно, имеется не только мерзлота, связанная с водно-мерзлыми грунтами, но и мерзлота, связанная с твердой углекислотой. И вот свойства грунта, сцементированного твердой углекислотой, и процессы, которые могут происходить при оттаивании такой системы, они неизвестны. Поэтому тут продолжают некоторые споры еще идти: в какой мере однозначно такого рода работа должна быть связана с работой воды, но большинство все-таки склоняется к тому, что жидкая вода на Марсе была.

Следующий, пожалуйста.

Вот пример настоящей речной долины меандрирующей, которая совершенно не похожа на те рилии, связанные с лавовыми потоками, которые я вам показывал на поверхности Луны. Интересно, что в ряде случаев у таких долин видно висячее устье, типичное висячее устье, такое как на земных реках с омолаживающим рельефом.

Следующий, пожалуйста.

Вот обратите внимание на это образование – это крайне интересная вещь. Значит, трещина какая-то, на дне которой виден поток типа грязевого, здесь вот он совершенно разжиженный, здесь остается комковатым, видна вершина оврага образующегося очень четко, и видны четкие следы эрозионного вреза по краям.

Что Вы говорите? Рельеф не видите? Это зрительно – кто как воспринимает. Значит, еще раз говорю. Вот это вот – овраг, вот это – тени углубленные туда... Увидели? Может быть, повернуть вверх ногами? Я то вижу – я привык и так, и сяк смотреть. Следующий, только переверните, потому что тут теряется ощущение рельефа.

Значит, вот это – возвышенное вулканическое плато. Это вот – низина. Здесь вот – бровка, размываемая оврагом, вот эрозионный четкий врез идет. Здесь – вынос типа грязевого потока, вот сюда до сих пор он движется.

Следы такой деятельности иногда наблюдаются в колоссальном масштабе. Наиболее древние долины, они могут иметь многие десятки, до сотен километров в ширину. Это катастрофические, очевидно, временные потоки только могли сделать. Они шли, вероятно, по тектоническим трещинам, размывая их. Но, тем не менее, оба борта более или менее равномерно размыты.

Следующий, пожалуйста.

Нет, это не облака ([в ответ на реплику из зала](#)). Это вот кратер, но здесь я, например, вот сейчас вижу его как пуговицу. Вы считаете, что это кратер. И около кратера зарождающаяся вот такая долинка.

И это место в крупном плане дано здесь. Здесь вот видны струйчатые вещи, которые интерпретируются как потоки, типа грязевых. Это, вероятно, что-нибудь около двух десятков километров кратер.

Следующий, пожалуйста.

Это рельеф, в котором вот эта котловина. И это котловины всё. ([Что-то сказали в зале.](#)) Вероятнее всего – выдувание, хотя мне кажется, что это мерзлотный рельеф, что это проседание при оттаивании вечной мерзлоты, проседание и **потом** дальнейшая обработка ветром. В большинстве случаев это вот так, без мерзлоты, не интерпретируется, это рассматривается как одно из доказательств наличия мерзлоты, не чисто эоловое тут.

Следующий, пожалуйста.

Это я хотел вам показать поверхность Марса вблизи, снятую «Викингом». Здесь что интересно? Что считалось, что вот эти районы, где выбрали место посадки для «Викинга» являются аккумулятивными равнинами, заполненными тончайшей пылью или песком, во всяком случае. На самом деле, вы видите, оказалось, что поверхность покрыта колоссальным количеством камней. Рассматривая процесс разрушения пород на поверхности Марса, мы видим, что в целом ряде случаев как раз в котловинах зарождаются восходящие потоки, которые и создают дополнительное выдувание вместо аккумуляции. Такой процесс возможен, очевидно, в связи с тем, что на поверхности Марса присутствует не только механическое дробление, как преобладает, скажем, на Луне, на Меркурии, но идет химическое выветривание. Химическое выветривание основных горных пород. Камень сразу превращается в пылевидную в пиритовую, глинистую фракцию, которая выдувается очень легко. Песчаные зоны есть на Марсе, и здесь можно найти в некоторых местах такие вещи, но они не являются типичными. И вот, вероятно, это смесь глины с сравнительно мало измененными горными породами.

Следующий, пожалуйста.

Вот другой тип. Цвет естественный, это натуральный цвет (ответ залу). Ну, давно известно, что даже с Земли, простым глазом, Марс красноватый. И астрономы его видели, как красноватый. Вот мы здесь убеждаемся, что это не обман зрения. Причем красноватой является не только поверхность, связанная с железистоокисными соединениями, конечно, но и небо за счет значительного количества пыли, как мы это видим на закате.

Следующий, пожалуйста.

Большинство камней припорошены легким слоем вот этой красноватой пыли, хотя среди них встречаются темные. Явно видно несколько поколений камней. Вот, скажем, сильно изъеденная, корродированная поверхность, и тут сравнительно остроугольный камень без следов такого разрушения.

Следующий.

Это приполярная зона здесь снята. Вот иней сезонного плана (это не облака), который связан с рельефом.

Изображение, снятое на «Викинге» рано утром, когда в районе вот этой красной пустыни, около камня, в тени от него, виден белый ареол. Это иней, **выпавший** ночью, углекислый иней, а не водный иней, и сохраняющийся днем. Вот здесь они видны, белёдые пятна.

Я хочу подчеркнуть, что в то время, как эндогенные процессы на планетах такого типа идут, очевидно, одинаковым путем, экзогенные – резко зависят от состояния, от количества атмосферы, воды и т.д. Вода на Марсе сейчас невозможна (видимо, жидкая), но с несомненностью была в прошлом. Она, несомненно, была в далеком прошлом, во времени порядка 3 млрд. лет, какое количество ее сохранилось до сих пор неизвестно. Значительное количество воды в мерзлом состоянии находится в полярных шапках. Мощность северной полярной шапки, состоящей из пылевых отложений и льдов, как углекислого, так и водного, порядка доходит до одного километра. И, кроме того, довольно заметная имеется криолитосфера, которая проявляет себя в виде отдельных мерзлотных явлений.

Кроме того, тот состав породы, который я вам показывал красный, он был проанализирован, и он интерпретируется по такому минеральному типу: 80% – это железистых глин, около 10% – сульфата магния дается, 5% – кальцита и 5% – окислов железа в виде гематита, гётита и, в общем, сравнительно маловодных соединений.

Атмосфера Марса на 95% состоит из углекислоты, содержит кислорода от 0,1 до 0,4%, причем активность кислорода резко возрастает за счет ионизации, которая подходит почти к поверхности, и, значит, процессы окисления пород очень интенсивны, 2-3% азота, 1-2% аргона. Причем по азоту имеется сдвиг в содержании изотопного состава в сторону примерно двойного обогащения ^{15}N , по сравнению с Землей.

Вот, благодарю вас за внимание.

Вопрос из зала. Вода – переменный состав, в среднем она соответствует насыщению при -60° – средняя температура Марса. Вода переменный состав имеет, так же как атмосфера, несколько меняет свое давление в зависимости от сезона, соответственно тому, что углекислота вымораживается и переходит от одного полюса к другому.