

A SURPRISE FROM MARS

Yu. A. SHUKOLYUKOV

The first data on the chemical composition of Martian rock fragments show – contrary to previous conceptions – that there is probably a chemically differentiated crust on Mars that is analogous to the Earth's crust.

Впервые полученные данные о химическом составе фрагментов пород Марса вопреки прежним представлениям свидетельствуют о вероятном присутствии на Марсе химически дифференцированной коры, аналогичной земной коре.

СЮРПРИЗ С МАРСА

Ю. А. ШУКОЛЮКОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

С незапамятных времен в течение многих веков человечеству был интересен Марс. Еще древних астрологов и астрономов завораживала странная, казалось, зловеще красная планета, столь отличная от всех других планет Солнечной системы. Интерес еще больше возрос, когда в 1877 году Г.В. Скиапарелли (G.V. Schiaparelli) “увидел” на Марсе рукотворные “каналы”. Удивительно живучими до сих пор остаются средневековые, шарлатанские попытки астрологов связать с положением Марса (и других планет) события повседневной жизни отдельных людей. Но ученых Марс интересует совсем по другой причине. Понимание закономерностей эволюции его твердой оболочки и глубоких недр, исследование состава и истории атмосферы и гидросферы Марса – ключ к расшифровке законов развития и нашей планеты, это шаг к познанию истории всей Солнечной системы.

ТРУДНЫЙ ПУТЬ К КРАСНОЙ ПЛАНЕТЕ

Изучать горные породы Марса можно двумя основными способами. Сегодня уже ясно: вещество с одной планеты может быть переброшено на другую планету. Известно, как это происходит. С траекториями, по которым планеты движутся вокруг Солнца, могут пересечься траектории относительно небольших космических тел, мчащихся с огромными скоростями в десятки км/с. Удар такого тела о поверхность планеты приводит к тому, что при определенных условиях (масса и состав ударника, угол, под которым он врывается в поверхность планеты) осколки поверхностных пород от взрыва могут приобрести скорость, достаточную для преодоления силы притяжения планеты. Они вырываются в космическое пространство. Спустя какое-то время некоторые из них падают в виде метеоритов на другие планеты. Например, на Земле обнаружены метеориты не только с ее близкого спутника Луны, но некоторые метеориты, несомненно, происходят с Марса. Это 12 известных сегодня особых “марсианских” или SNC-метеоритов (аббревиатура составлена из первых букв названий типичных марсианских метеоритов – Shergotty, Nakhla, Chassigny). Исследуя SNC-метеориты, ученые обнаружили, что по составу это магматические породы. Они возникли гораздо позже остальных метеоритов возрастом около 4,5 млрд лет: прошло всего 1,3 млрд лет со времени образования многих SNC-метеоритов из расплавленной магмы. Следовательно, SNC-метеориты родились не на какой-нибудь давно остывшей

малой планете, подобно другим обычным метеоритам, а на гораздо более крупном космическом теле, где вулканическая активность могла проявляться и сравнительно недавно. А когда обнаружилось, что изотопный состав азота и благородных газов SNC-метеоритов и атмосферы Марса очень близок, пришли к выводу: их прародитель — Марс.

Поэтому в результате исследования химического и минерального состава удалось предложить и первую гипотезу эволюции, современного строения и состава Марса. По этой гипотезе из первичного вещества Марса сначала выплавилось небольшое внутреннее ядро, состоящее из железа, никеля и серы. Оно окружено толстой и однородной по составу литосферой с активными вулканами, до сих пор выбрасывающими все новые и новые порции магмы на поверхность Марса. SNC-метеориты — осколки, фрагменты таких магматических пород. Правда, несколько странно, почему при такой простой геологической истории вещество SNC-метеоритов так сильно варьирует по составу. Только прямое исследование пород Марса прямо на месте их залегания могло ответить на эти и другие вопросы.

В 1976 году на Марс были посажены две американские межпланетные автоматические станции экспедиции “Викинг” (“Viking”). Тогда удалось проанализировать только пыль, покрывающую поверхность планеты, определить более или менее точно содержание в ней железа, магния, кальция, алюминия, калия, серы и хлора.

Несмотря на то что станции были удалены одна от другой на 6500 км, результаты анализа совпали. Был сделан вывод, что эта пыль, покрывающая, вероятно, всю поверхность планеты, — продукт выветривания, разрушения и измельчения мафических (основных) пород Марса. Для них характерно высокое содержание магния и железа. Они близки по составу первичному, исходному веществу планет. Поэтому был сделан вывод о том, что в отличие от Земли Марс — планета с недифференцированной, не разделенной на слои разного состава мощной и неизменной во времени каменной оболочкой — литосферой.

Тогда казалось, что Марс не имеет такой богатой SiO₂ и алюминием, в значительной части гранитной коры, как Земля. Это означало, как думали, что коры могут появляться только на достаточно больших планетах вроде Земли. Масса же Марса в 10 раз меньше, чем у Земли.

Присутствие в марсианской пыли таких летучих элементов, как хлор и сера, можно было объяснить действием вулканических газов на основные (мафические) породы. Ведь на Марсе немало вулканов. Например, в сравнительно молодой вулканической области Тарис много мощных вулканов, один из которых, гора Олимп, диаметром 500 км и высотой 25 км — самый большой вулкан Солнечной систе-

мы. Под действием вулканических газов в породах могут образоваться сульфаты и хлориды.

Казалось, получается стройная картина относительно небольшой примитивной (в космохимическом смысле), малодифференцированной планеты, на поверхности которой господствуют основные или ультраосновные породы. Однако космохимиков и планетологов продолжали интриговать вопросы, на которые еще не было ответа, например: а что там под слоем марсианской пыли, не скрываются ли там совсем другие породы? Почему SNC-метеориты, хотя среди них и преобладают основные и ультраосновные породы, все же так различаются по химическому и минеральному составу; не говорит ли это о том, что процессы сильной химической дифференциации вещества Марса все же шли и что можно встретить и на этой планете аналоги земных пород — продукты геохимической дифференциации?

Было принято решение пробиться сквозь слой марсианской пыли и определить химический состав пород, скрытых под ней. Это можно было сделать с помощью особых, не взрывающихся снарядов пенетраторов (от англ. penetrate — проникать), внутри которых располагаются приборы для химического анализа. Пенетраторы должны были доставляться к цели автоматическими межпланетными станциями и сбрасываться с определенной высоты так, чтобы они проникли в глубину на несколько метров.

В нашей стране исследования Марса предусматривали именно такое решение задачи. Ученые Института космических исследований РАН под руководством Р.З. Сагдеева, Института геохимии и аналитической химии РАН под руководством В.Л. Барсукова и многих других институтов и организаций создали пенетраторы и вместе с исследователями из российского Института атомных реакторов в Димитровграде, немецких Института внеземной физики в Гартинге и Института химии в Майнце разработали и установили в пенетраторы приборы для химического анализа марсианских пород.

Но прежде чем сбрасывать пенетраторы на Марс, было решено применить их для исследования его спутника Фобоса. Однако почти все отечественные исследования Марса сопровождалось роковыми неудачами. Если при не менее трудных исследованиях Луны и Венеры удалось получить блестящие результаты, то Марс нам пока не дается. Сначала были неудачные полеты к Марсу, затем экспедиция “Фобос” (снова провал и гибель двух аппаратов), экспедиция “Марс-96” — опять неудача. Между тем германским, российским и американским ученым и конструкторам во главе с Р. Ридером (Макс-Планк-Институт химии, Германия) к тому времени удалось создать настоящее чудо техники для химического анализа на расстоянии в десятки миллионов километров от Земли. Именно такие анализаторы стояли на погибшем корабле “Марс-96”.

Неудивительно, что, когда после неудачи этой экспедиции ведущий специалист по исследованию Марса профессор Макс-Планк-Института химии Х. Вэнке получил приглашение установить анализатор на американскую межпланетную автоматическую станцию “Pathfinder”, которая готовилась к запуску на Марс, согласие последовало незамедлительно.

Этот полет открывал ранее недоступные возможности. Действительно, марсианские породы в экспедициях “Viking” анализировались с помощью приборов, установленных на металлической штанге-руке. Можно было сделать анализ только там, куда эта рука могла дотянуться – не дальше, чем на расстоянии нескольких метров от спускаемого аппарата, стоявшего на поверхности. Ничего, кроме марсианской пыли, под руку не попало. Пенетраторы хотя и могут проникнуть сквозь слой пыли в коренные породы, но способны выполнить анализы только в отдельных ограниченных точках планеты.

В экспедиции же “Pathfinder” должен был участвовать американский марсоход “Rover”. Он должен был развезать по марсианской поверхности на шести колесах, по команде останавливаться для нужных измерений. Поэтому появилась возможность исследовать состав пород на большой площади, в специально выбранных районах. На “Rover” и установили прибор для химического анализа, созданный международной командой ученых и инженеров.

После почти семимесячного перелета, преодолев 78,6 млн км космического пространства, 4 июля 1997 года “Pathfinder” опустился на Марс в долине Арес. По команде с Земли “Rover”, сойдя с борта посадочного аппарата, отправился в путь. Пройдя некоторое расстояние, он принял новый приказ с Земли и, словно охотничий пес, высоко поднял свой чувствительный электронный нос – прибор для определения химического состава, укрепленный на шарнирном устройстве. С замиранием сердца ждали на Земле результатов первого пробного анализа марсианского воздуха. И вот радостные возгласы: “Ура! Прибор выдержал перелет и посадку на Марс!” Он показал почти стопроцентную концентрацию углекислого газа CO_2 , как это и есть на самом деле в атмосфере этой планеты. Можно было приступить к исследованиям химического состава пород Марса. Теперь настало время рассказать об этом чувствительном электронном носе, способном определять химический состав окружающих тел.

ЛАБОРАТОРИЯ ВЕСОМ 570 ГРАММОВ

Наверное, почти каждому из нас доводилось видеть в медицинской рентгеновской лаборатории громоздкие аппараты. С их помощью создают и регистрируют проникающее рентгеновское излучение. Именно такое излучение решили использовать для определения состава марсианских пород. Но пришлось придумать способ, как уменьшить размеры

рентгеновской лаборатории настолько, чтобы ее можно было захватить в полет к Марсу, а заодно поместить в нее еще два прибора – для исследования рассеяния альфа-частиц и ядерных реакций. Это оборудование ее создатели – немецкие, российские и американские ученые во главе с Р. Ридером назвали APXS (альфа-протон-рентгеновский спектрометр)¹ [1].

Сердце APX-спектрометра было создано группой российских исследователей под руководством В. Радченко в Институте атомных реакторов в Димитровграде под Ульяновском. Оно сделано из трансуранового искусственного химического элемента кюрия, точнее, из одного изотопа этого элемента – кюрия-244. Общее количество кюрия-244 в нем таково, что источник ежесекундно испускает почти 2 млрд альфа-частиц, каждая с энергией около 6 млн электрон-вольт.

Пролетая сквозь исследуемое вещество, многие из альфа-частиц легко выбивают электроны из внутренних К- или L-оболочек атомов. На освобожденные места перескакивают электроны с более высоких энергетических уровней с других электронных оболочек. Высвобождается энергия в форме гамма-квантов характеристического рентгеновского излучения. Для каждого химического элемента со своими электронными оболочками характерен собственный спектр излучения – набор квантов специфической энергии. Для регистрации этих квантов служит детектор – 256-канальный энергетический анализатор. Каждый канал в нем подсчитывает только “свои” кванты определенной энергии. Набор подсчитанного числа квантов с разной энергией – это рентгеновский спектр марсианской породы. Его не просто расшифровать, потому что он представляет собой результат наложения спектров разных элементов, присутствующих в образце (рис. 1).

Для расшифровки готовят стандарты разного, заранее известного химического состава и сравнивают их рентгеновские спектры со спектром анализируемой породы. По составу того стандарта, спектр которого ближе всего спектру исследуемого образца, судят о содержании элементов в образце. Расчеты делают на компьютерах по специальным программам.

На Марсе задача рентгеновского анализатора состояла только в записи спектров. Он мог это делать только при температуре ниже -30°C , так как при более высокой температуре неспособен хорошо различать кванты разной энергии. Конечно, можно было охлаждать детектор миниатюрным бортовым холодильником. Но для экономии драгоценной на Марсе электрической энергии решили воспользоваться тем, что сам Марс ночью становится огромным холодильником с температурой до -80°C (днем там относительно тепло, $+5^\circ\text{C}$). Поэтому все

¹ Рентгеновские лучи часто называют X-лучами.

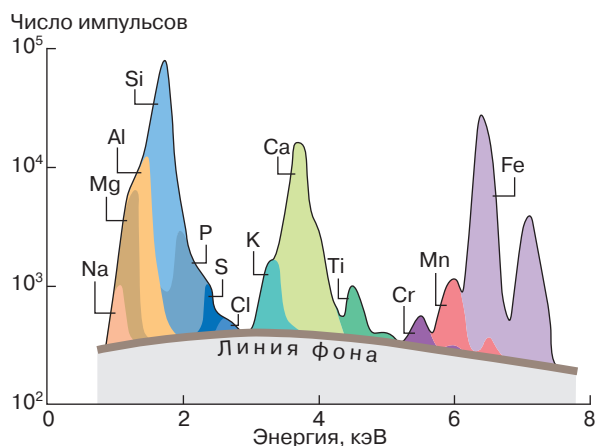


Рис. 1. Энергетический спектр рентгеновского излучения марсианского метеорита Zagami, полученный при калибровке АРХ-спектрометра (излучение разных элементов перекрывается [1])

измерения рентгеновским спектрометром делали по ночам.

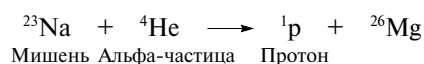
Рядом с анализатором рентгеновского излучения стоял еще один прибор. В нем использовали другой физический процесс — резерфордское рассеяние альфа-частиц (по имени его первооткрывателя Э. Резерфорда). Некоторые из альфа-частиц, испущенных из кюриевого сердца прибора, могут, пронизав электронную оболочку атома-мишени, угодить прямо в “яблочко” — в атомное ядро. Как при столкновении двух упругих шаров, отскочившая после удара об ядро альфа-частица передает часть первоначальной кинетической энергии (E_0) этому ядру. Сама она теперь обладает меньшей кинетической энергией (E). Чем легче ядро-мишень, тем больше энергии ему передается. Если альфа-частица отскакивает под углом 180° относительно первоначального направления ее движения (это обязательно — она может отскочить и под любым другим углом), доля остающейся энергии так зависит от массы ядра-мишени:

$$\begin{array}{l} \text{Ядро-мишень} \quad {}^{238}\text{U} \quad {}^{56}\text{Fe} \quad {}^{40}\text{Ca} \quad {}^{28}\text{Si} \quad {}^{27}\text{Al} \quad {}^{24}\text{Mg} \quad {}^{19}\text{F} \quad {}^{16}\text{O} \quad {}^{12}\text{C} \\ E/E_0 \quad 0,92 \quad 0,75 \quad 0,67 \quad 0,56 \quad 0,55 \quad 0,51 \quad 0,43 \quad 0,36 \quad 0,25 \end{array}$$

Для измерения кинетической энергии таких отраженных альфа-частиц на их пути установлена тонкая пластина толщиной 35 мкм из полупроводникового материала. В ней альфа-частицы тормозятся и в конце концов останавливаются. Каждое такое событие дает электрический импульс тем больший, чем больше кинетическая энергия альфа-частицы. Таким образом можно получить энергетический спектр рассеянных альфа-частиц, а по нему определить химический состав образца одновременно

но с решением той же задачи с помощью рентгеновского анализатора.

И тем не менее рядом с этими приборами поместили еще один — детектор протонов. Они возникают в редких случаях, когда альфа-частица, угодив точно в атомное ядро-мишень, не отскакивает от него словно упругий шар, а откалывает протон, объединяясь с ядром. Происходит α , p-реакция, например:



Только одна из сотен тысяч альфа-частиц вызывает такую ядерную реакцию. И тем не менее получается достаточно для измерения число протонов, поскольку из кюриевого источника каждую секунду испускается 2 млрд альфа-частиц.

В зависимости от того, ядро какого химического элемента оказалось мишенью, протон может обладать строго определенными значениями энергии. Например:

Ядро-мишень	Энергия протонов, миллионы электрон-вольт
Na	3,82 или 5,55
Mg	2,21 или 2,54
Si	2,26
S	2,16 или 2,46

И снова мы видим, что энергетический спектр частиц (на этот раз протонов) — мера химического состава анализируемой породы. Для регистрации протонов от α , p-реакции используют также полупроводниковый детектор. Так же как и в случае альфа-частиц, и здесь мерой кинетической энергии протонов служит величина электрического сигнала в детекторе.

Каждый из описанных методов химического анализа пород Марса имеет свои преимущества и недостатки. Рентгеновский анализатор способен регистрировать все элементы тяжелее натрия и особенно хорошо более тяжелые химические элементы. Анализатор рассеянных альфа-частиц, способный измерить концентрацию всех элементов тяжелее гелия, имеет особенно высокую чувствительность к углероду, азоту, кислороду. Однако способность отличать один элемент от другого ухудшается, если они тяжелее кремния. Детектор протонов позволяет получить информацию о составе в переходной области — натрия, магния, алюминия и кремния.

Вся информация от трех детекторов направляется в трехканальный электронный блок, способный ее запомнить и подготовить к передаче на Землю. Удивительно, но для него потребовался контейнер размером $7 \times 8 \times 6,5$ см. Сам же АРХ-спектрометр имеет такие размеры, что легко уместился бы в чайной чашке. Целая лаборатория весом 570 граммов.

МАРС ОКАЗАЛСЯ НЕ ТАК ПРОСТ, КАК ОЖИДАЛИ

Итак, АРХ-спектрометр, перемещаясь от одной точки к другой на “Rover”, снова и снова анализировал лежавшую под колесами красновато-бурую пыль далекой планеты (рис. 2). Измерения были сделаны в шести местах, удаленных одно от другого. Но всюду химический состав был почти одинаковым. В пределах ошибки анализа он совпадал с составом пыли, определенным в экспедиции “Viking” 21 год назад в 1000 км к западу от места посадки корабля “Pathfinder” (рис. 3). Это свидетельствует о том, что лежащий на всей поверхности Марса слой пыли хорошо перемешан. Пыль содержит много железа и магния, так же как алюминия и кальция, заметное количество серы и хлора, но очень мало калия. Такой химический состав явно свидетельствует, что пыль – это продукт выветривания обогащенных магнием и железом мафических (основных) пород. Это не было новостью после анализов, давно сделанных экспедицией “Viking”.

Но исследователей ждал огромный сюрприз. 6 июля 1997 года “Rover” уперся своим чувствительным носом в довольно большой камень, подобно тому как это показано на рис. 4. К большому удивлению исследователей Марса, у этого камня, получившего название *Barnacle Bill*, химический состав оказался совершенно не таким, как ожидали исходя из всех предшествовавших исследований Марса. В нем оказалось очень много кремния, алюминия и



Рис. 2. Марсоход “Rover” “тренируется” в определении состава пород перед отправлением на Марс. Цилиндрическое устройство справа – АРХ-спектрометр для химического анализа марсианских пород

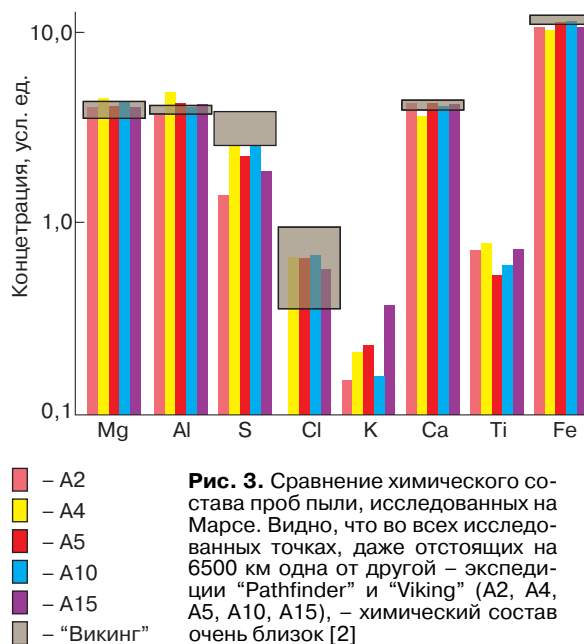


Рис. 3. Сравнение химического состава проб пыли, исследованных на Марсе. Видно, что во всех исследованных точках, даже отстоящих на 6500 км одна от другой – экспедиции “Pathfinder” и “Viking” (A2, A4, A5, A10, A15), – химический состав очень близок [2]

калия, но очень мало магния. Иными словами, этот кусок породы очень похож на земные андезиты – вулканические породы, часто встречающиеся в зонах субдукции¹, разве что с более высоким содержанием железа. Последнее можно объяснить вдвое большей концентрацией FeO в марсианской мантии по сравнению с земной мантией – это раньше уже было установлено при изучении SNC-метеоритов.

Итак, первые в истории науки анализы марсианских коренных пород дали сенсационный результат – на Марсе есть не только мафические породы. Продолжая движение на “Rover”, АРХ-спектрометр анализировал новые и новые большие камни, попадавшиеся на пути – каждый из них получал свое имя: *Yogi*, *Shark*, *Half Dome*. Первоначальный вывод об аналогах земных андезитов подтверждался снова и снова. Правда, исследователи столкнулись с явлением, которое мешало правильно определять химический состав этих камней. Все они, как оказалось, покрыты большим или меньшим слоем марсианской пыли. Например, в проанализированном веществе камня *Yogi* было до 50% пыли. Хорошо бы как-то смахнуть пыль с объекта химического анализа, но ведь до него 78 млн км. И все же выход был найден. Характерная особенность марсианской пыли – большая концентрация серы, попавшей туда, как уже было ранее сказано, из вулканических газов при выветривании пород. Вот эту серу и удалось

¹ Субдукция – широко распространенный на Земле процесс, когда при столкновении гигантских плит земной коры одна из них погружается под другую. Субдукция – одно из проявлений земной тектоники плит, свидетельствующее о геохимической и минеральной неоднородности, дифференцированности планеты.



Рис. 4. APX-спектрометр может анализировать не только марсианскую пыль, но и глыбы марсианских камней

использовать как меру пылевых загрязнений исследуемых камней [2].

Отложим на одной оси графика (рис. 5) измеренную концентрацию какого-нибудь элемента в исследованных камнях и пыли, а на другой – концентрацию в них диоксида серы. Видно, что получается прямолинейная зависимость. Затем экстраполируем прямую линию до значения $SO_2 = 0\%$, то есть до пересечения с осью ординат. Точка пересечения покажет концентрацию элемента при полном отсутствии серы, иными словами, концентрацию в породе, не загрязненной марсианской пылью.

Рассчитанный таким способом химический состав с использованием данных по пяти исследованным камням и шести пробам марсианской пыли подтвердил предварительные заключения, которые были сделаны на основании первого анализа образца *Vernaele Bill*. Действительно, на Марсе есть помимо мафических породы, похожие по составу на земные андезиты. Они, вероятно, состоят из полевого шпата, ортопироксена и кварца с небольшим количеством оксида железа. Правда, на основании только этого еще нельзя утверждать, что породы непременно изверженные, магматические: внешняя структура, строение (текстура) их таковы, что пока нельзя полностью исключить их осадочное или метаморфическое¹ происхождение.

Наблюдения геологических особенностей поверхности Марса позволяет предположить, что куски пород в районе посадки “*Pathfinder*” могли быть принесены туда потоками воды (когда-то на Марсе

¹ Под действием высоких температур, давления и горячих природных растворов.

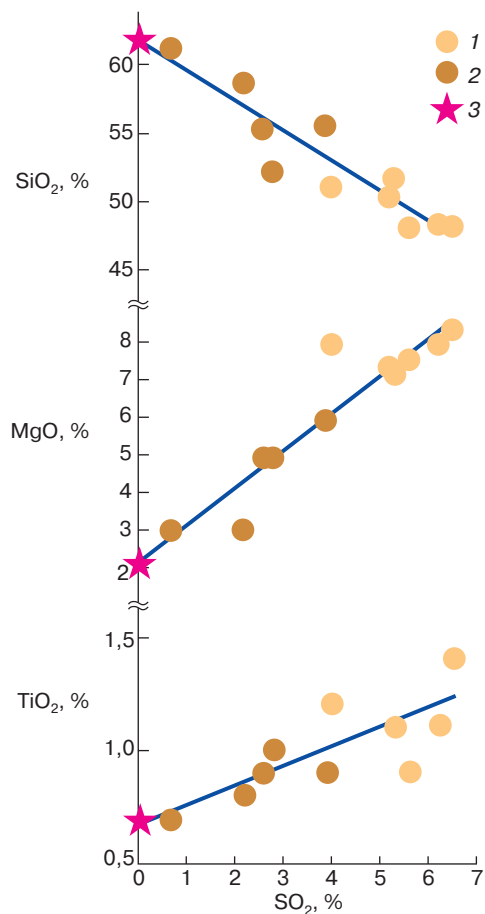


Рис. 5. Определение химического состава марсианской породы, свободной от загрязнений поверхностной пылью. Мера количества пыли в породе – концентрация серы. Поэтому экстраполяция линии зависимости концентрации химических элементов от концентрации серы до пересечения с осью ординат ($SO_2 = 0\%$) позволяет рассчитать химический состав породы, свободной от загрязнений марсианской пылью [2]: 1 – марсианская пыль, 2 – коренные породы Марса, 3 – порода, свободная от пыли

были реки) с возвышенности, находящейся южнее – возможно, представляющей собой древнюю марсианскую кору. О ее древности говорит обилие на ней метеоритных кратеров. Ведь известно, что интенсивная метеоритная бомбардировка Марса, так же как и всех других планет земной группы, происходила именно на ранних этапах существования планет. По содержанию Al_2O_3 , SiO_2 и щелочных металлов марсианская порода по химическому составу (с поправкой на загрязнение пылью) очень похожа на среднее вещество земной коры.

На основании полученных данных была предложена гипотеза, объясняющая многообразие пород Марса [2]. Из исходной магмы с соотношениями

$Mg/Si \sim 0,25$ и $Al/Si \sim 0,18$ выплавлялись породы с низкими соотношениями Mg/Si и высокими Al/Si (рис. 6). Этой ветви эволюции первичной марсианской магмы (линия I) соответствуют породы, представленные камнем Barnacle Bill и свободной от пыли породой после коррекции состава по сере (см. рис. 5). Если из первичной магмы выплавлялись породы с высокими отношениями Al/Si и низкими Mg/Si , из нее должны выплавиться и породы – “антиподы”, обедненные алюминием и обогащенные магнием относительно кремния. Это некоторые из марсианских метеоритов с высокими отношениями Mg/Si и низкими Al/Si : метеориты с составом дунитов и лерцолитов. Их точки лежат на ветви дифференциации (линия I), отвечающей обеднению алюминием.

Предполагают, что из оставшегося после первой дифференциации мантийного расплава могли выделиться породы и в ходе следующего этапа дифференциации (линия II на рис. 6). Это некоторые марсианские метеориты, точки которых находятся или на ветви, отвечающей обеднению алюминием и обогащению магнием, или на противоположной ветви, соответствующей обогащению алюминием и обеднению магнием.

Неудивительно, что линии дифференциации земного и марсианского вещества различаются – содержание железа в мантии Марса изначально было выше, чем в мантии Земли (это доказали при исследовании марсианских метеоритов). Поэтому свойства магматических расплавов и их способность к дифференциации на двух планетах различны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые данные, полученные с помощью АРХ-спектрометра в экспедиции “Pathfinder”, опрокинули прежние представления о Марсе как о планете с однородной, не дифференцированной на оболочку литосферой. Вопреки прежним представлениям оказалось, что Марс, так же как и наша планета, обладает, вероятно, очень дифференцированной корой с высоким содержанием алюминия и кремния, довольно большой концентрацией калия, но с пониженным содержанием магния. Его кора химически подобна коре Земли. Вероятно, на Марсе шли процессы, во многом сходные с геологическими проявлениями на Земле. Химические и петрологические особенности марсианских метеоритов вполне соответствуют таким представлениям.

Автор благодарен доктору Рудольфу Ридеру (Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, Germany) за предоставление иллюстраций и материалов по экспедиции “Pathfinder”.

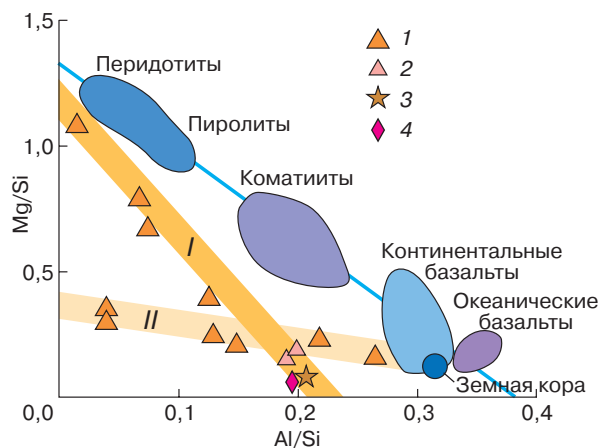


Рис. 6. Сравнение химической эволюции Земли и Марса [2]. Вероятно, эволюция пород Марса шла в соответствии с линией (трендом I): в ходе плавления магмы образовались породы, обедненные Al и обогащенные Mg, – аналоги таких же земных образований (некоторые марсианские метеориты – дуниты, пироксениты – представляют такие породы; соответствующие им точки лежат вверх на линии I). Выплавились также их антиподы, напоминающие по составу земные коровые породы (точки на нижнем правом конце линии I химической эволюции Марса). Некоторые марсианские базальтовые метеориты образуют вторую линию (тренд II). Вероятно, они выплавлялись позже и происходят из образований, внедренных в более древние породы: 1 – метеориты с Марса, 2 – марсианская пыль, 3 – фрагмент породы Марса Barnacle Bill, 4 – марсианская порода, свободная от пыли

ЛИТЕРАТУРА

1. Rieder R., Waenke H., Economou T., Turkevich A. Determination of the Chemical Composition of Mars Soil and Rocks: The Alpha Proton X-ray Spectrometer // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, № E2, P. 4027–4044.
2. Rieder R., Economou T., Waenke H. et al. The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode // Science. 1997. Vol. 278. P. 1771–1774.

* * *

Юрий Александрович Шуколюков, доктор химических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией изотопной геохимии, космохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, награжден золотой медалью В.И. Вернадского РАН, председатель Комитета по метеоритам РАН, создатель и руководитель научной школы по геохимии радиогенных изотопов. Область научных интересов – изотопная геохронология, изотопная геохимия и космохимия. Автор более 300 научных работ, восьми монографий.