

УДК 523.4:523.43–834

К ПРОБЛЕМЕ ОБОГАЩЕННОСТИ МАРСА ТЯЖЕЛЫМ ИЗОТОПОМ УГЛЕРОДА

© 1997 г. Академик Э. М. Галимов

Поступило 27.01.97 г.

Известно, что в метеоритах, которые по ряду признаков являются фрагментами вещества Марса [1], так называемых SNC-метеоритах, карбонатный углерод имеет необычный изотопный состав. Величина $\delta^{13}\text{C}$ карбонатного материала SNC-метеоритов варьирует в пределах от -17 до $+45\%$. В ряде случаев нельзя исключить контаминацию земным углеродом. Однако несомненно присутствие внеземной составляющей, причем она выделяется высокой обогащенностью изотопом ^{13}C . Например, Джуль и др. [2] определили, что ALH84001 содержит не более 1% загрязнений земным материалом, несущим радиоактивный изотоп ^{14}C . Основная же масса карбоната имеет $\delta^{13}\text{C} \sim +45\%$.

На Земле атмосферная CO_2 характеризуется величиной $\delta^{13}\text{C} = -7\%$. Таким образом, налицо резкое различие изотопного состава углерода поверхностных резервуаров Земли и Марса.

Прежде всего возникает вопрос, является ли высокая обогащенность изотопом ^{13}C марсианского углерода планетарной характеристикой или она проявляется локально. В принципе природные механизмы обогащения веществ тяжелым изотопом углерода существуют и можно привести соответствующие примеры для земных условий. Например, в кимберлитах имеются карбонатные глобулы, так называемые автолиты, имеющие аномально обогащенные тяжелым изотопом. Встречаются автолиты, имеющие $\delta^{13}\text{C} \sim +36\%$ [3]. Механизм обогащения этих образований тяжелым изотопом нами подробно рассматривался [3]. Уровень обогащенности изотопом ^{13}C земных автолитов вполне соответствует уровню обогащенности изотопом ^{13}C карбонатных глобул в ортопироксене метеорита ALH84001 ($\delta^{13}\text{C}$ от $+39$ до $+45\%$ [4]). Выдвигалось представление, что обогащение тяжелым изотопом марсианских карбонатов отражает жизнедеятельность метангенерирующих бактерий в локальных обстановках

гидротерм [5]. Так или иначе, если случаи обогащенности тяжелым изотопом углерода марсианских образований носят локальный характер, им может быть дано объяснение в рамках земных аналогий. Соответствующие механизмы фракционирования изотопов как для магматических, так и для экзогенных образований известны.

Иное дело, если обогащенность тяжелым изотопом является планетарной характеристикой углерода Марса. Тот факт, что не только карбонатные образования, но и атмосферная CO_2 Марса, по-видимому, заметно обогащены тяжелым изотопом (по оценке [6] $\delta^{13}\text{C} = +36\%$), свидетельствует в пользу того, что обогащенность тяжелым изотопом углерода является глобальной характеристикой поверхностного резервуара углерода Марса.

Вряд ли углерод Марса изначально был столь обогащен тяжелым изотопом. Изотопный состав космического углерода дихотомичен: в тонко рассеянной элементной форме он обычно обогащен легким изотопом. Так, рассеянный углерод обыкновенных хондритов, ахондритов и железных метеоритов имеет $\delta^{13}\text{C}$ от -20 до -30% . В богатых же углеродом углистых хондритах углерод имеет $\delta^{13}\text{C}$ в среднем около $-5\ldots-10\%$. Эти же углистые хондриты содержат в небольшом количестве ($\sim 0.2\%$) карбонатный материал, обогащенный тяжелым изотопом ($\delta^{13}\text{C}$ от $+23.7$ до $+80.7\%$ [7]), а также зерна аномального тяжелого досолнечного углерода.

Эта дихотомия была унаследована первичным углеродом Земли [8]. Породы мантии содержат реликтовый углерод в том же диапазоне значений $\delta^{13}\text{C}$, что и обыкновенные хондриты ($\delta^{13}\text{C}$ от -20 до -30%), в то время как подвижный углерод в мантии, включая углерод алмазов ($\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -4.6\%$), а также средний углерод земной коры, аккумуляровавший углеродсодержащие продукты дегазации мантии ($\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -5\%$), имеют изотопный состав, приближающийся к изотопному составу углистых хондритов.

Обращаясь к Марсу, мы отмечаем, что углерод в минеральной матрице пород, представленных SNC-метеоритами ($\delta^{13}\text{C} = -20\ldots-30\%$ [9]), по

*Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского
Российской Академии наук, Москва*

изотопному составу вполне аналогичен углероду магматических пород Земли и рассеянному углероду хондритов.

В этой связи кажется логичным, что углерод в подвижных формах на Марсе, так же как на Земле и в углистых метеоритах, должен был бы иметь изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$) около -5% .

Если углерод в поверхностных резервуарах Марса имел первоначально "нормальный" изотопный состав $\delta^{13}\text{C} - 5\%$, должен был иметь место процесс существенного изотопного фракционирования, приведший к наблюдаемым высоким значениям $\delta^{13}\text{C}$ поверхностного углерода Марса.

Возможны несколько версий.

Процесс поглощения углекислоты сопровождается кинетическим изотопным эффектом, в результате которого остаточная углекислота обогащается тяжелым изотопом. Известно, что в полярных шапках происходит вымораживание углекислоты. Этот процесс может привести в принципе к обогащению CO_2 марсианской атмосферы изотопом ^{13}C до наблюдаемых значений. Основная масса углекислоты тогда должна находиться в конденсированной форме и иметь изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$), близкий к -5% . Доставка образца из полярных районов Марса имела бы решающее значение для проверки этой возможности.

Другая возможность связана с существованием первичной метановой атмосферы. Если метан является основным углеродсодержащим компонентом газовой системы, то изотопный состав его углерода будет близок к среднему изотопному составу углерода поверхностного резервуара. Тогда двуокись углерода окажется существенно обогащенной изотопом ^{13}C . Если углерод в виде метана, доминирующего в атмосфере, имеет $\delta^{13}\text{C}$ около -5% , то в равновесии с ним углерод CO_2 , в соответствии с температурной зависимостью $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ (рис. 1), приобретет значение $\delta^{13}\text{C} \approx +35\text{...}+40\%$ при температурах $140\text{--}160^\circ\text{C}$.

В свое время мы рассматривали вариант метановой атмосферы применительно к составу древней атмосферы Земли [12] и сделали вывод, что атмосфера Земли в течение геологической истории, представленной образцами докембрийских пород, никогда не была метановой. Однако это относилось к сравнительно поздней, хотя и древней атмосфере Земли. Нельзя исключить, что в первичной газовой оболочке планет, в самой ранней фазе их истории, когда формируется железное ядро, углерод присутствует в восстановленной форме, прежде всего в виде метана.

В дальнейшем метан окисляется до CO_2 , например вследствие реакции диспропорционирования: $4\text{FeO} \Rightarrow \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$, в результате которой, с одной стороны, наращивается металлическое ядро, а с другой – происходит окисление мантии и

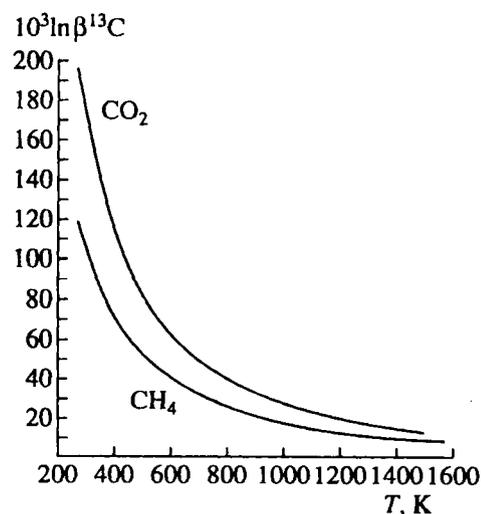


Рис. 1. Температурная зависимость $\beta^{13}\text{C}$ -фактора CO_2 [10] и CH_4 [11]. Фракционирование изотопов определяется $\Delta^{13}\text{C} = 10^3 \ln \beta_A^{13}\text{C} - 10^3 \ln \beta_B^{13}\text{C}$.

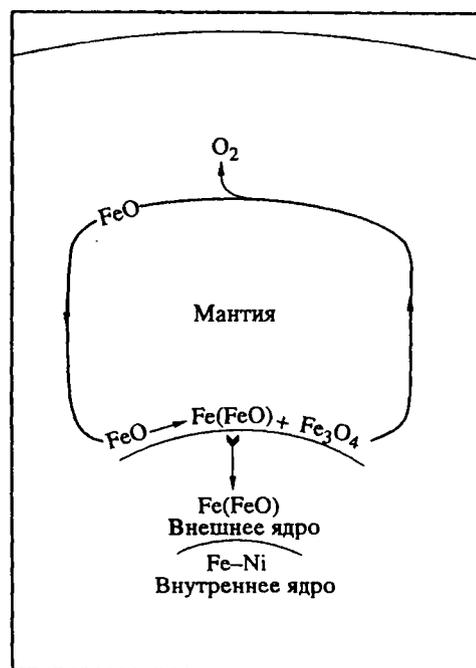


Рис. 2. Схема диспропорционирования FeO на границе ядра при конвективном движении планетной мантии. Процесс приводит, с одной стороны, к частичному переходу кислорода в ядро, а с другой – к последовательному окислению мантии. В результате первично восстановленная мантия в ходе геологической эволюции приобретает все более высокую фугитивность кислорода, а ядро обогащается легким компонентом, что объясняет его пониженную (по сравнению с чистым Fe-Ni -составом) плотность.

поверхностного резервуара [13] в соответствии со схемой на рис. 2. Фактически происходит процесс растворения FeO в металлическом железе, эффективность которого зависит от давления. При

100 кбар лишь 4 мол.% FeO растворяется в расплавленном железе, при 600 кбар растворимость составляет 52 мол.% [14].

Этот процесс прошел на Земле и на Венере. Но в случае Марса первичная метановая атмосфера могла избежать окисления (заметим, что ядро Марса существенно меньше земного и венерианского ядра) и, в конечном счете, была утрачена путем диссипации.

Таким образом, возможно, наблюдаемая обогащенность изотопом ^{13}C углерода Марса свидетельствует о присутствии ранней метановой атмосферы на этой планете. Возможно, что подобная восстановительная атмосфера была свойственна планетам, включая Землю, на аккреционной и ранней постаккреционной стадиях. Доставка образца марсианской атмосферы и прецизионный анализ изотопного состава углерода ее CO_2 имели бы решающее значение для разъяснения этой важной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McSween H.Y.* // *Meteoritics*. 1994. V. 29. P. 757–779.
2. *Jull A.T. et al.* // *Ibid.* P. 479.
3. *Galimov E.M.* // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1991. V. 55. P. 1697–1708.
4. *Romanek C.S. et al.* // *Nature*. 1994. V. 372. P. 655–657.
5. *Иванов М.В., Лейн А.Ю.* // *ДАН*. 1991. Т. 321. С. 1272–1276.
6. *Carr R.H., Grady M.M., Pillinger C.T.* // *Nature*. 1985. V. 314. P. 248–250.
7. *Grady M.M. et al.* // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1988. V. 52. P. 2855–2866.
8. *Галимов Э.М.* Геохимия стабильных изотопов. М.: Недра, 1968. 226 с.
9. *Wright I.P., Grady M.M., Pillinger C.T.* // *Nature*. 1989. V. 340. P. 220–222.
10. *Polyakov V.B., Kharlashina N.N.* // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1995. V. 59. № 12. P. 2561–2572.
11. *Richet P., Bottinga Y., Javoy M.* // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1977. V. 5. P. 65–110.
12. *Галимов Э.М., Прохоров В.С., Кузнецова В.И.* // *Геохимия*. 1968. № 11. С. 1376–1381.
13. *Галимов Э.М.* В сб.: Основные направления геохимии. М.: Наука, 1995. С. 8–43.
14. *Ringwood A.E.* *Origin of the Earth and Moon*. N.Y.: Springer, 1975. 295 p.