



[yandex.ru](http://yandex.ru)

## Влияние космических лучей на изотопную поверхность Марса.



Г.И.Васильев<sup>1</sup>, А.К.Павлов<sup>1,2</sup>, В.М.Остряков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

<sup>2</sup>СПбГПУ

Продолжительное воздействие галактических и солнечных космических лучей на вещество поверхности Марса при малой толщине его атмосферы приводит к заметному изменению изотопного состава некоторых химических элементов. Если раньше об изотопном составе можно было судить только по марсианским метеоритам, то теперь в рамках проекта Curiosity выполнен анализ образцов из кратера Гэйла [1]. Мы представляем результаты расчётов скоростей образования  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  и  $^{36}\text{Ar}$  и сравниваем их с измерениями. Показано, что в предположении постоянства спектра и среднего потока КЛ экспозиционная доза, необходимая для объяснения экспериментальных данных при современных условиях накапливается всего за 160-220 млн. лет. Тогда как калий-аргоновый метод даёт возраст образцов  $4.21 \pm 0.35$  млрд. лет. Наилучшее согласие с наблюдаемыми изотопными отношениями получено для поверхностного слоя грунта. Выдвинута гипотеза о наличии слоя воды не менее 8-10 м и/или плотной атмосферы в предшествующий облучению период эволюции Марса.

## Метод

Рассматриваемые нами изотопы образуются в различных ядерных реакциях.  $^3\text{He}$  образуется в результате ядерных каскадов и испарении возбужденного остаточного ядра. Так же он образуется при распаде  $^3\text{H}$  (рассматриваемые нами промежутки времени позволяют считать его полностью распавшимся).  $^{21}\text{Ne}$  – остаточный продукт ядерных реакций высокоэнергетичных частиц с более тяжёлыми нуклидами.  $^{36}\text{Ar}$  – в основном результат поглощения тепловых нейтронов  $^{35}\text{Cl}$  с образованием радиоактивного изотопа  $^{36}\text{Cl}$  и последующим распадом в  $^{36}\text{Ar}$ .

Современная атмосфера Марса полностью поглощает протоны с энергией менее 100 МэВ, поэтому можно считать, что большая часть СКЛ не оказывает влияние на изменение химического и изотопного состава. Нами использовались спектры протонов и альфа-частиц для периода ноябрь-декабрь 2006 г., полученные в эксперименте ПАМЕЛА [2,3]. При моделировании развития ядерного каскада и образования изотопов применялся пакет GEANT4 [3]. Состав и высотный профиль марсианской атмосферы из [5]. Более подробно методика описана в работах [6,7]. Химический состав грунта из [1].

## Результаты

На рис.1 представлена зависимость от глубины грунта скоростей образования космогенных изотопов. Наши данные сравниваются с расчетами работы [1]. Различия в 1.9-3 раза может обуславливаться несколькими причинами. В работе [1] в вычисления используются данные о потоках тепловых нейтронов для  $^{36}\text{Ar}$  и потоках нейтронов с энергиями более 10 МэВ для  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ . Эти потоки измерялись по дефициту и избытку некоторых изотопов в метеоритах. При этом не учитывались другие частицы ядерного каскада и зависимость самих

потоков нейтронов от конкретного химического состава. Другой возможной причиной может быть отличие используемого нами спектра ГКЛ от их среднего значения за рассматриваемые промежутки времени. В наших расчетах экспозиционная доза накапливается за 160-220 млн. лет.

На рис.2 показана зависимость от глубины грунта отношений скоростей образования изотопов и приведены экспериментальные данные Curiosity.

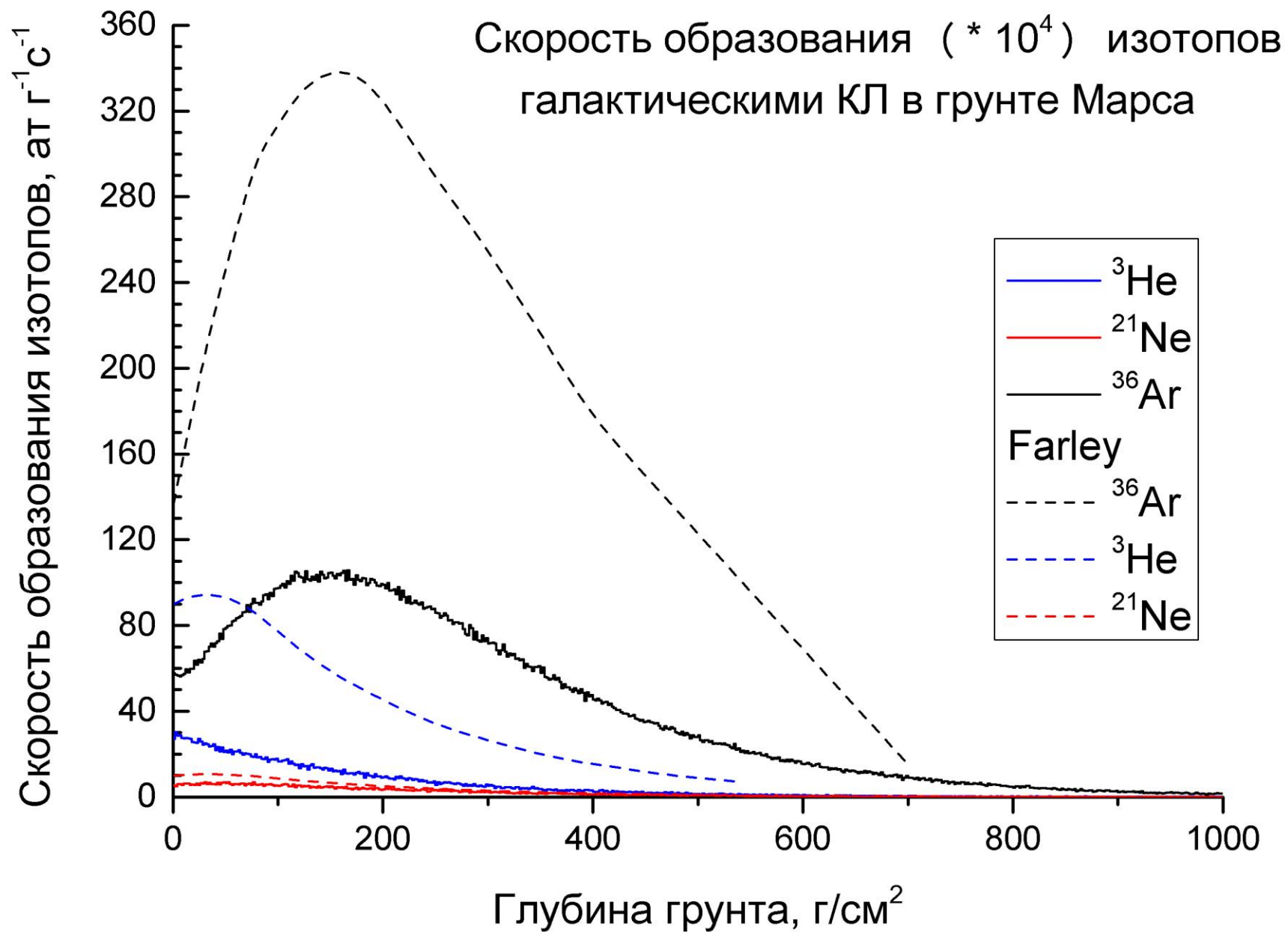
Видно, что измеренные в эксперименте изотопные отношения могут образоваться не глубже нескольких верхних сантиметров грунта. Нами выполнены аналогичные вычисления для различной массы атмосферы Марса или (и) с водным покрытием поверхности. Толща атмосферы, превышающая современную в 50 раз, ослабляет скорость образования изотопов в 25раз. Слой воды (льда) толщиной  $\leq 10$  м уменьшает скорость образования в 115 раз.

## **Выводы**

- 1) Наблюдаемые в экспериментах миссии Curiosity концентрации изотопов  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  и  $^{36}\text{Ar}$  могут быть получены за счет облучения ГКЛ поверхностного слоя марсианского грунта не глубже нескольких сантиметров.
- 2) Время накопления составляет  $\sim 200$  млн. лет, что в 20 раз меньше времени образованию породы по K/Ar методу.
- 3) Полученное противоречие может быть объяснено в рамках гипотезы существования водяного слоя  $\sim 10$  м и (или) наличия плотной атмосферы в течение большей части времени существования Марса.

## Литература

1. A. Farley et al. In Situ Radiometric and Exposure Age Dating of the Martian Surface. *Science* **343**, 2014.
2. Adriani O et al. PAMELA Measurements of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra. *Science*, **332**, 6025 p 69, 2011.
3. Adriani, O et al. Time dependence of the proton flux measured by pamepla during the 2006 july-2009 december solar minimum. *Astrophys. J.*, **765**, 2, 2013.
4. <http://geant4.cern.ch>
5. Lodders K. and B. Fegley 1998, *The planetary scientist's companion*, Oxford University Press New York.
6. Pavlov A. A. et al. Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays, *Geophys. Res. Lett.* **39** (L13202), 2012.
7. Pavlov A. A. et al. Alteration of the carbon and nitrogen isotopic composition in the Martian surface rocks due to cosmic ray exposure. *J. Geophys. Res. Planets* **119**, 1390, 2014.





# Отношение скоростей образования изотопов в грунте Марса галактическими космическими лучами

