

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПЛАНЕТНОГО ГРУНТА ПО СПЕКТРОСКОПИИ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ ПРИ УПРУГОМ РАССЕЯНИИ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Б.Н.Корчуганов¹, Г.Г.Дольников¹, М.В.Герасимов¹, О.Ф.Прилуцкий¹, Р.Ридер²,
 Г.Венке², Т.Эконому³

¹Институт космических исследований РАН, GSP-7, 117997 Москва Профсоюзная ул. 84/32

²Институт химии Макса Планка, Postfach 3060, D-55020 Mainz, Germany;

³Институт Энрико Ферми Чикагского университета, 933 East 56th Street, Chicago, IL 60637.

Введение. Результаты, полученные при изучении состава лунного и марсианского грунта альфа-протонным спектрометром (АРХ) на аппаратах “Surveyor” [1] и “Mars Pathfinder” [2], показали высокую эффективность *in situ* методов, основанных на использовании радиоактивных источников альфа-частиц и современных полупроводниковых детекторов.

Однако методы элементного анализа на основе обратного рассеяния альфа-частиц, используемые в АРХ-спектрометре, не позволяют определять водород и его изотопы, которые могут присутствовать в породах поверхности планет. Измерение содержания водорода важно для таких главных проблем в исследовании планет, как поиск воды на планетах, обнаружение органических соединений, исследование степени восстановленности пород, и т.д. — что является одной из главных целей в большинстве космических миссий.

Тем не менее, количественно определить водород *in situ* в поверхностном слое грунта вполне реально путем небольшой трансформации геометрии АРХ-спектрометра, если использовать рассеянные в прямом направлении протоны отдачи, участвующие в процессе упругого рассеяния альфа-частиц на ядре водорода или его изотопов. Аналогичный метод использовался в лабораторных условиях на ускорителях [3] для определения водорода в поверхностных слоях различных образцов.

Метод. Определение концентрации водорода и дейтерия в поверхностных слоях планетных тел основан на спектрометрии протонов и дейтронов отдачи, рассеянных в переднем направлении в процессе упругого взаимодействия альфа-частиц с ядрами изотопов водорода. Согласно законам сохранения, энергия частицы отдачи E в координатной системе, где начальная энергия альфа-частицы равна E_0 , а ядро изотопа водорода находится в покое, описывается следующим выражением:

$$E = E_0 \frac{4 m_0 m}{(m_0 + m)^2} \cos^2(\theta), \quad (1)$$

где m_0 и m массы альфа-частицы и водородного ядра соответственно, а θ - угол между вектором скорости альфа-частицы и частицы отдачи. При энергии альфа-частиц 5,8 МэВ и угле рассеяния близком к нулю (рассеяние вперед) максимальная энергия протонов и дейтронов отдачи, в соответствии с формулой (1), составит соответственно 3,7 и 5,1 МэВ. Зависимость максимальной энергии протонов и дейтронов от угла рассеяния θ показана на рис.1.

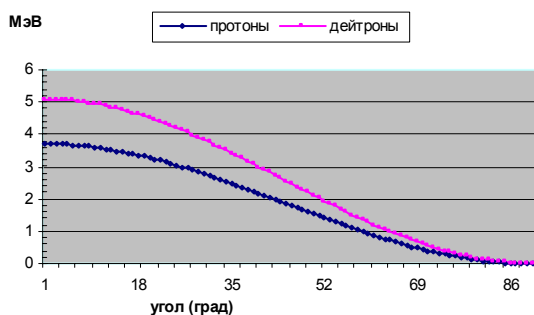


Рис.1. Зависимость максимальной энергии протонов и дейтронов от угла рассеивания.

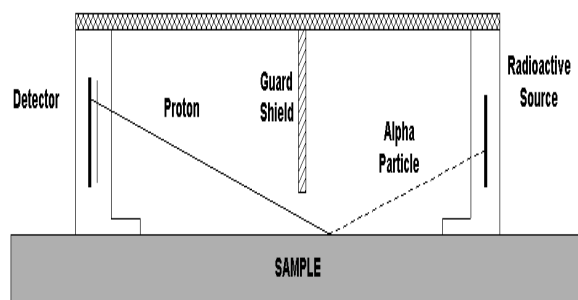


Рис.2 Схема регистрации спектров протонов отдачи, рассеянных в переднем направлении.

Действующая экспериментальная модель спектрометра водорода состояла из блока детекторов APX-спектрометра, разработанного для проекта “Марс-96”, трех радиоактивных источников ^{244}Cm общей активностью ~ 12 мКи и электронного блока. Источники и детектор были расположены в геометрии, показанной на Рис.2. Эффективная толщина поверхностного слоя, в котором измеряется концентрация водорода, составляет $\sim 5\div 20$ мкм и зависит от плотности и атомного веса среды со сложным химическим составом.

Результаты. С помощью такой экспериментальной установки были получены протонные спектры образцов с различным содержанием водорода (рис.3,4) и определена интенсивность счета протонов, рассеянных вперед. Во всех вычислениях концентрации водорода порошок гидрокарбоната калия (KHCO_3), имеющий 1 вес.% водорода был использован в качестве эталона. Все измерения обеспечены хорошей статистикой ($\sigma \sim 1\%$ в большинстве случаев). Для защиты от электромагнитных помех спектры дискриминированы по уровню энергии 1,5 МэВ.

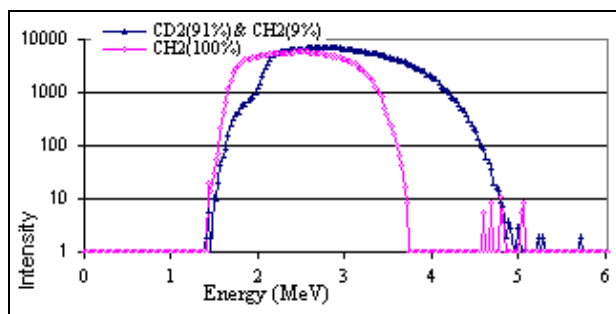


Рис.3. Спектры протонов и дейтронов, рассеянных в переднем направлении, для H- и D-полиэтилена.

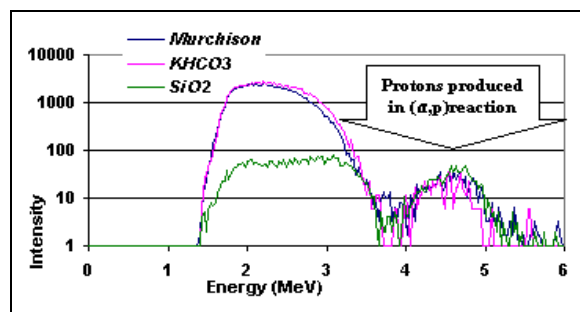


Рис.4 Спектры протонов отдачи, рассеянных вперед для метеорита *Murchison* и двух стандартных образцов.

Обсуждение результатов. Спектры чистого и дейтерированного полиэтилена (Рис.3) показывают хорошее соответствие теоретическим расчетам измеренных значений максимальной энергии протонов и дейтронов отдачи, а разница максимальных энергий в 1,16 МэВ позволяет надежно измерять отношение водорода к дейтерию в широком диапазоне концентраций.

Протонные спектры (рис.4) различных образцов – метеорита *Murchison*, порошка гидрокарбоната калия и диоксида кремния (кварцевое стекло) показывают, что положение максимума энергии протонов отдачи одинаково как для кристаллических, так и для порошкообразных мишеней и составляет $\sim 3,7$ МэВ, как и для полиэтилена. Спектральная интенсивность протонов в диапазоне энергий 1,4÷3,7 МэВ определяется только содержанием водорода в образцах: *Murchison* - 1 вес.%, KHCO_3 - 1 вес.%, $\text{SiO}_2 < 0.036$ вес.%. Распределение протонов, порождаемых (α, p) -реакцией не превышает 0,1% от общей интенсивности в интересующем нас диапазоне энергий.

Выводы. Для марсианского грунта измерения наземными телескопами и космическими аппаратами, включая измерения газового хроматографа и масс-спектрометра на посадочных модулях *Viking 1,2*, а также последние данные прибора *HEND* миссии *Марс-Одиссей*, показывают, что содержание кристаллической воды в поверхностных слоях достигает одного весового процента, а в некоторых районах Марса даже превышает это количество [4,5]. Предлагаемый метод измерения водорода для APX-спектрометра с учетом определения им остальных химических элементов, позволяет количественно измерять содержание воды в поверхностном слое Марса компактным прибором (массой и размерами на порядок меньшими, чем газовый хроматограф или масс-спектрометр), а также отношение H/D (при концентрациях дейтерия в породах выше 0,01 вес.%).

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (по проекту № 00-348)

Литература

- [1] *Economou T. et al.*, J. Geophys. Res., v. 75, (1970). p.6514.
- [2] *Rieder R. 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, v.278 (1997) p.1771-1774.
- [3] *Tirira J. et al.*, Theoretical and experimental studies of low-energy alpha-induced proton elastic recoil, Nucl.Instr.Meth., v.B45 (1990) p.203.
- [4] *Moroz V.*, The infrared spectrum of Mars (1.1-4.1 mkm). *Soviet Astron.* (1964) 8:273-281.
- [5] *Bibring J. et al.*, ISM observations of Mars and Phobos: First results. *Lunar Planet. Sci. Conf.* (1990) 20:461-471.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(21) 2003

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2003 года (ЕСЭМПГ-2003)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/planet-8.pdf

Опубликовано 15 июля 2003 г.

© Отделение наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2003

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна