

**И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин, Д. И. Лисов, А. С. Козырев** Цикл статей «Изучение содержания воды и хлора в грунте различных геологических районов кратера Гейл по данным эксперимента ДАН на борту марсохода НАСА Кьюриосити»

Аннотация

**Авторы:**

И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин, Д. И. Лисов, А. С. Козырев

**Название цикла статей:**

*«Изучение содержания воды и хлора в грунте различных геологических районов кратера Гейл по данным эксперимента ДАН на борту марсохода НАСА Кьюриосити»*

**Ссылки на публикации:**

1. “Hydrogen and chlorine abundances in the Kimberley formation of Gale crater measured by the DAN instrument on board the Mars Science Laboratory Curiosity rover”, M.L. Litvak, I.G. Mitrofanov, C. Hardgrove, K.M. Stack, A.B. Sanin, D. Lisov, W.V. Boynton, F. Fedosov, D. Golovin, K. Harshman, I. Jun, A.S. Kozyrev, R.O. Kuzmin, A. Malakhov, R. Milliken, M. Mischna, J. Moersch, M. Mokrousov, S. Nikiforov, R. Starr, C. Tate, V.I. Tret'yakov, A. Vostrukhin, **Journal of Geophysical Research: Planets**, Volume 121, Pages 836–845, 2016, doi:10.1002/2015JE004960
2. “Активное нейтронное зондирование вещества поверхности Марса в эксперименте ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити»: два типа грунта в кратере Гейл с разным содержанием воды”, И.Г. Митрофанов, А.С. Козырев, Д.И. Лисов, А.А. Вострухин, Д.В. Головин, М.Л. Литвак, А.В. Малахов, М.И. Мокроусов, С.Ю. Никифоров, А.Б. Санин, **Письма в Астрономический Журнал**, том 42, No 4, с. 285–293, 2016, doi:10.7868/S0320010816040057
3. “Water equivalent hydrogen estimates from the first 200 sols of Curiosity’s traverse (Bradbury Landing to Yellowknife Bay): Results from the Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) passive mode experiment”, C.G. Tate, J. Moersch, I. Jun, D.W. Ming, I. Mitrofanov, M. Litvak, A. Behar, W.V. Boynton, L. Deflores, D. Drake, B. Ehresmann, F. Fedosov, D. Golovin, C. Hardgrove, K. Harshman, D.M. Hassler, A.S. Kozyrev, R. Kuzmin, D. Lisov, A. Malakhov, R. Milliken, M. Mischna, M. Mokrousov, S. Nikiforov, A.B. Sanin, R. Starr, A. Varenikov, A. Vostrukhin, C. Zeitlin, **Icarus**, Volume 262, Pages 102–123, 2015, doi:10.1016/j.icarus.2015.09.002
4. “Data processing of the active neutron experiment DAN for a Martian regolith investigation”, A.B. Sanin, I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, D.I. Lisov, R. Starr, W. Boynton, A. Behar, L. DeFlores, F. Fedosov, D. Golovin, C. Hardgrove, K. Harshman, I. Jun, A.S. Kozyrev, R.O. Kuzmin, A. Malakhov, R. Milliken, M. Mischna, J. Moersch, M.I. Mokrousov, S. Nikiforov, V.N. Shvetsov, C. Tate, V.I. Tret'yakov, A. Vostrukhin, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, Volume 789, Pages 114–127, 2015, doi:10.1016/j.nima.2015.03.085

**Общая формулировка научной проблемы и её актуальность:**

Исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что вода не только играла важную роль в эволюции Марса, но и по настоящее время является существенным компонентом природной среды на поверхности Марса. Изучение ее содержания в марсианском грунте позволяет делать выводы о характере и хронологии эволюции поверхности. Кроме того, содержание воды существенно с точки зрения поисков внеземной жизни, так как наличие существенного количества воды считается необходимым условием для существования жизни.

**Конкретная решаемая в работе задача и её значение:**

Представленный цикл работ посвящен изучению состава и структуры марсианского грунта в кратере Гейл на глубинах в десятки сантиметров под поверхностью путем нейтронного зондирования и мониторинга, выполняемых прибором ДАН, входящим в состав миссии Mars Science Laboratory на борту марсохода «Кьюриосити». Информация о химическом составе и слоистой структуре грунта на указанном масштабе глубин существенна для построения моделей эволюции кратера Гейл и не может быть получена другими методами.

**Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

Результаты, представленные в работах цикла, получены методом активного нейтронного зондирования поверхности Марса и пассивного мониторинга нейтронного фона. Благодаря высокой проникающей способности нейтронного потока от импульсного генератора прибора ДАН и космических лучей, нейтронное зондирование и мониторинг позволяют

измерять содержание замедлителей нейтронов (в первую очередь воды) и поглотителей нейтронов, а также детектировать слоистую структуру грунта, в объеме, содержащем около десяти тонн вещества, а по глубине достигающей до одного метра, в отличие от точечных измерений на поверхности. Этот подход хорошо зарекомендовал себя в земных условиях при разработке нефтяных скважин. В эксперименте ДАН в рамках проекта Mars Science Laboratory данный метод был впервые использован в марсианских условиях.

#### **Полученные результаты и их значимость:**

В статье [1] производится анализ данных активного нейтронного зондирования грунта в области Кимберли кратера Гейл. Были произведены измерения в точках, принадлежащих к разным геологическим слоям, определено содержание воды и эквивалентного хлора в точках измерений и обнаружены их существенные вариации. Также в области Кимберли было проведено сопоставление результатов измерений ДАН с результатами измерений приборов SAM и APXS, показывающее хорошее согласие между измерениями разных приборов.

Статья [2] содержит результаты анализа активного нейтронного зондирования грунта прибором ДАН на первых 11 км пути марсохода «Кюросити». Были изучены состав и структура грунта в 412 районах, в результате чего был сделан вывод о существовании двух различных типов грунта. Большая часть измерений относится к районам с высоким содержанием воды, в которых содержание воды около поверхности составляет примерно 2% и с ростом глубины либо существенно возрастает на глубинах 10—50 см, либо остается неизменной вплоть до предела чувствительности прибора. Меньшая часть районов вошла в группу с низким содержанием воды, в которой содержание воды на поверхности также близко к 2%, но уменьшается до 1% на глубинах 5—20 см. Также для этих групп районов значимо отличаются оценки содержания хлора. При этом районы с низким содержанием воды распределены вдоль трассы неравномерно, и их относительная доля меняется от 3% до 28%.

Статья [3] основана на пассивном мониторинге нейтронного потока, обусловленного галактическими космическими лучами, в первые 200 марсианских дней работы марсохода. Полученные оценки содержания воды варьируются от 0.5% до 4% на стоянках «Кюросити» и до 7.6% в промежуточных точках его движения. Они хорошо согласуются как с результатами активного зондирования на стоянках, так и с геологическими моделями, построенными командой MSL, и демонстрируют существенные различия по содержанию воды между разными типами поверхности на больших пространственных масштабах.

Статья [4] носит методический характер и представляет собой детальное описание алгоритмов, применяемых при обработке данных активных нейтронных измерений прибора ДАН для компенсации краткосрочных и долгосрочных изменений эффективности нейтронного генератора и детекторов, а также типов рассматриваемых моделей структуры и состава грунта и алгоритмов оценки параметров грунта на основе статистического моделирования распространения нейтронов в грунте методом Монте-Карло.