

## **Аннотация к циклу научных статей**

**1. Авторы:** И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, М. В. Дьячкова, С. Ю. Никифоров, Д. И. Лисов, А. Б. Санин

**2. Название цикла:** Новые сведения о природной среде в марсианском кратере Гейл, полученные на основе данных первого каталога эксперимента ДАН за десятилетний период работы на борту марсохода НАСА «Кьюриосити»

### **3. Ссылки на публикации:**

[1] Mitrofanov, I. G., Nikiforov, S. Y., Djachkova, M. V., Lisov, D. I., Litvak, M. L., Sanin, A. B., & Vasavada, A. R. Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127, e2022JE007327 <https://doi.org/10.1029/2022JE007327>

[2] Djachkova M. V., Mitrofanov I. G., Nikiforov S. Y., Lisov D. I., Litvak M. L., Sanin A. B. Testing Correspondence between Areas with Hydrated Minerals, as Observed by CRISM/MRO, and Spots of Enhanced Subsurface Water Content, as Found by DAN along the Traverse of Curiosity. *Advances in Astronomy*, vol. 2022, Article ID 6672456, 10 pages, 2022 <https://doi.org/10.1155/2022/6672456>

[3] Litvak, M. L., Mitrofanov, I. G., Gellert, R., Djachkova, M. V., Lisov, D. I., Vasavada, A. R., & Czarnecki, S. Depth distribution of chlorine at Gale crater, Mars, as derived from the DAN and APXS experiments onboard the Curiosity rover. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128, e2022JE007694 <https://doi.org/10.1029/2022JE007694>

[4] Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L., Sanin, A.B., Semkova, I. V. & Dachev, Ts. P. Estimation of the Neutron Component of the Radiation Background in the Gale Crater on Mars. *Solar System Research*, 2023, 57, 191–199 <https://doi.org/10.1134/S0038094623030073>

**4. Общая формулировка научной проблемы и её актуальность:** Эксперимент ДАН (от англ. Dynamic Albedo of Neutrons) проводится с 9 августа 2012 года в кратере Гейл на поверхности Марса с борта марсохода НАСА «Кьюриосити» в целях изучения трехмерной картины (по глубине и вдоль трассы движения марсохода) распределения воды в верхних слоях грунта Марса. Анализ получаемых данных и их сопоставление с данными других экспериментов дают представление о процессах формирования и эволюции природной среды в кратере Гейл и предоставляют важную информацию для планирования будущих, в том числе пилотируемых, экспедиций на Марс.

**5. Конкретные решенные в цикле статей задачи и их значение:** С августа 2012 года марсоход «Кьюриосити» прошел свыше 30 километров по поверхности Марса. За это время был проведен значительный объем измерений по нейтронному зондированию вещества поверхности в рамках эксперимента ДАН. Интерпретация, каталогизация и анализ полученных результатов, включая совместный анализ с данными других приборов, позволили решить следующие основные задачи:

(1) Построить карту распределения воды и хлора на протяжении пройденного марсоходом пути и представить ее научной общественности в открытом доступе, в виде систематизированного каталога [1];

(2) Обнаружить корреляцию массовой доли подповерхностной воды с распределением гидратированных минералов [2];

(3) Определить распределение хлора по глубине в подповерхностном слое Марса и связать его с процессами формирования современного облика кратера Гейл [3];

(4) Оценить вклад нейтронной составляющей естественного радиационного фона как на дне кратера Гейл вдоль маршрута марсохода «Кьюриосити», так и на орбите на высоте 400 км над этим кратером [4].

Решение указанных задач важно для установления геологической истории Марса, определения возможности существования жизни на ранней стадии его эволюции, а также для подготовки будущих пилотируемых экспедиций в части радиационной безопасности.

**6. Используемый подход, его новизна и оригинальность:** Российский прибор ДАН является первым в истории космических планетных исследований активным нейтронным спектрометром, работающим на поверхности другого небесного тела. В его состав входит искусственный источник нейтронов (импульсный нейтронный генератор или ИНГ) для зондирования грунта под марсоходом

короткими импульсами высокоэнергичных нейтронов и блок регистрации динамического альbedo отраженных нейтронов от марсианского грунта, которое сильно зависит от распределения в нем водорода/воды и породообразующих элементов (прежде всего хлора и железа) с большим сечением поглощения нейтронов.

Данные измерений, полученные в результате измерений прибора ДАН, начиная с момента посадки в августе 2012 года, были проанализированы с применением методов численного моделирования, преобразованы в оценки массовой доли воды и хлора, систематизированы для территорий с различной геологией и обобщены в рамках единого каталога [1]. В каталоге результаты наблюдений представлены попиксельно в виде карты, покрывающей территорию, по которой двигался и которую исследовал марсоход за 10 лет своей работы на поверхности Марса.

Сравнительный анализ водного эквивалента водорода по измерениям ДАН и данных спектрометра CRISM на борту космического аппарата MRO [2] позволил сопоставить распределение полигидратированных минералов, обнаруженных с орбиты на поверхности кратера Гейл, с изменениями содержания подповерхностной воды в слое толщиной около 1 метра.

В статье [3] впервые проведено детальное сопоставление результатов измерений ДАН и данных измерений также установленного на борту марсохода «Кьюриосити» рентгеновского и альфа спектрометра APXS (Alpha Particle X-Ray Spectrometer), полученных в точках бурения марсианской поверхности, что позволило сделать выводы о распределении содержащегося в ней хлора по глубине.

Проведено численное моделирование [4], позволившее оценить в кратере Гейл вклад нейтронной компоненты радиационного фона, понять ее зависимость от содержания воды, измеренной прибором ДАН, и сравнить ее с данными измерений дозиметра RAD (Radiation Assessment Detector), также установленного на борту марсохода «Кьюриосити».

**7. Полученные результаты и их значимость:** Обнаружено [1], что содержание водорода, выраженное как водный эквивалент водорода, в кратере Гейл может варьироваться от полного нуля для практически сухого грунта до максимума в  $\sim 6$  мас.%. При этом было показано, что содержание основных породообразующих элементов с большими сечениями поглощения нейтронов (Cl, Fe, Ti, S), выраженное в эквивалентном содержании хлора, варьируется от нуля до  $\sim 3$  мас.%. Высказано предположение, что измеренные значительные вариации содержания воды и хлора в грунте вдоль пути марсохода связаны с различиями в процессах формирования современной поверхности в отдельных областях кратера Гейл.

Показано, что в районах на дне кратера Гейл, на поверхности которых присутствуют полигидратированные сульфаты, в приповерхностном слое грунта толщиной около 1 м наблюдается значимое увеличение массовой доли воды [2]. Этот факт указывает на то, что породы, содержащие полигидратированные сульфаты, присутствуют не только на поверхности, но и достаточно большой глубине. Относительно большая толщина слоя гидратированных осадочных пород предполагает длительные процессы испарения воды. Этот результат [2] подтверждает гипотезу о присутствии жидкой воды на поверхности Марса в течение ранних эпох его геологической истории и позволяет проследить особенности формирования и эволюции поверхности кратера Гейл на всем протяжении его существования.

Указанный выше вывод хорошо согласуется с другим результатом цикла [3], что хлор в грунте кратера Гейл представлен в виде двух компонентов - тонкого (десятки микрон) поверхностного слоя, характеризующегося относительно высокой концентрацией хлора (1,2–1,3 мас.%), и подповерхностного слоя с толщиной около  $\sim 0,5$  м, для которого характерна более низкая 0,8–0,9 мас.% концентрация этого элемента. Высказано предположение, что первый компонент обусловлен поздними эоловыми отложениями, а второй сформировался в ходе активных гидрологических процессов, имевших место в удаленные периоды эволюции поверхности кратера Гейл.

Установлено [4], что эффективная мощность дозы нейтронов на дне кратера Гейла составляет около 100 мкЗв/сут и вносит около 10% в общую дозу, учитывающую также вклад галактических и солнечных космических лучей. Показано, что толщины атмосферы Марса достаточно, чтобы эффективно отражать нейтроны, родившиеся в верхних слоях грунта. Из-за многократных отражений поток нейтронов через поверхность увеличивается и, следовательно, существенно увеличивается и доза нейтронов.

Основной вклад в полную дозу вносят нейтроны очень высоких энергий из-за их высокой поражающей способности. Тем не менее вклад нейтронов в диапазоне ниже 10–15 МэВ также значителен.

Поток нейтронов в этом диапазоне сильно зависит от содержания воды в марсианском грунте. Поэтому мощность эффективной дозы нейтронов существенно варьируется при продвижении марсохода в районах с низким содержанием воды и в районах, где согласно [1] оно достигает максимальных значений.