

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



ИКИ РАН

А.А. Петрукович

2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований  
Российской академии наук

Диссертация «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кюриосити» выполнена в отделе «Ядерной планетологии» Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Никифоров Сергей Юрьевич работал в ИКИ РАН в должности научного сотрудника.

В 2014 г. С. Ю. Никифоров окончил очную аспирантуру Института космических исследований РАН. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук, Митрофанов Игорь Георгиевич, заведующий отделом «Ядерной планетологии» в ИКИ РАН;

По результатам рассмотрения диссертации «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кюриосити» принято следующее заключение:

### **Актуальность темы и направление исследования.**

Исследования планет Солнечной системы при помощи космических аппаратов позволяют получить уникальные и всесторонние знания об эволюции планет и условиях их формирования. Особый интерес вызывает планета Марс, которая в прошлом имела сходные условия с ранней Землей. Ранний Марс обладал плотной атмосферой, сильным магнитным полем и наличием водных резервуаров на поверхности. Согласно современным представлениям, основная масса ранней марсианской атмосферы рассеялась в космическое пространство, а большая часть его исходной воды испарилась.

Таким образом, диссертация Никифорова Сергея Юрьевича «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кюриосити», связанная с гидрологической разведкой на Марсе, соответствует актуальным целям космических исследований планеты. Исследовательские задачи миссии марсохода НАСА «Кюриосити» направлены на подтверждение наличия на раннем Марсе природных условий, необходимых для возникновения и поддержания примитивной жизни. Учитывая, что вода является одним из ключевых таких условий, на борту марсохода установлен прибор Динамическое Альbedo Нейтронов (ДАН), который является первым космическим прибором, использующим методы нейтронного каротажа для оценки распределения воды в составе вещества на Марсе.

Предметом исследования данной работы является разработка и реализация метода оценки содержания воды в приповерхностном слое вещества Марса на основе измерений научным прибором ДАН. Этот метод применяется для оценки распространенности воды в реголите Марса

на дне кратера Гейл вдоль трассы движения марсохода НАСА «Кьюриосити» на основе анализа данных измерений прибора в режиме мониторинга нейтронного излучения поверхности Марса.

Исследования в рамках диссертационной работы были проведены по теме «Освоение» (№ 122042500014-1) в отделе «Ядерной планетологии» Института космических исследований РАН.

#### **Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации**

Все работы, описанные в данной диссертации, проведены либо лично автором:

Автор оценил компоненту фоновое нейтронное излучения на поверхности Марса от РИТЭГ на основе данных калибровочных измерений, выполненных на территории США совместно с американскими участниками эксперимента ДАН [см. СН1].

Автор принимал участие в разработке метода для оценки массовой доли воды на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности, предложенного в [см. СН2 – СН4]. На основе проведенного критического анализа предложенного метода, автором был разработан более эффективный и достоверный способ оценки массовой доли воды, который сейчас используется в эксперименте ДАН [см. СН5].

Автор провел обработку данных мониторинга собственного нейтронного излучения Марса прибором ДАН, выполнил привязку измерений к координатам на поверхности и построил пространственный профиль переменности потока с разрешением 3 метра вдоль всей трассы движения марсохода [см. СН5].

Автор получил оценки содержания воды в веществе приповерхностного слоя планеты вдоль всей трассы движения марсохода с разрешением 3 метра от места посадки до отметки расстояния 27 км. Им были обнаружены участки на трассе с минимальным и максимальным содержанием воды в реголите [см. СН5, СН6].

#### **Степень достоверности результатов проведенного исследования**

В рамках представленного исследования были получены результаты оценки массовой доли воды для участков поверхности Марса на основе данных измерений нейтронного альbedo прибором ДАН. Данные результаты были сопоставлены с аналогичными оценками, независимо полученными для этих же участков на основе данных активного нейтронного зондирования с использованием импульсного нейтронного генератора. Сравнение показало хорошее согласие между этими оценками, что подтверждает высокую достоверность полученных результатов.

Результаты, представленные в диссертации, прошли достаточно детальную апробацию. Эти результаты докладывались лично автором на семинарах отдела Ядерной планетологии ИКИ РАН, Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, а также на следующих российских и международных конференциях и симпозиумах:

- Lunar and Planetary Science Conference, USA (2015 - 2023);
- European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria (2016 - 2021);
- Конференция Молодых Ученых, ИКИ РАН, Москва, Россия (2013 – 2023);
- Moscow Solar System Symposium, ИКИ РАН, Москва, Россия (2016 - 2022);
- European Planetary Science Congress, Berlin, Germany (2018, 2020);
- COSPAR Scientific Assembly (2014, 2018, 2022);
- American Geophysical Union, Fall Meeting, California, USA (2014, 2015);
- International Conference on Mars, Pasadena, California, USA (2014).

#### **Научная новизна полученных результатов**

Конкретные элементы научной новизны представленного диссертационного исследования состоят в следующем:

- 1) Впервые получены оценки потока собственного нейтронного излучения поверхности Марса на дне кратера Гейл под воздействием галактических космических лучей и радиоизотопного генератора на борту марсохода.
- 2) На основе анализа данных измерений прибора ДАН Никифоровым обнаружены районы с максимально высоким содержанием воды в реголите вдоль трассы движения марсохода. Так, в окрестности района хребта Vera Rubin массовая доля воды составляет  $(6,34 \pm 0,68) \%$ .
- 3) Впервые построен пространственный профиль содержания воды в веществе Марса вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км.

### **Научная и практическая значимость результатов исследования**

Представленное исследование является частью программы международного сотрудничества Государственной корпорации «Роскосмос» с НАСА в рамках Федеральной космической программы.

Полученные в диссертационной работе результаты имеют значительную научную и практическую значимость:

Во-первых, оценки содержания воды в реголите вдоль трассы движения марсохода, полученные в ходе исследования, доступны в открытом доступе на официальном сайте отдела «Ядерной планетологии» (<https://np.cosmos.ru/>) и в научном архиве «Zenodo» (DOI: 10.5281/zenodo.6974535). Это позволяет любому заинтересованному участнику космических исследований использовать эти данные для дальнейшего анализа.

Во-вторых, успешный опыт получения и обработки экспериментальных данных мониторинга нейтронного излучения поверхности Марса прибором ДАН будет способствовать разработке концепции перспективных ядерно-физических экспериментов на борту мобильных исследовательских аппаратов на поверхности Марса.

### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

[CH1] Jun, I., Mitrofanov, I. G., Litvak, M. L., **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. Neutron background environment measured by the Mars Science Laboratory's Dynamic Albedo of Neutrons instrument during the first 100 sols // *Journal of Geophysical Research: Planets* – 2013 – 118(11) – 2400–2412. <https://doi.org/10.1002/2013JE004510>

[CH2] Tate, C. G., Moersch, J., Jun, I., **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. 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 // *Icarus* – 2015 – 262 – 102–123. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.09.002>

[CH3] Tate, C. G., Moersch, J., Mitrofanov, I. G., **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. Results from the dynamic albedo of neutrons (DAN) passive mode experiment: Yellowknife Bay to Amargosa Valley (Sols 201–753) // *Icarus* – 2018 – 299 – 513–537. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.022>

[CH4] Tate, C. G., Moersch, J., Mitrofanov, I. G., **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons passive mode data and results from sols 753 to 1292: Pahrump Hills to Naukluft Plateau // *Icarus* – 2019 – 330 – 75–90. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.029>

[CH5] **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. Assessment of water content in martian subsurface along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument // *Icarus* – 2020 – 346 – 113818. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113818>

[CH6] Mitrofanov, I. G., **Nikiforov, S. Y.** [et al.]. 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>

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»: «Теоретические и экспериментальные исследования движения, строения и эволюции тел Солнечной системы. Строение, состав планетных атмосфер, поверхности и недр планет и малых тел Солнечной системы».

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Никифорова Сергея Юрьевича «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Ядерной физики» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 6 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 6 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «3» июля 2023 г.

Председатель НТС отдела 63 ИКИ РАН  
д.ф.-м.н.,



И.Г. Митрофанов

Секретарь НТС отдела 63 ИКИ РАН  
к.ф.-м.н.



А.Б. Санин