

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980  
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

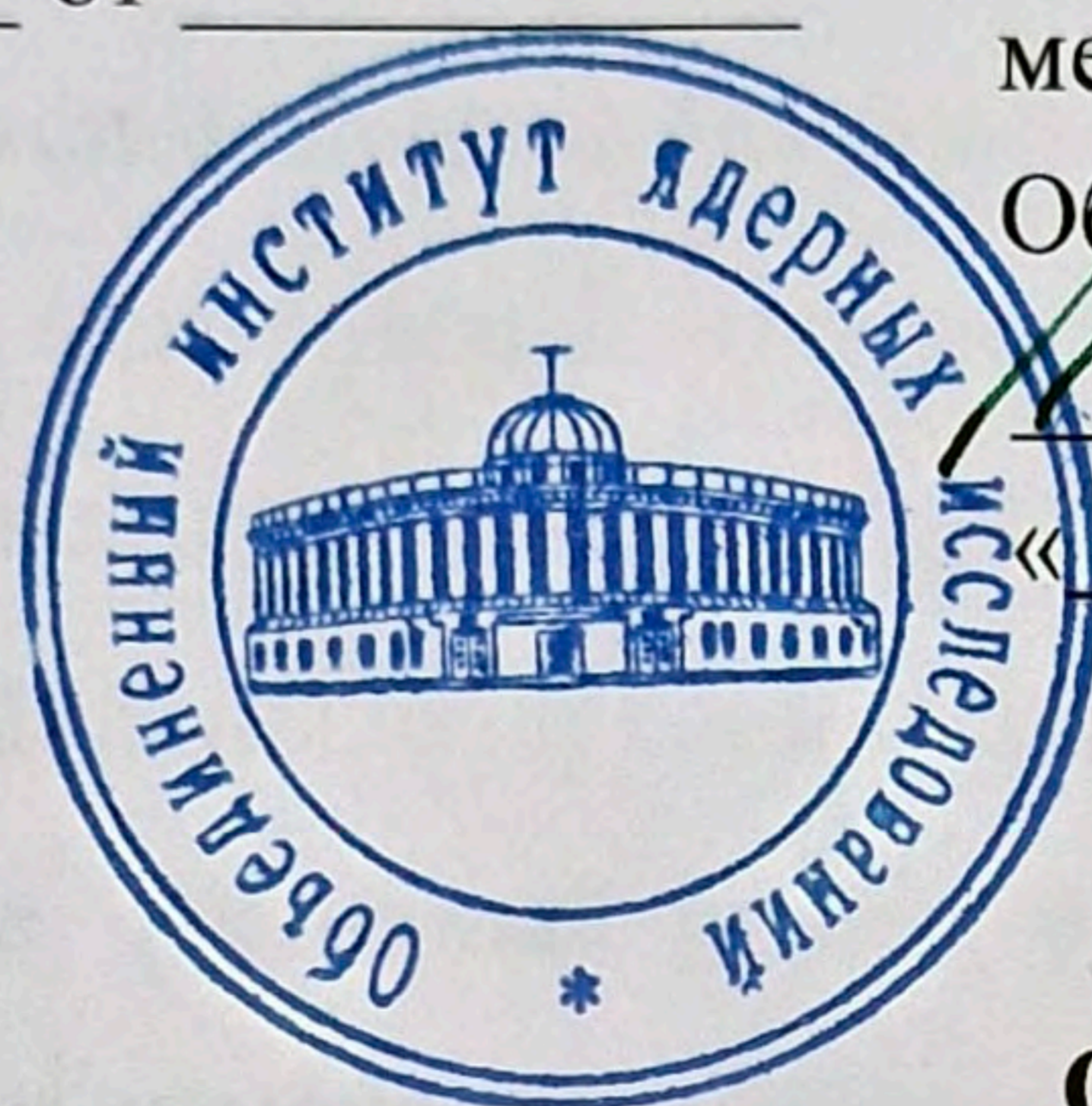
**УТВЕРЖДАЮ:**

Вице-директор Международной  
межправительственной организации

Объединенного института ядерных исследований

Костов Л.

«17» 11 2023 г.



**ОТЗЫВ**

**ведущей организации на диссертацию**

Никифорова Сергея Юрьевича

**ОЦЕНКА МАССОВОЙ ДОЛИ ВОДЫ В РЕГОЛИТЕ МАРСА НА ОСНОВЕ  
ДАННЫХ МОНИТОРИНГА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИБОРОМ ДАН НА БОРТУ МАРСОХОДА «КЮРИОСИТИ»**

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия

**Введение**

Диссертация «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кюриосити» была выполнена Никифоровым Сергеем Юрьевичем. В диссертации был разработан и реализован метод оценки содержания воды в реголите Марса путем анализа данных, полученных от нейтронного излучения поверхности планеты прибором «Динамическое Альbedo Нейтронов» (ДАН), установленным на борту марсохода «Кюриосити». Кроме того, в работе представлены результаты применения данного метода для обработки данных, собранных за более чем девять лет непрерывной работы прибора ДАН на Марсе. Это позволило проанализировать маршрут марсохода на протяжении 27 километров. Полученные данные оформлены в виде общедоступного каталога.

## **Актуальность темы диссертации**

Диссертация выполнена на основе данных, полученных российским прибором «Динамическое Альbedo Нейтронов» (ДАН), установленным на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». Прибор ДАН имеет в своем составе нейтронный генератор и блок детектирования нейтронов, состоящий из двух пропорциональных  $^3\text{He}$  счетчиков, один из которых окружен кадмиевым экраном, что позволяет измерять «кадмиевое отношение» и делать заключения о спектре регистрируемых нейтронов. Основное предназначение прибора ДАН – поиск областей с повышенным содержанием водорода на пути движения марсохода. Прибор имеет два режима работы – активный, когда для анализа содержания водорода в грунте используются быстрые (14 МэВ) нейтроны от нейтронного генератора и пассивный, когда нейтронный генератор выключен и для определения содержания водорода в грунте используются нейтроны, генерируемые космическими лучами в грунте Марса, а также, нейтроны, излучаемые радиоизотопным термоэлектрическим генератором (РИТЭГ) марсохода. Активный режим работы используется только во время остановок марсохода, при этом измерения в пассивном режиме проводятся постоянно, как во время движения, так и во время остановок, когда нейтронный генератор выключен. Основной целью данной диссертационной работы является разработка высокоэффективного метода обработки данных мониторинга нейтронного излучения поверхности Марса в пассивном режиме работы прибора ДАН – без использования генератора. Этот метод был применен для оценки содержания воды в реголите. Кроме того, в рамках работы разработанный метод был успешно использован для анализа данных измерений и выделения областей с аномальным содержанием воды вдоль трассы марсохода НАСА «Кьюриосити» за девять лет работы. Актуальность данных исследований заключается в разработке и апробации методов поиска воды/водяного льда с борта спускаемого космического аппарата.

## **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертация включает в себя введение, восемь глав и заключение. Кроме того, автор приводит в приложении к диссертационной работе каталог научных данных, полученных в результате применения предложенного им метода. Объем диссертации 137 страниц (без каталога данных).

Во введении и первых двух главах обосновывается актуальность темы диссертации и дается обзор современного состояния экспериментов по исследованию планет методами ядерной физики.

Глава 3 и 4 содержат описание наземных калибровок, выполненных с помощью прибора ДАН, и выводы из эмпирических данных, подтверждающие возможность использования измерений нейтронного мониторинга прибора ДАН для изучения характеристик поверхности Марса.

В главе 5 автор представляет описание метода обработки данных, предложенного американскими участниками команды ДАН, и делает вывод о его недостаточной точности. Кажется очень важным, что американская часть команды признает справедливость критики автора, что подтверждается совместными публикациями, посвященным анализу методов.

В главах 6 и 7 автор диссертации описывает предложенный метод анализа данных мониторинга нейтронного излучения, основанный на сопоставлении мониторинговых измерений и оценок содержания воды, полученных по данным с нейтронным генератором. Также представлены результаты применения метода для различных точек трассы марсохода.

В главе 8 автор описывает составленный каталог научных данных, включающий результаты применения предложенного метода оценки воды по данным мониторинга нейтронного излучения.

В заключении диссертации приведены основные результаты, полученные автором, сформулированные в виде положений, выносимых на защиту:

- Получены значения для потока нейтронов от поверхности Марса под воздействием галактических космических лучей и излучения радиоизотопного генератора на борту марсохода с использованием данных наземных физических калибровок прибора ДАН. Была проведена обработка и пространственная привязка научных данных, полученных с помощью прибора ДАН. Был построен пространственный профиль переменности потока нейтронного излучения с разрешением 3 метра вдоль всей траектории движения марсохода;
- Была экспериментально доказана возможность использования данных мониторинга потока нейтронов от Марса прибором ДАН для оценок массовой доли воды в реголите.

Предложен новый метод оценки массовой доли воды на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности с учетом данных активного нейтронного зондирования вещества поверхности. Данный метод используется в настоящее время для анализа данных измерений эксперимента ДАН;

- На основе применения представленного метода получены оценки массовой доли воды в марсианском реголите вдоль трассы марсохода с пространственным разрешением около 3 метров;
- Показано, что среднее значение массовой доли воды вдоль этого участка трассы составляет  $(2,6 \pm 0,7) \%$ . Обнаружены локальные районы на дне кратера Гейл, где массовая доля воды в верхнем слое поверхности близка к нулю, а также локальные районы с высокой массовой долей воды, достигающей 6 %. Подготовлен и опубликован Каталог данных измерений массовой доли воды и хлора в районах остановок и вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км.

Представленные в диссертации основные результаты являются новыми и опубликованы в шести статьях в научных журналах уровня Q1. Результаты апробированы в докладах автора на различных международных и российских конференциях и семинарах. Выносимые на защиту положения являются достоверными и содержат новые важные результаты в области исследований поверхности Марса. Полученные в диссертации результаты представляют несомненный интерес и значимость для научного сообщества.

#### **Соответствие темы и содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации**

Содержание диссертации, её завершенность в целом соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

#### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

### **Личный вклад соискателя в получение результатов исследования**

Автор оценил компоненту фонового нейтронного излучения на поверхности Марса от РИТЭГ на основе данных калибровочных измерений, выполненных на территории США совместно с американскими участниками эксперимента ДАН.

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

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.

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.

Автор является основным составителем Каталога данных измерений массовой доли воды в районах остановок и вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность данных о содержании водорода в марсианском реголите, полученных в результате пассивного мониторинга нейтронного излучения от космического лучей и РИТЭГ подтверждена автором путем тщательного сравнения данных пассивного мониторинга с данными активного режима работы прибора ДАН. В свою очередь, оба этих режима работы прибора тщательно исследовались на Земле при подготовке миссии на модели марсианского грунта в ОИЯИ, что дало возможность получить отклики прибора в обоих режимах работы на грунт с разным содержанием и глубиной залегания водорода.

## **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Работа имеет высокую актуальность и значимость, поскольку её результаты могут быть использованы для поиска воды на поверхности небесных тел, что является важной целью современных космических исследований планет Солнечной системы. Основная цель работы заключается в разработке и внедрении метода оценки содержания воды в приповерхностном слое вещества Марса на основе данных, полученных от прибора ДАН. Этот метод применяется при планировании научных задач марсохода для определения распространенности воды вдоль трассы его движения. В результате выделяются области повышенного интереса, которые могут быть исследованы более детально.

## **Замечания по диссертационной работе**

На семинаре Отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ при обсуждении доклада диссертанта ему были заданы вопросы и высказаны конкретные замечания по теме диссертации. По заданным вопросам и высказанным замечаниям диссертант дал обстоятельный ответ. В целом критические замечания не уменьшают значение работы, как диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

## **Заключение по диссертации о соответствии её требованиям**

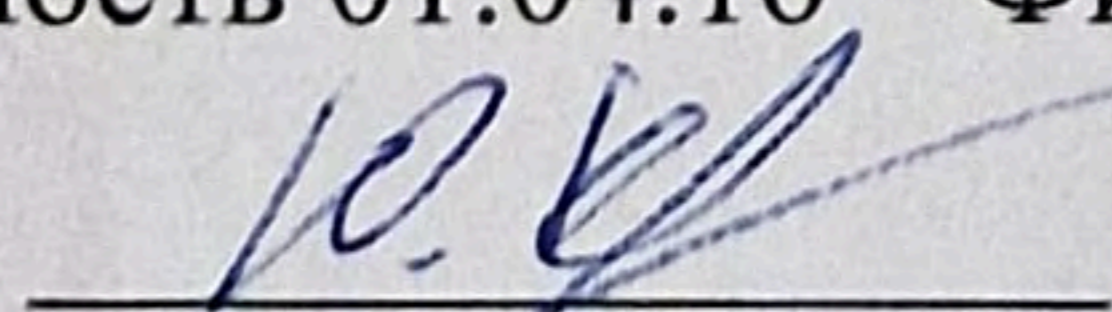
Рассматриваемая диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор – Никифоров Сергей Юрьевич, несомненно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв составил:

Копач Юрий Николаевич

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Подпись



Дата

17 ноября 2023г.

Материалы диссертации Никифорова С.Ю. «ОЦЕНКА МАССОВОЙ ДОЛИ ВОДЫ В РЕГОЛИТЕ МАРСА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИБОРОМ ДАН НА БОРТУ МАРСОХОДА «КЮРИОСИТИ» рассмотрены и утверждены на семинаре Отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка Международной межправительственной организации Объединённый институт ядерных исследований ОИЯИ 15 ноября 2023г.

Руководитель семинара

Швецов Валерий Николаевич, кандидат физико-математических наук

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

e-mail shv@nf.jinr.ru ; тел. +74962165925

Подпись

Дата 15 ноября 2023г.

Подпись Швецова В.Н. заверяю:

ученый секретарь ЛНФ ОИЯИ,

кандидат физико-математических наук,

Дорота Худоба

e-mail Scientific\_Secretary@nf.jinr.ru

Подпись

Дата 15 ноября 2023г.