

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Никифорова Сергея Юрьевича

**“ Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити» ”,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

*Актуальность темы.* В диссертации С.Ю. Никифорова рассматривается вопрос о содержании воды в реголите Марса, основанный на анализе данных, полученных от прибора Динамическое Альbedo Нейтронов (ДАН), установленного на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». Тема исследования связана с выяснением характера гидрологической эволюции Марса на основе изучения свойств поверхностных слоев грунта на дне кратера Гейл. Этот кратер в древности был озером с толстыми слоями донных отложений, которые обнажились в современную эпоху вследствие ветровой эрозии. Поэтому тема диссертации является актуальной по двум причинам. Во-первых, исследования марсохода вдоль трассы на современной поверхности кратера позволяет выяснить условия формирования гидратированных минералов и таким образом проследить характер гидрологической эволюции климата планеты. Во-вторых, гипотетическая возможность существования примитивной жизни в ранние эпохи эволюции Марса требует экспериментальных подтверждений существования в далеком прошлом этой планеты условий, необходимых для возникновения и поддержания жизни. Общая концепция «following water» для поиска признаков жизни на Марсе обосновывает актуальность исследований грунтовой воды на дне древнего марсианского озера.

### *Значимость полученных результатов для науки и практики.*

Очевидно, что ответы на указанные выше вопросы определяют стратегию будущих космических исследований Марса. Известно, что следующим шагом мировой марсианской космонавтики станут проекты по возврату на Землю образцов марсианского вещества. Научно обоснованный выбор района для забора образцов, выбор их минералогического состава с учетом массовой доли воды являются необходимыми условиями успеха таких проектов. Тема представленной диссертационной работы вносит важный вклад в подготовку таких проектов.

*Обоснованность и достоверность результатов диссертации.* В диссертации автор предлагает новый метод обработки данных мониторинга прибором ДАН нейтронного излучения (альbedo) поверхности планеты под воздействием потока нейтронов от радиоизотопного генератора на борту марсохода и потока энергичных заряженных частиц галактических космических лучей. Прибор ДАН является активным нейтронным спектрометром, и его основной задачей является активное зондирование с борта марсохода марсианской поверхности импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ (метод нейтронного каротажа). Этот метод достаточно широко применяется в наземной геологоразведке, его достоверность подтверждена на практике. Однако по решению руководства проекта марсохода сеансы нейтронного зондирования разрешены только на стоянках космического аппарата, поэтому преобладающая доля поверхности вдоль трассы движения марсохода остается исключенной из программы научных исследований прибора ДАН в режиме активного нейтронного зондирования. Автор данной диссертационной работы предложил метод обработки данных измерений прибора ДАН в пассивном режиме (без потока нейтронов от генератора), который был разрешен в процессе движения. При этом предложенный метод также был использован для оценки массовой доли воды в районах парковок марсохода. В диссертационной работе показано, что в этих районах оценки массовой доли воды по данным пассивных измерений практически совпадают

с оценками, полученными методом активного каротажа поверхности. Этот результат подтверждает как обоснованность выполненного исследования, которое позволило расширить область измерений на всю протяженность трассы марсохода, так и достоверность экспериментальных оценок массовой доли воды в грунте Марса в пассивном режиме во время движения марсохода.

**Новизна исследования.** Достаточно отметить, что результаты диссертационной работы по оценке массовой доли воды в приповерхностном слое марсианского вещества с метровым пространственным разрешением вдоль трассы движения марсохода получены впервые. Это позволило создать карту распределения воды в верхних слоях поверхности вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити» и выпустить Каталог экспериментальных данных эксперимента ДАН для участка трассы от точки посадки до отметки 27 км.

**Оценка содержания диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и приложений с данными научных измерений. Она написана вполне понятным языком и аккуратно оформлена.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, определен предмет исследования, описаны условия его проведения.

В первой главе представлен обзор современных методов исследований планет и небесных тел методами ядерной физики, а также подробно описаны условия проведения эксперимента ДАН на борту марсохода. Представленный обзор полон в части описания результатов других ядерно-физических исследований Марса.

Глава 2 посвящена описанию активного нейтронного детектора ДАН. Описываются два сенсора нейтронов этого прибора: в диапазоне тепловых и эпитепловых энергий и в диапазоне эпитепловых энергий. Следует признать, что такой минималистский подход к выбору сенсоров является вполне обоснованным. Известно, что концентрация атомов водорода в веществе существенно влияет на процессы замедления и термализации быстрых

нейтронов, поэтому анализ темпов счета в указанных сенсорах является наиболее эффективным методом оценки массовой доли воды, как основного химического соединения в марсианском грунте, содержащего водород. Автор также описывает нейтронный генератор прибора ДАН и метод обработки нейтронных измерений в активном режиме. Как следует из текста диссертации, результаты активных измерений не вошли в представленную диссертацию, но описание этого метода безусловно необходимо так как полученные результаты оценок массовой доли воды и хлора требуются автору для анализа своих данных.

В главе 3 приведены результаты наземных физических экспериментов для оценки собственного нейтронного излучения радиоизотопного генератора на борту марсохода. Представляется очевидным, что эти измерения проводились силами американского персонала проекта марсохода с ядерном центре США и на космодроме мыса Канаверал. Здесь важно подчеркнуть, что российской команде эксперимента ДАН с непосредственным участием автора диссертации удалось организовать и провести совместную обработку данных выполненных в США измерений. Как следует из диссертации, именно благодаря этой совместной работе удалось реализовать метод пассивных измерений воды прибором ДАН на Марсе.

В главе 4 обоснована возможность реализации метода пассивных измерений нейтронного потока с поверхности Марса без применения нейтронного зондирования с активным генератором. Основная идея предложенного автором диссертации метода состоит в том, что переменность отсчетов от собственного нейтронного излучения поверхности связана главным образом с переменностью массовой доли воды. Поскольку такая переменность может быть связана с другими факторами (переменностью космических лучей или переменностью расстояния между марсоходом и поверхностью), автор сравнил отношения отсчетов двух сенсоров для разных точек, где активные измерения показали одинаковую массовую долю воды. Оказалось, что в этих точках с одинаковой оценкой грунтовой воды

отношения отсчетов также практически совпадают. Этот простой тест доказал, что эмпирическая величина отношения отсчетов для сенсоров с разными энергетическими диапазонами может быть мерой воды в грунте.

В главе 5 изложены результаты первой попытки оценки массовой доли воды на основе данных пассивных измерений. Как отмечается в диссертации, главную роль в разработке этого метода на основе сравнения численного моделирования нейтронного излучения с данными измерений сыграли американские участники научной команды марсохода. Автор диссертации протестировал достоверность оценок воды, полученных на основе этого численного метода и убедительно показал, что эти данные плохо согласуются с оценками на основе активных измерений. Как можно предположить, что именно критика численного метода оказалась стимулом для разработки автором своего метода, который является основным результатом данной диссертационной работы.

Описанию этого метода посвящена глава 6. Основой этого метода является обнаруженная соискателем эмпирическая связь между оценками массовой доли воды в точках активного зондирования с одинаковой концентрацией хлора и отношением отсчетов в двух разных сенсорах прибора для этих точек. Автор сравнил результаты использования этого эмпирического метода с оценками воды с применением активного метода зондирования и получил достаточно хорошее согласие. Единственной слабой стороной метода является необходимость знания концентрации хлора для оценки массовой доли воды в точке пассивных измерений нейтронного излучения с поверхности. Автор детально анализирует этот вопрос и предлагает вполне разумные способы преодоления этой трудности. Для описания полученных результатов был использован метод выбора значения хлора для случая “длительнопериодического изменения”, при котором предполагалось, что содержание хлора плавно меняется по ходу маршрута между остановками марсохода. После описания трех вариантов определения содержания хлора, в

автореферате, в отличие от диссертации, не отмечается какой именно вариант был использован.

В следующей важнейшей главе 7 диссертационной работы представлены оценки массовой доли воды на протяжении трассы марсохода от места посадки до отметки 27 километра. Показано, что функция распределения для массовой доли воды на основе данных пассивных измерений хорошо согласуется с оценками на основе активных измерений – причем в случае активных измерений оценки воды представлены примерно для 9% трассы, а второй объем данных описывает остающиеся 91%. Представленные профили переменной воды для разных областей вдоль трассы убедительно подтверждают важность полученных оценок для изучения переменной геоморфологии поверхности на дне кратера Гейл. В частности, автор обнаружил конкретные точки с минимальным и максимальным содержанием грунтовой воды, около 1% и 6% соответственно.

Профиль воды вдоль пройденного марсоходом пути не всегда адекватно отображает пространственную переменность воды в грунте. Марсоход может пробуксовывать, несколько раз пересекать одну и ту же точку, вертеться на одном месте. С учетом этих особенностей движения мобильной платформы автор диссертационной работы по просьбе американской научной команды подготовил первую часть Каталога данных эксперимента ДАН для всей трассы от посадки до отметки 27 км. Этот Каталог описан в главе 8 диссертационной работы. Он содержит пиксели на поверхности с размером 3 x 3 метра и с точной привязкой к координатам.

В Заключении представлены основные результаты диссертационной работы, вынесенные на защиту. Эти результаты опубликованы в шести публикациях в высокорейтинговых научных журналах *Icarus* и *Journal of Geophysical Research*. В Приложении содержатся таблицы результирующих научных данных, которые были подготовлены автором диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в работах, опубликованных в ведущих научных журналах.

С.Ю. Никифоров упоминает в автореферате, что он является соавтором 41 научной статьи в рецензируемых научных журналах. Поэтому исследования, представленные в его диссертации, написанной на основании шести статей, составляют только часть его исследований.

В целом по научному содержанию диссертации можно указать следующие основные замечания:

1) Рассказывая о воде на Марсе, можно было бы упомянуть и марсоход «Персеверанс», который тоже занимается поиском воды на Марсе.

2) На рисунках серым цветом представлена зона погрешностей оценок массовой доли воды. Можно было бы отметить, как именно вычислялись размеры этой зоны и как погрешности зависели от неопределенностей в знании концентрации хлора в грунте.

3) Можно предположить, что состав основных породообразующих элементов в грунте может меняться вдоль трассы движения марсохода. Было бы интересно увидеть в дальнейших публикациях обсуждение влияния этой переменности состава на оценки массовой доли воды.

Указанные замечания не умаляют достаточно высокое научное качество диссертационной работы и достоверность полученных в ней результатов. Она выполнена на высоком уровне и является законченным исследованием по актуальной теме.

**Заключение.** Диссертация Сергея Юрьевича Никифорова на тему «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити»» является научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной задачи – измерение пространственной переменности содержания воды в грунте на дне марсианского кратера Гейл, что имеет существенное значение для изучения Марса.

По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости диссертация Сергея Юрьевича Никифорова на тему «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити»» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно пп. 9-14 «Положение о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 01.10.2018 № 1168), а её автор Сергей Юрьевич Никифоров достоин присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя С.Ю. Никифорова и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН),

*Ипатов*

Ипатов С. И.

«19» декабря 2023 г.

Контактные данные:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19

<http://www.geokhi.ru>

Телефон: +7(926)379-2810

Факс: (495) 938-20-54

Адрес электронной почты: [ipatov@geokhi.ru](mailto:ipatov@geokhi.ru)

Подпись *Ипатова Сергея Юрьевича*  
удостоверена печатью *Ипатова Сергея Юрьевича*  
делегированная печать *Ипатова Сергея Юрьевича*  
ГЕОХИ РАН