

**Отзыв официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук Никифорова Сергея**  
**Юрьевича**  
**на тему: «Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе**  
**данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором**  
**ДАН на борту марсохода «Кьюриосити»»**  
**по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»**

Изучение условий возникновения жизни и ее поиск во Вселенной являются одними из основных задач современного естествознания. В этом плане один из ключевых методов заключается в экспериментальном изучении условий на поверхности планет, а также исследовании состояния планет в прошлые эпохи. Важнейшим условием возникновения и существования жизни в ее органическом варианте является наличие воды. Поэтому поиск воды на небесных телах и анализ возможности ее существования на них в ранние периоды эволюции Солнечной системы относится к одному из центральных направлений современной планетологии.

С точки зрения существования воды Марс представляет особый интерес. Имеются указания на то, что в прошлом Марс обладал более плотной, чем сейчас атмосферой, и температура его поверхности делала возможным существование воды в жидкой фазе. Как известно, современные условия на поверхности Марса совершенно другие, тем не менее, наблюдения с помощью орбитальных и спускаемых космических аппаратов показывают, что вода на Марсе присутствует в виде адсорбированных молекул, заполняющих объем между частицами реголита, в виде слоистых отложений льда в реголите и полярных шапках, а также в составе гидротированных минералов. Исследуя содержание воды в

веществе Марса, можно получить ценную информацию об эволюции этой планеты и о ее современном состоянии. Особый интерес представляет изучение областей Марса, отличающихся повышенным содержанием воды. Такие области могут представлять собой остатки водоемов, существовавших в отдаленные эпохи, когда Марс мог быть теплым и влажным. Соответственно можно ожидать наличие в таких областях сложных молекул – предшественников органических соединений, из которых могла развиться жизнь.

Также следует отметить важность изучения содержания воды в приповерхностных слоях Марса в плане будущих полетов космонавтов и его практического освоения.

Одним из основных способов исследования содержания воды в поверхностных слоях планеты является регистрация альбедного нейтронного излучения методом нейтронного каротажа.

Диссертационная работа С.Б. Никифорова как раз посвящена разработке оригинального метода определения массовой доли воды в реголите Марса по нейтронному излучению с помощью прибора ДАН (Динамическое Альбедо Нейтронов), установленного на марсоходе «Кьюриосити».

**Актуальность работы** С.Б. Никифорова не вызывает сомнений, поскольку она основана на анализе данных одного из основных приборов марсохода «Кьюриосити», миссия которого представляет собой целую эпоху в экспериментальном изучении Марса и на протяжении почти 10 лет дает уникальную информацию об этой планете. Актуальность работы подтверждается еще и тем, что автор выбрал для анализа данные полученные при прохождении марсоходом кратера Гейбла, который вероятно был в прошлом дном водоема, и в свете отмеченных выше обстоятельств определение доли воды в реголите данной области чрезвычайно важно для изучения условий возможного существования

жизни на Марсе в прошлые эпохи. Также следует отметить, что разработанный автором метод оценки содержания воды в реголите также дает информацию о гидрологической эволюции Марса, что весьма актуально для понимания происхождения и эволюции планет земной группы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что диссертация С.Ю. Никифорова является весьма актуальной.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.** Полученные в диссертации С.Ю. Никифорова результаты и выводы в высокой степени обоснованы. Их достоверность подтверждается надежностью и достоверностью наблюдательных данных эксперимента с прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити», верифицированных путем сравнения с результатами эксперимента по активному нейтронному зондированию с помощью импульсного нейтронного генератора, также установленного на борту этого марсохода. Достоверность полученных в данной работе результатов также подтверждается тем, что эффекты, связанные с регистрацией повышенной концентрации воды на поверхности марсианского кратера, согласуются с результатами орбитального эксперимента CRISM, в котором были обнаружены полигидратированные сульфиты также в районе кратера, исследовавшегося в данной работе.

Результаты, представленные в диссертации, доложены на 8 международных и всероссийских конференциях. Также результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в журналах из квартиля Q1, индексируемых системами Web of Science и Scopus. Опубликованные статьи достаточно полно отражают результаты представленной диссертации.

**Научная новизна и практическая ценность** настоящей работы обусловлена в первую очередь использованием данных уникального космического прибора – детектора альбедного нейтронного излучения

ДАН. Эта аппаратура дала возможность впервые измерить потоки альбедного нейтронного излучения на днѣ кратера Гейл, образующегося под воздействием галактических космических лучей и нейтронов энергетической установки марсохода. В свою очередь это позволило впервые построить профиль содержания воды в поверхностном веществе Марса вдоль трассы марсохода. Также впервые были решены важные методические задачи. В частности, разработан оригинальный метод построения пространственного профиля интенсивности альбедного нейтронного излучения вдоль трассы марсохода на основе анализа данных прибора ДАН. Также впервые разработан метод наземной калибровки детектора альбедного нейтронного излучения с использованием радиоизотопного источника на борту марсохода, что позволило получать профиль пространственной переменности интенсивности альбедного нейтронного излучения вдоль всего пути движения марсохода.

Практическая ценность работы заключается в том, что ее результаты могут быть использованы при проведении зондирования поверхности планет, в том числе Земли методом нейтронного каротажа, что может иметь применение, например, в геологии при поиске полезных ископаемых. Кроме того, результаты исследования, представленные в работе, в части разработки метода анализа и обработки данных по мониторингу альбедного нейтронного излучения могут использоваться при разработке новых экспериментов в области ядерной планетологии с использованием мобильных аппаратов.

**Замечания к диссертационной работе.** Диссертационная работа С.Ю. Никифорова не лишена некоторых недостатков. Общее замечание касается интерпретации данных по альбедному нейтронному излучению, связанному с вариациями галактических космических лучей (ГКЛ). Следовало бы более детально проанализировать природу этих вариаций. Представляется, что в основном они могут быть обусловлены, т.н.

эффектом Форбуша – изменением потока ГКЛ вследствие возмущений, вызванных, например, корональными выбросами масс (КВМ). В этом плане имело бы смысл проверить, наблюдались ли какие-либо вариации интенсивности альбедного нейтронного излучения во время подобных событий, также как и во время генерации солнечных космических лучей.

В Гл. 1 на с. 21 указывается, что частицы ГКЛ имеют энергии «от 100 МэВ на нуклон до  $\geq 1$  ТэВ на нуклон». Реально энергии частиц ГКЛ могут быть существенно выше – вплоть до  $10^{17}$  эВ. Что касается нижней границы, то следовало бы отметить, для какой эпохи солнечной активности она приводится: в минимуме и максимуме 11-летнего цикла солнечной активности минимальные энергии частиц ГКЛ могут существенно различаться.

В Гл. 2 на с. 33 указано, что нейтроны в случае ГКЛ имеют начальную энергию 10-20 МэВ, но, учитывая, что энергии первичных частиц ГКЛ существенно выше, а коэффициент неупругости при взаимодействиях частиц космических лучей в среднем равен 0.5, можно ожидать, что начальная энергия нейтронов может быть выше указанной величины.

На большинстве рисунков, на которых представлены статистические распределения, по оси ординат указана «плотность вероятности». Следовало бы хотя бы в одном месте пояснить, как эта величина была получена.

У рисунка 8 отсутствует подпись, а подписи к рис. 9, 12, 27 указаны не на тех страницах, на которых расположен сами рисунки, что затрудняет восприятие приведенного материала.

Тем не менее, указанные недостатки не умаляют большой работы, проделанной автором и важности полученных им результатов. Представленные в диссертации С.Ю. Никифорова результаты являются новыми и опубликованы в ведущих международных научных журналах и

имеют большое значение для дальнейшего развития ядерной планетологии. Содержание автореферата соответствует названию и содержанию диссертации.

**Заключение.** Рассматриваемая диссертационная работа С.Ю. Никифорова "Оценка массовой доли воды в реголите Марса на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности прибором ДАН на борту марсохода «Кьюриосити»" отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней», утверждённому постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года с дополнениями № 335 от 21 апреля 2016 год, а ее автор Никифоров Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

Свертилов Сергей Игоревич,

доктор физико-математических наук,  
специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия,  
ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института  
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,  
профессор физического факультета  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»

Почтовый адрес:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова,  
д.1, стр. 2, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени  
Д.В. Скобельцына  
тел.: 7(926)1119304,  
e-mail: [sis@coronas.ru](mailto:sis@coronas.ru)

Я, Свертилов Сергей Игоревич, выражаю свое согласие на обработку персональных данных, связанных с защитой диссертации.



Подпись доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, профессора физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Свертилова Сергея Игоревича удостоверяю:

Ученый секретарь Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова



Е.А. Сигаева

20.11.2023