

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

На правах рукописи



Никифоров Сергей Юрьевич

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

1.3.1 - «Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Научный руководитель: **Митрофанов Игорь Георгиевич**
доктор физико-математических наук, заведующий
отделом «Ядерной планетологии» ИКИ РАН

Официальные оппоненты: **Ипатов Сергей Иванович**
доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории термодинамики и
математического моделирования природных процессов
ГЕОХИ имени В. И. Вернадского РАН

Свертилов Сергей Игоревич
доктор физико-математических наук, профессор
физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Ведущая организация: Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Защита состоится « 1 » марта 2024 г. в __:__ на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2023/nikiforov.htm>

Автореферат разослан __ января 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат физико-
математических наук



Ткаченко А. Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Исследования Солнечной системы с помощью автоматических станций позволяют получить уникальные знания о планетах. В первую очередь такие исследования проводятся для понимания начальных условий образования и дальнейшей эволюции планет до их современного состояния. Именно на это направлены современные исследования Луны, планет и малых тел Солнечной системы при помощи космических аппаратов, работающих как на орбите, так и на поверхности. В частности, исследования, направленные на изучение распространенности воды на объектах Солнечной системы, важны для понимания основных этапов возникновения и эволюции планет земной группы [1-11].

Современные космические исследования планеты Марс показали, что в прошлом Марс был таким же влажным и тёплым, как ранняя Земля [13, 14]. В то время эти две планеты имели схожие природные условия: плотную атмосферу, сильное магнитное поле и водные резервуары на поверхности. Если природные условия на Земле принципиально не изменились, то формирование Марса пошло другим путем. Согласно современным представлениям, основная масса ранней марсианской атмосферы рассеялась в космическое пространство, а большая часть его исходной воды испарилась.

Однако на современном Марсе вода по-прежнему остаётся важной составляющей природной среды. Космические аппараты, работающие на орбите и на поверхности Марса, подтверждают ее наличие в веществе планеты. Вода в реголите планеты присутствует в форме адсорбированных молекул, заполняя свободный объем между частицами реголита [1]. Вода также содержится в составе гидратированных минералов [14]. Они могли образоваться в обширных водоемах молодого Марса, которые вполне могли бы быть средой возникновения примитивной жизни на «красной планете», как это случилось в аналогичных водоемах ранней Земли.

На поверхности Марса вода также присутствует в виде слоистых отложений льда в полярных шапках и в составе реголита [7]. Относительно недавно были обнаружены локальные ледники в глубоких каньонах на умеренных широтах [9, 12]. Совсем небольшое наличие водяного пара также наблюдается в атмосфере [13]. В целом, распределение воды в веществе современного Марса характеризует особенности гидрологической эволюции планеты, а также современные процессы взаимодействия литосферы и атмосферы.

Таким образом, диссертация, связанная с гидрологической разведкой на Марсе, соответствует актуальным стратегическим целям космических исследований планеты. Исследовательские задачи миссии марсохода НАСА «Кьюриосити» направлены на подтверждение наличия на раннем Марсе природных условий, необходимых для возникновения и поддержания примитивной жизни [15, 18]. Учитывая, что вода является одним из ключевых таких условий, на борту марсохода установлен прибор Динамическое Альbedo Нейтронов (ДАН) [16], 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 [27]. Значения массовой доли воды в реголите представлены в виде каталога, в котором для элементарных участков поверхности вдоль всей трассы движения марсохода показаны оценки массовой доли воды в их веществе [28].

Исследования в рамках диссертационной работы были проведены по теме «Освоение» (№ 122042500014-1) в отделе «Ядерной планетологии» Института космических исследований РАН. Исследования по теме диссертации основаны на таких ранее полученных результатах, как орбитальные исследования собственного нейтронного излучения Марса в экспериментах с приборами ХЕНД и ФРЕНД, в которых были получены экспериментальные доказательства наличия значительной массы воды в верхних слоях реголита современного Марса [5, 8].

Условия проведения и предпосылки научного исследования. Для научных исследований с борта марсохода «Кьюриосити», марсианская научная общественность выбрала приэкваториальный кратер Гейл, поверхность которого, по мнению планетологов, в прошлом являлась дном марсианского озера [19]. Российский прибор ДАН был включен в состав комплекса научной аппаратуры марсохода для измерения массовой доли воды. Анализ данных измерений этого прибора позволяет определить участки вдоль трассы движения, где содержание воды в реголите достигает максимальных значений. Эти участки становятся предметом детальных исследований всеми приборами на борту «Кьюриосити» [20, 21].

Основная идея физического эксперимента ДАН состоит в использовании активной методики импульсного нейтронного каротажа для изучения свойств марсианского реголита [16]. Это достигается путем регистрации нейтронного послесвечения, которое возникает после

облучения поверхности короткими импульсами нейтронов высокой энергии. Помимо этого, прибор ДАН также позволяет оценивать поверхностное нейтронное излучение без использования генератора. Такое излучение возникает под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ) и нейтронов, которые испускаются радиоизотопным термоэлектрическим генератором (РИТЭГ) марсохода [22-24].

Результаты измерений прибора ДАН с использованием нейтронного генератора подтвердили высокую эффективность метода для изучения состава приповерхностного слоя планеты [17]. В результате анализа данных нейтронного зондирования были получены прямые оценки содержания воды и элементов с большим сечением поглощения нейтронов (главным образом, хлора и железа) в верхнем слое Марса, а также были обнаружены участки поверхности, где содержание воды неоднородно по глубине [20, 21].

Однако для прибора ДАН существует правило проекта, запрещающее работу генератора во время движения марсохода, чтобы исключить сбой в блоке управления марсохода под воздействием интенсивного потока нейтронов. Поэтому измерения с нейтронным генератором производятся только на остановках марсохода, которые могут располагаться друг от друга на несколько сотен метров. Диаметр зондирования поверхности прибором ДАН составляет около 3 метров, что приводит к тому, что суммарная доля исследуемой поверхности вдоль трассы марсохода составляет всего около 9 % от ее полной площади [21].

Цели и задачи исследования. Основной целью данной диссертационной работы является разработка высокоэффективного метода обработки данных мониторинга пассивного нейтронного излучения поверхности Марса, без использования генератора. Этот метод будет применяться 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.

Для достижения указанных целей в рамках представленного диссертационного исследования были решены следующие **научные задачи**:

ЗАДАЧА 1: Проведение наземной физической калибровки прибора ДАН с целью измерения темпов счета в его детекторах от нейтронного излучения радиоизотопного источника РИТЭГ на борту марсохода «Кьюриосити». Проведение обработки и пространственной привязки научных данных прибора ДАН.

ЗАДАЧА 2: Анализ предложенного ранее метода и разработка нового, более точного и надежного, метода анализа данных прибора ДАН в режиме мониторинга нейтронного излучения Марса для оценки массовой доли воды в реголите вдоль пути движения марсохода «Кьюриосити».

ЗАДАЧА 3: Построение профиля пространственной переменности нейтронного излучения в тепловом и эпитепловом энергетических диапазонах от марсианского реголита с пространственным разрешением 3 метра вдоль трассы движения марсохода.

ЗАДАЧА 4: Изучение общих свойств распределения воды в реголите вдоль трассы марсохода. Поиск и отождествление районов с необычным содержанием воды в кратере Гейл. Построение Каталога и общедоступной базы данных для массовой доли воды в реголите вдоль трассы.

Научная и практическая значимость. 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» (np.cosmos.ru/) и в научном архиве «Zenodo» (DOI: [10.5281/zenodo.6974535](https://doi.org/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.

Автор диссертационной работы является членом научной группы космического эксперимента ДАН на борту аппарата НАСА «Кьюриосити» и участвует в оперативном управлении проведением этого эксперимента, используя предложенный метод по оценке содержания воды для планирования работ марсохода на поверхности Марса. Автором регулярно проводится оценка содержания воды в верхнем слое поверхности Марса вдоль новых участков трассы марсохода на основе анализа данных научных измерений прибора ДАН, а

также автор занимается подготовкой научных данных эксперимента для архива НАСА (NASA PDS) с целью их доступности исследовательскому сообществу.

Научная новизна. Все научные ЗАДАЧИ 1 - 4 диссертационного исследования являются новыми, полученные в них результаты определяют современный уровень развития космической науки в области ядерной планетологии. 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 ГКЛ и от РИТЭГ марсохода.

2) Впервые построен пространственный профиль содержания воды в веществе Марса вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км.

Основные результаты, выносимые на защиту:

(P1) 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 [СН1]. 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 [СН5].

(P2) Была экспериментально доказана возможность использования данных мониторинга потока нейтронов от Марса прибором ДАН для оценок массовой доли воды в реголите [СН2], [СН3], [СН4]. Предложен новый наиболее эффективный метод оценки массовой доли воды на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности с учетом данных активного нейтронного зондирования вещества поверхности [СН5]. Данный метод используется в настоящее время для анализа данных измерений эксперимента ДАН.

(P3) На основе применения представленного метода получены оценки массовой доли воды в марсианском реголите вдоль трассы марсохода с пространственным разрешением около 3 метров [СН5].

(P4) 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 % [СН5]. Подготовлен и опубликован Каталог данных измерений массовой доли воды и хлора в районах остановок и вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км [СН6].

Все указанные результаты опубликованы. Для каждого из указанных выше результатов (P1) – (P4) личный вклад автора является преобладающим:

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 (ЗАДАЧА 1, [СН1]).

Автор принимал участие в разработке метода для оценки массовой доли воды на основе данных мониторинга нейтронного излучения поверхности, предложенного в (ЗАДАЧА 2, [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 (ЗАДАЧА 2, [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 (ЗАДАЧА 3, [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 (ЗАДАЧА 4, [СН5], [СН6]).

Автор является основным составителем Каталога данных измерений массовой доли воды в районах остановок и вдоль трассы движения марсохода протяженностью 27 км (ЗАДАЧА 4, [СН6]).

Достоверность полученных результатов. 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. Также, была обнаружена связь между повышенным содержанием воды на поверхности марсианского кратера по данным прибора ДАН, и присутствием полигидратированных сульфатов, обнаруженных в орбитальном эксперименте CRISM [26]. Сравнение показало хорошее согласие между этими оценками, что подтверждает высокую достоверность полученных результатов.

Апробация 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);
- COSPAR Scientific Assembly (2014, 2018, 2022).

Публикации. Диссертация подготовлена на основании 6 научных статей [CH1] – [CH6], которые были опубликованы в реферируемых международных журналах уровня Q1 и включены в международные базы данных Web of Science и/или Scopus. Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации.

Работа [CH5], опубликованная в журнале «Icarus» в 2020 году, была награждена премией «Лучшая работа, выполненная молодыми учёными» на конкурсе научных работ Института космических исследований РАН.

Автор диссертации – соавтор 41 научной статьи в рецензируемых научных журналах, включая 14 публикаций в высокорейтинговом журнале «Science». Его индекс Хирша, согласно данным Scopus, составляет 18. Кроме того, автор получил три грамоты НАСА за успешное участие в проекте «MSL Science and Operation Team».

Структура и объём работы. Общий объём диссертации, состоящей из введения, восьми глав, заключения, перечня принятых сокращений и списка литературы, составляет 219 страниц, в том числе приложение таблицы научных данных, составляющего 83 страницы. В работе содержится 27 иллюстраций и 11 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 81 библиографических ссылок.

Основное содержание диссертации

В **Введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, определен предмет исследования, описаны условия его проведения. Приведены основные результаты, выносимые на защиту, определен личный вклад автора в получение этих результатов, подтверждена их достоверность.

В **Главе 1 «Обзор методов и результатов исследований планет и небесных тел методами ядерной физики»** представлен обзор методов исследований планет и небесных тел методами ядерной физики.

В **разделе 1.1** диссертационной работы описываются научные космические эксперименты по изучению воды в реголите методами ядерной планетологии, в которых автор диссертации принимал участие. Рассматривается актуальность исследования и формулируются общие физические принципы, используемые для исследования распределения воды в верхнем слое реголита.

В **разделе 1.2** приводится физическое описание зависимости нейтронного излучения от элементного состава поверхностного слоя реголита планет.

В **разделе 1.3** описывается применение методов ядерной физики в приборах ХЕНД и ФРЕНД в миссиях НАСА «2001 Mars Odyssey» и ЕКА «TGO» соответственно.

Раздел 1.4 посвящен описанию миссии НАСА «Марсианская Научная Лаборатория» (MSL), включающей марсоход «Кьюриосити».

В **Главе 2 «Описание научного эксперимента Динамическое Альbedo Нейтронов»** описывается эксперимент на поверхности Марса при помощи прибора ДАН, установленный на борту марсохода «Кьюриосити».

Раздел 2.1 содержит детальное описание устройства и принципов работы прибора ДАН, включающего в себя два блока: блок детекторов и электроники ДАН-ДЭ, а также импульсный нейтронный генератор ДАН-ИНГ, фотографии которых приведены на рисунке 1.

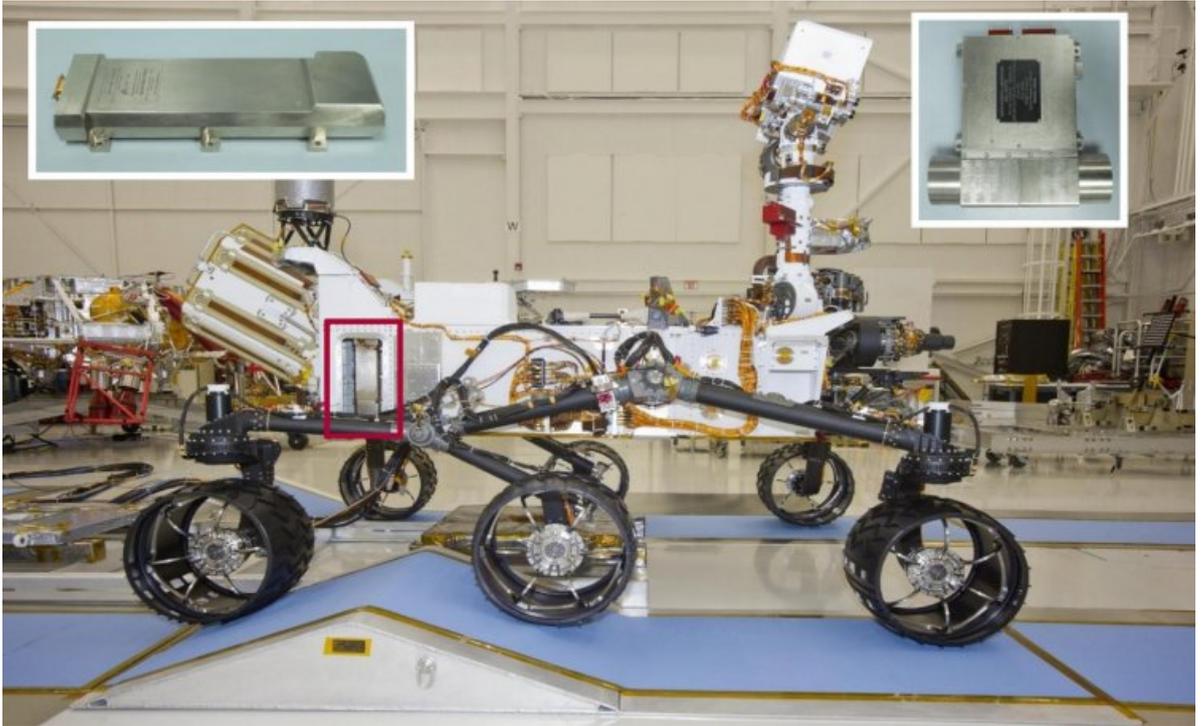


Рисунок 1. Расположение прибора ДАН на борту марсохода «Кьюриосити». Блок ДАН-ДЭ (слева), блок ДАН-ИНГ (справа).

В разделе 2.2 описывается блок ДАН-ИНГ, разработанный на основе серийно выпускаемого промышленного прототипа генератора ИНГ-101 в институте автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП «ВНИИА», Москва, Россия).

Раздел 2.3 содержит описание блока ДАН-ДЭ и формата данных. Блок ДЭ состоит из детекторов и плат электроники, которые управляют прибором и генератором, и обеспечивают измерение нейтронов (Рисунок 1). В блоке ДАН-ДЭ используются два гелиевых детектора: детектор полного числа нейтронов (СТН) и детектор эпитепловых нейтронов (СЕТН). СТН может регистрировать нейтроны в широком диапазоне энергий, а СЕТН покрыт кадмиевым кожухом, который поглощает нейтроны с энергиями ниже $\sim 0,4$ эВ, что позволяет регистрировать нейтроны только с энергиями выше данного порога.

В разделе 2.4 описан ранее разработанный метод оценки распределения воды на Марсе с использованием нейтронного генератора. Для этого проводится анализ нейтронных профилей прибора ДАН, полученных после облучения поверхности [16]. Часть нейтронов замедляется до эпитепловых или тепловых энергий, и профили послеимпульсного излучения нейтронов позволяют определить эффективность процесса замедления. Анализ таких профилей излучения позволяет оценить концентрацию водорода и других нейтронно-поглощающих элементов в реголите и исследовать степень неоднородности их распределения по глубине [17].

В разделе 2.5 описывается подход к оценке распределения воды по данным мониторинга естественного нейтронного фона на Марсе.

В разделе 2.6 представлены основные выводы по полученным результатам, изложенным в Главе 2.

В Главе 3 «Оценка нейтронного фона на Марсе при измерениях прибором ДАН» описывается оценка фоновых нейтронов при измерениях прибором ДАН. В главе рассматриваются результаты измерений и оценки темпа счета собственного нейтронного фона от марсохода [25].

В разделе 3.1 приводится описание и представлены параметры излучения РИТЭГ, который установлен на марсоходе.

Раздел 3.2 описывает предполетные испытания марсохода в Космическом центре им. Кеннеди и результаты калибровок прибора ДАН.

В разделе 3.3 представлены основные выводы по полученным результатам, изложенным в Главе 3.

В Главе 4 «Обработка данных мониторинга нейтронного излучения прибором ДАН» приводится описание использования данных мониторинга нейтронного излучения прибора ДАН для оценки содержания воды на Марсе.

Раздел 4.1 описывает способ привязки измерений прибора ДАН к координатам марсохода на Марсе.

В разделе 4.2 объясняется выбор параметра для характеристики измерений нейтронного альbedo прибором ДАН. Для изучения содержания воды в реголите на основе данных мониторинговых измерений предпочтительной измеряемой величиной является отношение темпов счета тепловых и эпитепловых нейтронов с поверхности:

$$F_{DAN} = C_{CTN} / C_{CETN} \quad (1)$$

где C_{CTN} и C_{CETN} соответствуют величинам темпов счета детекторов CTN и CETN.

В разделе 4.3 приводятся примеры использования параметра F_{DAN} в измерениях прибора ДАН. Они показывают, что измерение только отношения нейтронных потоков F_{DAN} не позволяет точно определить массовые доли воды и хлора на поверхности Марса. Однако, для этих компонентов имеются оценочные значения из активных измерений в эксперименте ДАН,

что открывает возможность разработки метода обработки данных мониторинга, который будет описан в **Главе 6**.

В **разделе 4.4** представлены основные выводы по полученным результатам, изложенным в **Главе 4**.

В **Главе 5 «Сравнение методов оценки содержания воды вдоль трассы движения марсохода»** рассматривается метод оценки содержания воды в марсианском веществе на основе данных мониторинговых измерений нейтронного альbedo, предложенный американской командой прибора ДАН. Проведенное сравнение с активными данными показало, что данный метод относительно неточен в связи с использованием аналитических методов и ограниченностью результатов в некоторых локальных районах измерений.

В **разделе 5.1** описываются основные характеристики метода анализа мониторинговых измерений, который был разработан американской командой прибора ДАН в сотрудничестве с российскими участниками, включая автора данной диссертационной работы, который был ответственен за подготовку данных. В работе над методом ключевую роль сыграл Кристофер Тейт. Сам метод основан на сопоставлении данных измерений нейтронных потоков с результатами численного моделирования нейтронного излучения Марса, где массовая доля воды выступает в качестве параметра. Для моделирования применяется программный продукт Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPX) [30].

Раздел 5.2 содержит сравнение результатов оценки массовой доли воды, выполненных по активным измерениям прибора ДАН и по методу оценки К. Тейта. Проведенный анализ сравнения оценок показал значительное расхождение. На рисунке 2 показано сравнение оценок массовой доли воды в точках стоянок:

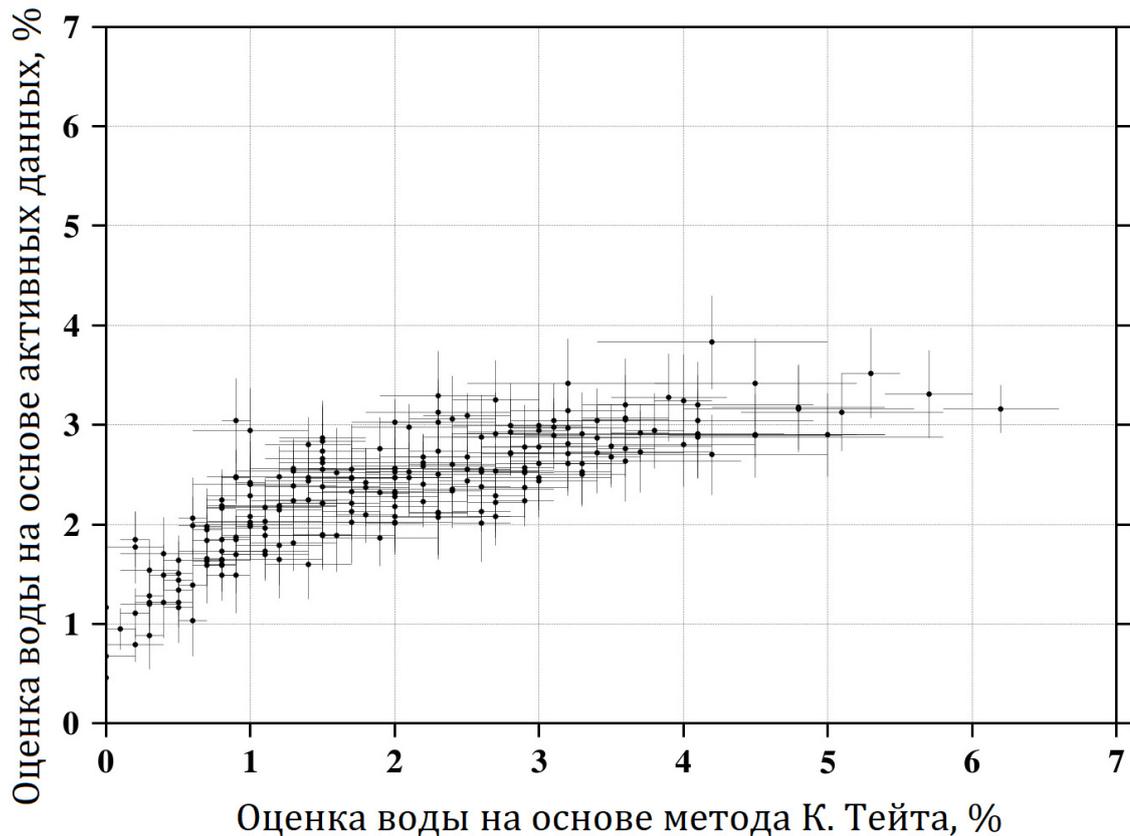


Рисунок 2. Сравнение оценок содержания воды, полученные методами на основе активных данных и на основе прямого численного моделирования.

В разделе 5.3 анализируются возможные причины расхождения между результатами оценок, полученных по активным данным, и методом, разработанным К. Тейтом. Основной вывод данного раздела заключается в том, что данные методы основаны на различных физических процессах изучения верхнего слоя поверхности Марса, что приводит к неточностям при повышении концентрации воды в реголите с применением метода К. Тейта. Активные измерения опираются на результаты нейтронно-активных процессов зондирования поверхности при помощи импульсов нейтронов с энергией 14 МэВ, которые проникают на глубину около 50 см [21]. С другой стороны, метод оценки, разработанный К. Тейтом, основан на численном моделировании и рассматривает нейтроны, образующиеся при воздействии галактических космических лучей на глубинах порядка 1 м [27]. Таким образом, различия в физических процессах, лежащих в основе этих методов, объясняют расхождение в получаемых оценках при высокой концентрации воды в реголите.

В разделе 5.4 обсуждаются возможности применения метода прямого численного моделирования и представлены основные выводы по полученным результатам, изложенным в Главе 5.

В главе 6 «Метод оценки содержания воды на основе данных мониторинга нейтронного излучения с использованием результатов активных измерений» автор диссертации описывает предложенный метод анализа данных мониторинга нейтронного излучения, который основывается на сопоставлении нейтронного параметра F_{DAN} и оценок содержания воды в марсианском реголите, полученных по активным измерениям. Метод, представленный автором, основывается на эмпирическом подходе и не использует численного моделирования нейтронного излучения, в отличие от метода К. Тейта.

В разделе 6.1 описывается алгоритм метода, предложенного автором. Были отобраны точки измерения на трассе марсохода с известными значениями воды и хлора, где активные данные можно хорошо описываются однородной моделью. Отобранные данные были разделены на 10 групп с различным диапазоном значений эквивалентного хлора (см. таблица 1). Для каждой группы была построена функция линейной ортогональной регрессии, учитывающая неопределенности оценки воды из активных данных и параметра F_{DAN} из данных мониторинга. Результирующая аппроксимация оценки содержания воды (ξ_w) от параметра F_{DAN} была записана как:

$$\xi_w = A_i * F_{\text{DAN}} + B_i \quad (2)$$

где «i» - индекс группы от 1 до 10, A_i и B_i – параметры регрессии для группы i.

Таблица 1. Наилучшие параметры эмпирических соотношений (2) между содержанием воды, полученным на основе активных данных, и значениями параметра F_{DAN} для 10 групп с различными значениями массовой доли хлора.

№ группы	Интервал значений массовой доли эквивалентного хлора [%]	Коэффициент корреляции между ξ_w и параметром F_{DAN}	Параметр A_i	Параметр B_i
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0,00 – 0,59	0,86	(1,07 ± 0,09)	- (1,55 ± 0,27)
2	0,59 – 0,69	0,88	(0,92 ± 0,06)	- (0,77 ± 0,21)
3	0,69 – 0,81	0,86	(1,03 ± 0,07)	- (0,94 ± 0,21)
4	0,81 – 0,88	0,84	(0,88 ± 0,07)	- (0,44 ± 0,22)
5	0,88 – 0,98	0,75	(1,08 ± 0,09)	- (0,92 ± 0,30)
6	0,98 – 1,08	0,85	(1,01 ± 0,06)	- (0,61 ± 0,19)
7	1,08 – 1,21	0,86	(1,14 ± 0,08)	- (0,91 ± 0,25)

№ группы	Интервал значений массовой доли эквивалентного хлора [%]	Коэффициент корреляции между ξ_w и параметром F_{DAN}	Параметр A_i	Параметр B_i
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
8	1,21 – 1,34	0,93	$(1,19 \pm 0,05)$	$- (0,90 \pm 0,15)$
9	1,34 – 1,63	0,83	$(1,29 \pm 0,10)$	$- (0,92 \pm 0,29)$
10	1,63 – 2,45	0,87	$(1,38 \pm 0,11)$	$- (0,84 \pm 0,29)$

В разделе 6.2 приводятся результаты сравнения, полученные предложенным методом, с результатами активных данных, аналогично как это было сделано при анализе метода К. Тейта. На рисунке 3 показано сравнение этих оценок для одних и тех же участков измерений, которые отражают согласованность проведенных оценок с коэффициентом корреляции в 0,9.

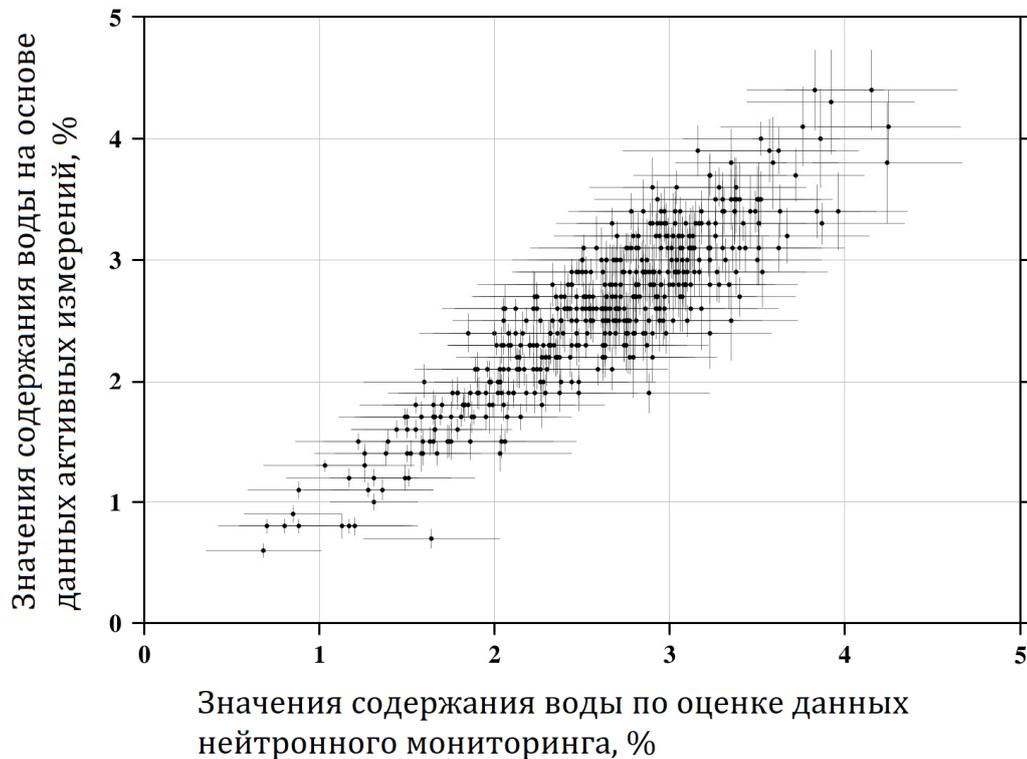


Рисунок 3. Расчетные значения содержания воды, полученные на основе данных активных измерений и измерений по оценке данных нейтронного мониторинга для одних и тех же 464 мест измерения марсохода.

В разделе 6.3 описывается процесс выбора значения хлора вдоль трассы марсохода, т.к. из активного метода эти оценки известны только в точках стоянок. Но для оценки массовой доли воды предложенным методом вдоль трассы между стоянками требуется сделать предположение о том, как меняется содержание хлора во время движения.

В первом варианте содержание хлора в марсианском грунте варьируется плавно на десятки метров, что характеризуется длительнопериодичной изменчивостью хлора. В таком случае рекомендуется использовать интерполяцию значений массовой доли хлора между точками стоянок.

Второй вариант предполагает наличие участков с короткопериодичным изменением содержания хлора, где вариации происходят на масштабах порядка нескольких метров. На таких участках наблюдаются значительные изменения даже у близких друг к другу точек стоянок. В таком случае, рекомендуется использовать среднее значение массовой доли хлора, полученное из полного распределения активных измерений на всей трассе движения.

В третьем варианте массовая доля хлора может быть определена на основе измерений других экспериментов на марсоходе.

В разделе 6.4 представлены основные выводы о применении предложенного метода оценки массовой доли воды по данным мониторинга нейтронного излучения прибором ДАН.

Глава 7 «Результаты применение предложенного метода оценки воды по данным прибора ДАН для изучения локальных особенностей вариаций воды в кратере Гейл» представляет описание результатов по оценке массовой доли воды на основе применения предложенного метода обработки данных мониторинга прибора ДАН.

В разделе 7.1 приводятся результаты содержания воды в реголите по данным мониторинга нейтронного излучения в зависимости от величины интервалов пути за девять лет непрерывной работы. Исходя из проведенного анализа, содержание воды в марсианском реголите вдоль пути движения марсохода составляет около $(2,6 \pm 0,7) \%$.

В процессе исследования кратера Гейл команда марсохода проводит специальные исследовательские кампании в «особых» районах маршрута с целью выявления геологических особенностей [19, 20]. Измерения прибора ДАН подтвердили, что содержание воды в марсианском грунте может изменяться на небольших расстояниях. Непрерывный профиль содержания воды позволяет обнаруживать такие особенности при движении марсохода, как показано на рисунке 4.

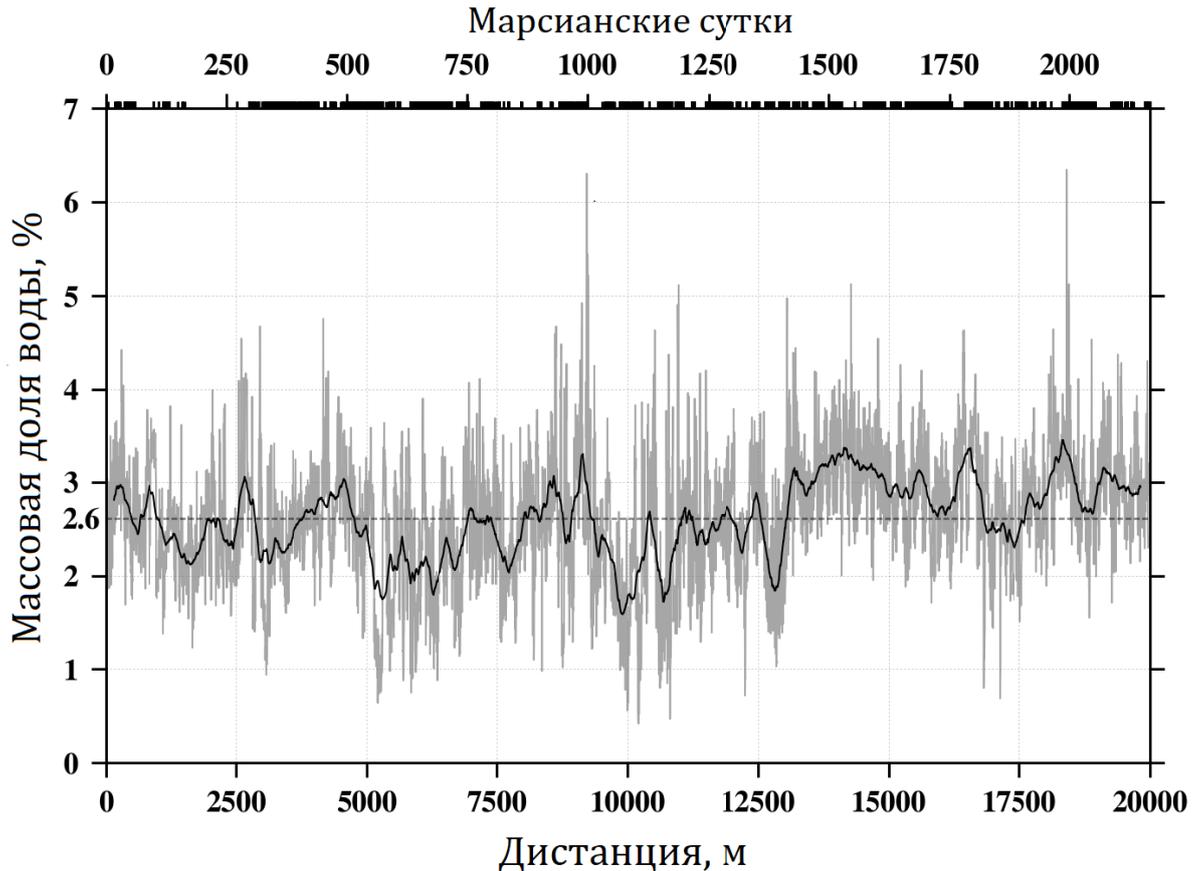


Рисунок 4. Профиль содержания воды на основе данных мониторинга вдоль пути движения марсохода на отрезке от места посадки до 20 км. Линейные масштабы представлены в виде черной линии с разрешением 300 метров и серой линии с разрешением 3 метра. Пунктирная линия отображает среднее содержание воды в реголите вдоль пути движения марсохода.

В разделе 7.2 приводятся результаты измерений в области Violet Valley района Kimberley, где было измерено заметное снижение значения воды. В течение марсианских суток (солов) 546-548 содержание воды уменьшилось с $(3,0 \pm 0,4) \%$ до $(0,64 \pm 0,35) \%$. Профиль оценки водной компоненты поверхности представлен на рисунке 5.

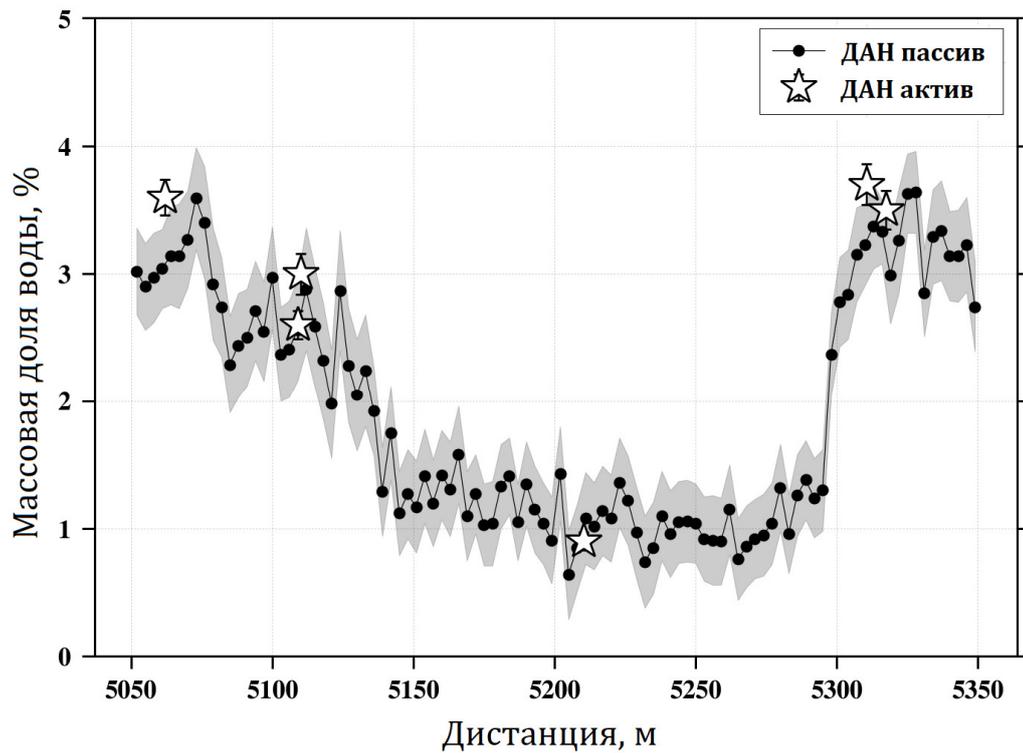


Рисунок 5. Измерение резкого уменьшения массовой доли воды для интервала пути между отметками 5 050 и 5 350 метров (солы 542-552) (черные точки – оценка по измерениям нейтронного мониторинга, серая заливка – погрешность мониторинговых измерений, белые звезды – оценка по активным измерениям).

В разделе 7.3 приводятся результаты измерений в области хребта Vera Rubin, где было зарегистрировано максимальное значение воды ($6,34 \pm 0,68$) % (Рисунок 6). Данные значения наблюдались на отметке пути 18 417 м в соли 1985. Согласно данным орбитальных наблюдений, в этой области имеются участки с спектральной характеристикой полигидратированных сульфатов на поверхности. Эти участки расположены близко к областям с максимальным содержанием воды, обнаруженными прибором ДАН [26].

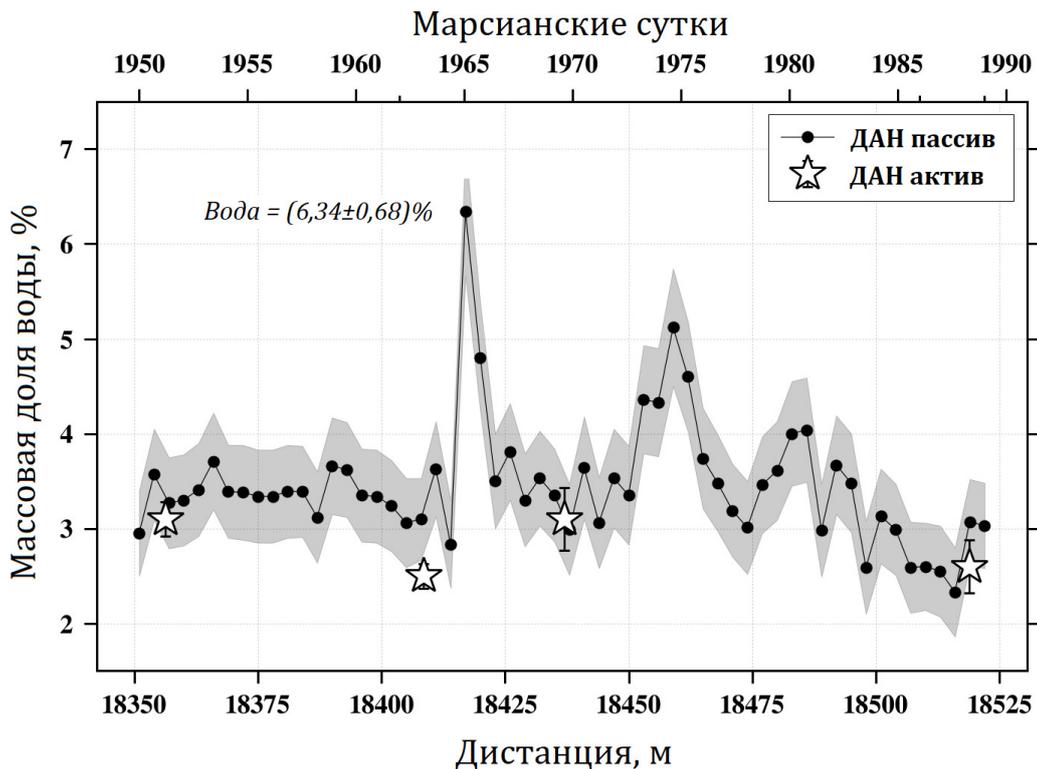


Рисунок 6. Измерения максимального значения воды для интервала пути между отметками 18 350 и 18 525 м (солы 1950-1989) (черные точки – оценка по измерениям нейтронного мониторинга, серая заливка – погрешность мониторинговых измерений, белые звезды – оценка по активным измерениям).

Раздел 7.4 описывает основные выводы о результатах прибора ДАН, которые были получены за более чем девять лет непрерывной работы на поверхности Марса.

В глава 8 «Каталогизация данных эксперимента ДАН по оценке содержания воды и хлора вдоль пути следования марсохода «Кьюриосити» в кратере Гейл» приведено описание методики составления каталога результатов измерений прибора ДАН, которые были представлены в виде пикселей регулярного размера вдоль пути движения марсохода.

В разделе 8.1 приводятся описание представления данных прибора ДАН в виде отдельных пикселей. Такой принцип обработки данных предлагается для анализа измерений ДАН вдоль трассы движения марсохода, которая включает в себя сложные пересекающиеся траектории.

Размер пикселя был выбран как 3x3 м в соответствии с пространственным разрешением активных измерений, имеющих диаметр 3 метра [21]. Такие пиксели называются «ПАД» (Пиксель с активными данными) и составляют 7% от общего 10 тысяч пикселей, покрывающих трассу в 27 км. Остальные 93% пикселей, называемые «ППД» (Пиксель с пассивными

данными), используются для оценки участков поверхности, которые были изучены методом нейтронного мониторинга.

В разделе 8.2 описывается алгоритм сопоставления пикселей с результатами прибора ДАН и привязки геологических районов кратера Гейл.

Марсоход движется через различные геологические регионы кратера, идентифицированные геологической командой проекта MSL. Наблюдаемая геология используется для создания стратиграфической колонки проекта, разделенной на неформальные группы, формации и фации [29]. Каждый пиксель результатов прибора ДАН относится к определенной геологической единице.

Общий результат проанализированных данных – карта оценки массовой доли воды с помощью данных нейтронного мониторинга прибора ДАН. На рисунке 7 показано распределение содержания воды на поверхности Марса вдоль маршрута марсохода «Кьюриосити». Место посадки обозначено звездой, также размер элементов был увеличен для наглядности. Карта отображает массовые доли содержания воды для каждого участка маршрута марсохода с градациями синего цвета, позволяя выявить участки с наибольшим и наименьшим содержанием воды.

Карта, созданная на основе анализа данных прибора ДАН, позволяет отслеживать изменения содержания воды при движении марсохода и выявлять участки с наибольшей и наименьшей концентрацией воды. Проходя вверх по кратеру, содержание воды увеличивается, что свидетельствует о присутствии гидратированных осадочных пород. Эти результаты указывают на возможное содержание водных структур в истории кратера.

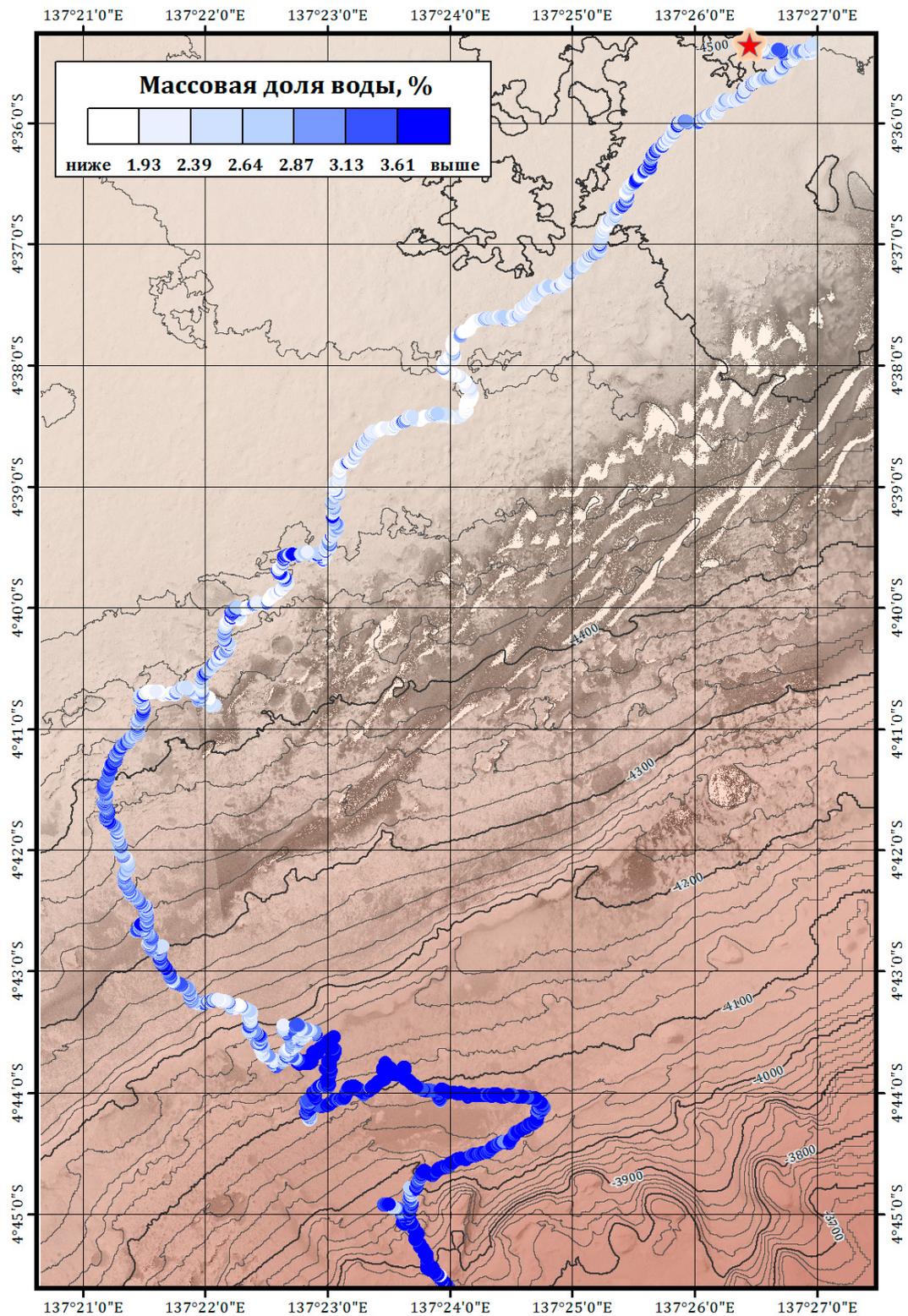


Рисунок 7. Карта распределения значений содержания воды, полученные с применением метода автора диссертационной работы для обработки данных нейтронного мониторинга прибора ДАН. Градациями синего указано содержание воды. Звездой обозначено место посадки.

В разделе 8.3 описывается табличный формат данных каталога прибора ДАН. Полная таблица научных данных представлена в Приложении 1 к диссертационной работе.

Таблица 2 содержит следующие столбцы: (1) - порядковый номер пикселя, (2) - обозначение его типа, либо «ПАД», либо «ППД», (3) - долгота и (4) - широта координат центра пикселя, (5) - ассоциированная геологическая единица стратиграфической колонки, (6) - расчетные значения воды (%) и (7) - значения эквивалентного хлора для «ПАД» (%).

Таблица 2. Таблица результатов измерений прибора ДАН для отдельных пикселей поверхности.

Порядковый номер пикселя	Тип пикселя	Долгота (центр пикселя)	Широта (центр пикселя)	Ассоциированная геологическая единица стратиграфической колонки	Значение воды (%)	Значение эквивалентного хлора (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
...
6106	ППД	137,36097	-4,71608	Murray / Sutton Island	6,1±0,7	-
...
8704.1	ПАД	137,39154	-4,73010	Carolyn Shoemaker / Knockfarrill Hill	4,83±0,27	1,07±0,14
...

Раздел 8.4 описывает основные выводы в Главе 8 о результатах прибора ДАН, которые были получены за более чем девять лет непрерывной работы на поверхности Марса.

В **Заключении** диссертационной работы приведены основные выводы представленного диссертационного исследования. Сформулированы основные задачи и их решения, которые позволили проанализировать научные данные прибора ДАН.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [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 // *JGR: Planets* – 2013 – 118(11) – 2400–2412. DOI: [10.1002/2013JE004510](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. DOI: [10.1016/j.icarus.2015.09.002](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. DOI: [10.1016/j.icarus.2017.08.022](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. DOI: [10.1016/j.icarus.2019.04.029](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. DOI: [10.1016/j.icarus.2020.113818](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 // *JGR: Planets* – 2022 – 127 – e2022JE007327. DOI: [10.1029/2022JE007327](https://doi.org/10.1029/2022JE007327)

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ РАБОТ

1. Boynton, W. V., [et al.]. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits // *Science* – 2002 – 297(5578) – 81–85. DOI: [10.1126/science.1073722](https://doi.org/10.1126/science.1073722)
2. Boynton, W. V., [et al.]. The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer instrument suite // *Space Sci. Rev.* – 2004 – 110(1/2) – 37–83. DOI: [10.1023/B:SPAC.0000021007.76126.15](https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000021007.76126.15)
3. Feldman, W. C., [et al.]. Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Science* – 2002 – 297(5578) – 75–78. DOI: [10.1126/science.1073541](https://doi.org/10.1126/science.1073541)
4. Feldman, W. C., [et al.]. Mars Odyssey neutron data: 2. Search for buried excess water ice deposits at nonpolar latitudes on Mars // *JGR* – 2011 – 116(E11) – E11009. DOI: [10.1029/2011JE003806](https://doi.org/10.1029/2011JE003806)
5. Mitrofanov, I. G., [et al.]. Soil Water Content on Mars as Estimated from Neutron Measurements by the HEND Instrument Onboard the 2001 Mars Odyssey Spacecraft // *Solar System Research* – 2004 – 38(4) – 253–257. DOI: [10.1023/B:SOLS.0000037461.70809.45](https://doi.org/10.1023/B:SOLS.0000037461.70809.45)
6. Mitrofanov, I. G., [et al.]. CO₂ snow depth and subsurface water-ice abundance in the northern hemisphere of Mars // *Science* – 2003 – 300(5628) – 2081–2084. DOI: [10.1126/science.1084350](https://doi.org/10.1126/science.1084350)
7. Mitrofanov, I. G., [et al.]. Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science* – 2002 – 297(5578) – 78–81. DOI: [10.1126/science.1073616](https://doi.org/10.1126/science.1073616)
8. Mitrofanov, I. G., [et al.]. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* – 2018 – 214(5) – 86. DOI: [10.1007/s11214-018-0522-5](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0522-5)
9. Mitrofanov, I. G., [et al.]. The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars // *Icarus* – 2022 – 374 – 114805. DOI: [10.1016/j.icarus.2021.114805](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114805)
10. Maurice, S., [et al.]. Mars Odyssey neutron data: 1. Data processing and models of water-equivalent-hydrogen distribution // *JGR* – 2011 – 116(E11) – E11008. DOI: [10.1029/2011JE003810](https://doi.org/10.1029/2011JE003810)
11. Sanin, A. B., [et al.]. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus* – 2017 – 283 – 20–30. DOI: [10.1016/j.icarus.2016.06.002](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002)
12. Malakhov, A. V., [et al.]. Ice Permafrost “Oases” Close to Martian Equator: Planet Neutron Mapping Based on Data of FREND Instrument Onboard TGO Orbiter of Russian-European ExoMars Mission // *Astron. Lett.* – 2020 – 46(6) – 407–421. DOI: [10.1134/S1063773720060079](https://doi.org/10.1134/S1063773720060079)
13. Abramov, O., Kring, D. A. Impact-induced hydrothermal activity on early Mars // *JGR: Planets* – 2005 – 110 (12) – 1–19. DOI: [10.1029/2005JE002453](https://doi.org/10.1029/2005JE002453)
14. Bibring, J.-P., [et al.]. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data // *Science* – 2006 – 312 (5772) – 400–404. DOI: [10.1126/science.1122659](https://doi.org/10.1126/science.1122659)
15. Grotzinger, J. P., [et al.]. Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // *Space Sci. Rev.* – 2012 - 170(1–4) – 5–56. DOI: [10.1007/s11214-012-9892-2](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9892-2)
16. Mitrofanov, I. G., [et al.]. Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA’s Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* – 2012 – 170(1–4) – 559–582. DOI: [10.1007/s11214-012-9924-y](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y)
17. Lisov, D. I., [et al.]. Data processing results for the active neutron measurements by the DAN instrument on the curiosity Mars rover // *Astron. Lett* – 2018 – 44 (7) – 482–489. DOI: [10.1134/S1063773718070034](https://doi.org/10.1134/S1063773718070034)
18. Golombek, M., [et al.]. Selection of the Mars science laboratory landing site // *Space Sci. Rev.* – 2012 – 170 (1–4) – 641–737. DOI: [10.1007/s11214-012-9916-y](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9916-y)
19. Litvak, M. L., [et al.]. Local variations of bulk hydrogen and chlorine-equivalent neutron absorption content measured at the contact between the Sheepbed and Gillespie Lake units in

- Yellowknife Bay, Gale Crater, using the DAN instrument onboard curiosity // *JGR: Planets* – 2014 – 119 (6) – 1259–1275. DOI: [10.1002/2013JE004556](https://doi.org/10.1002/2013JE004556)
20. Litvak, M. L., [et al.]. Hydrogen and chlorine abundances in the Kimberley formation of Gale crater measured by the DAN instrument on board the Mars Science Laboratory Curiosity rover // *JGR: Planets* – 2016 – 121 (5) – 838–845. DOI: [10.1002/2015JE004960](https://doi.org/10.1002/2015JE004960)
 21. Sanin, A. B., [et al.]. Data processing of the active neutron experiment DAN for a Martian regolith investigation // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* – 2015 – 789 – 114–127. DOI: [10.1016/j.nima.2015.03.085](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.085)
 22. Press Kit, “Mars Science Laboratory Landing” [Электронный ресурс] // *National Aeronautics and Space Administration* – July 2012.
https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/MSLLanding.pdf
 23. Arnold, J. R., [et al.]. Gamma rays in space, Ranger 3 // *JGR* – 1962 – 67(12) – 4878–4880. DOI: [10.1029/JZ067i012p04878](https://doi.org/10.1029/JZ067i012p04878)
 24. Drake, D. M., [et al.]. Martian neutron leakage spectra // *JGR* – 1988 – 93(B6) – 6353. DOI: [10.1029/JB093iB06p06353](https://doi.org/10.1029/JB093iB06p06353)
 25. (CH1) Jun, I., [et al.]. Neutron background environment measured by the Mars Science Laboratory’s Dynamic Albedo of Neutrons instrument during the first 100 sols // *JGR: Planets* – 2013 – 118(11) – 2400–2412. DOI: [10.1002/2013JE004510](https://doi.org/10.1002/2013JE004510)
 26. Djachkova, M. V., [et al.]. 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* – 2022 – 1–10. DOI: [10.1155/2022/6672456](https://doi.org/10.1155/2022/6672456)
 27. (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. DOI: [10.1016/j.icarus.2020.113818](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113818)
 28. (CH6) Mitrofanov, I. G., [et al.]. Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse // *JGR: Planets* – 2022 – 127 – e2022JE007327. DOI: [10.1029/2022JE007327](https://doi.org/10.1029/2022JE007327)
 29. Rampe, E. B., [et al.]. Mineralogy and geochemistry of sedimentary rocks and eolian sediments in Gale crater, Mars: A review after six Earth years of exploration with Curiosity // *Geochemistry* – 2020 – 80(2) – 125605. DOI: [10.1016/j.chemer.2020.125605](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125605)
 30. McKinney, G. W., [et al.]. MCNPX benchmark for cosmic ray interactions with the Moon // *JGR* – 2006 – 111(E6) – E06004. DOI: [10.1029/2005JE002551](https://doi.org/10.1029/2005JE002551)