

# Доклады научной сессии общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук – 12.11.2018

---

## Нейтронное картографирование Марса с высоким пространственным разрешением: первые результаты эксперимента ФРЕНД проекта «ЭкзоМарс»

И.Г. Митрофанов, А.В. Малахов, Д.В. Головин, М.Л. Литвак, А.Б. Санин и М.И. Мокроусов

Институт космических исследований Российской академии наук,

Москва 117910, ул. Профсоюзная, 84/42

*Аннотация.* На основе обработки первых данных картографирования нейтронного излучения Марса нейтронным телескопом ФРЕНД (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector, [1]) с борта Европейского орбитального аппарата ТГО (Trace Gas Orbiter, [2]) установлено, что на фоне известных ранее глобальных областей с высоким содержанием воды в приповерхностном слое наблюдаются локальные районы повышенной или пониженной массовой долей воды, характерный масштаб которых составляет около нескольких сотен километров. Сопоставление этих районов с геоморфологической картой поверхности Марса позволяет сделать выводы о процессах эволюции природной среды планеты и также о происхождении воды в верхних слоях ее поверхности.

### 1. Введение

Установлено [3 – 4], что измерения нейтронного излучения с поверхности планеты Марс предоставляют возможность обнаружения и измерения количества воды в верхнем слое поверхности с толщиной около 1 метра. Нейтроны с энергиями порядка нескольких десятков МэВ возникают в веществе небесного тела без атмосферы или с тонкой атмосферой вследствие бомбардировки поверхности энергичными частицами галактических космических лучей (ГКЛ). Поток и распределение по энергиям излучаемых нейтронов зависят от концентрации атомов водорода. Это связано с тем, что в процессе столкновений с ядрами вещества нейтроны замедляются и частично термализуются, причем при столкновении с ядром водорода (то есть с протоном) потери энергии оказываются сопоставимыми с энергией нейтрона до столкновения. Поэтому при увеличении концентрации водорода в веществе выходящий с поверхности поток надтепловых (эпитепловых) нейтронов уменьшается, а тепловых – увеличивается (при этом условие сохранения частиц не выполняется так как появляется дополнительный процесс захвата тепловых нейтронов протонами с образованием дейтронов).

Поскольку основным водородосодержащим соединением в марсианском веществе является вода, оценка концентрации ядер водорода позволяет определить массовую долю воды. Результаты численных расчетов показали, что зависимость потока эпитепловых нейтронов от присутствия в веществе воды является достаточно сильной (рис. 1). Так, при увеличении массовой доли воды в марсианском реголите от 1 до 10 процентов по массе, поток эпитепловых нейтронов с поверхности планеты уменьшается в 3 раза.

Первые карты распространенности воды в веществе приповерхностного слоя Марса были получены в 2002 году одновременно в российском эксперименте ХЕНД и американском эксперименте MONS на борту марсианского спутника НАСА «Марс Одиссей» [4 и 5]. Оба прибора имеют всенаправленные детекторы нейтронов, и поэтому их пространственное разрешение вариаций нейтронного потока определяется высотой орбиты 400 км и составляет около 600 км [6]. Этого разрешения оказалось достаточно для обнаружения огромных приполярных областей вечной мерзлоты на широтах выше 60° на севере и на юге и также двух протяженных района повышенного содержания воды вокруг областей Arabia и Memnonia. Однако такого разрешения недостаточно для изучения распределения воды на масштабах порядка нескольких сотен километров, соответствующих геоморфологическим и рельефным структурам марсианской поверхности. Можно сравнить эти карты распространенности воды со сглаженным изображением земных океанов, на котором не видны моря и заливы.

Приборы ХЕНД и MONS продолжают успешно работать на околомарсианской орбите уже более 16 лет, однако всенаправленный характер их измерений в принципе не позволяет повысить пространственное разрешение. В 2018 году американские участники эксперимента MONS предприняли попытку искусственно повысить пространственное разрешение полученной ими карты на основе метода PIXON, который обычно используется при обработке изображений с низким разрешением для его значительного повышения [7]. Однако известно, что улучшение качества изображений, полученных с низким разрешением, методом PIXON является модельно-зависимой процедурой и не обеспечивает условие «единственности решения». Только прямое измерение с потока нейтронов с высоким разрешением позволяет при накоплении необходимой статистики отсчетов получить достоверное изображений пространственных вариаций этого потока и оценить их статистическую погрешность.

## **2. Эксперимент с коллимированным нейтронным телескопом ФРЕНД на борту марсианского спутника ЕКА «ТГО»**

Следующим шагом после проекта «Марс Одиссей» для изучения распространённости воды под поверхностью Марса стал российско-европейский проект «ЭкзоМарс 2016», в ходе которого на околомарсианскую орбиту был выведен спутник «ТГО» [2]. Измерения нейтронного потока от Марса проводятся с борта «ТГО» российским нейтронным телескопом ФРЕНД, разработанным в Институте космических исследований Российской академии наук [1]. Физическая концепция этого прибора основана на более ранней разработке прибора ЛЕНД, который был создан для картографирования нейтронного излучения Луны с борта лунного аппарата НАСА «ЛРО» [8]. За продолжительный период наблюдений с 2008 года по настоящее время данные измерений этого прибора позволили построить карту распространенности водяного льда в полярных районах Луны с пространственным разрешением около 10 км [9]. Кроме нейтронного телескопа в состав аппаратуры ФРЕНД также входит дозиметр «Люлин» для регистрации заряженных частиц галактических космических лучей и солнечных протонных событий и для оценки эквивалентной радиационной дозы в межпланетном пространстве и на орбите вокруг Марса [10]. Данные дозиметра также используются для обработки данных измерений нейтронного потока от Марса с целью исключения эффекта его вариаций вследствие переменности галактических лучей.

Прибор ФРЕНД представляет собой нейтронный телескоп с ограниченным полем зрения, которое обеспечивает коллиматор налетающего потока нейтронов (таблица 1). Прибор имеет 4 одинаковых детектора эпитепловых нейтронов на основе пропорциональных

счетчиков  $^3\text{He}$  и детектор быстрых нейтронов из стибьбена, поля зрения которых ограничены стенками коллиматора. Стенки коллиматора с внешней стороны имеют слой полиэтилена с толщиной около 2 см. В полиэтилене происходит замедление потока налетающих нейтронов вплоть до тепловых энергий. Внутренний слой стенок со стороны детекторов содержит изотоп бора  $^{10}\text{B}$ , который имеет очень высокое сечение поглощения тепловых и эпитепловых нейтронов. В этом слое происходит поглощение замедлившихся нейтронов, и благодаря этому обеспечивается эффект коллимации для нейтронов из направлений вне поля зрения. Геометрический размер поля зрения определяется углом раскрытия коллиматора и определяется соотношением его геометрических размеров.

Для коллиматора ФРЕНДа геометрический полный угол раскрытия составляет  $16^\circ$ . Численные расчеты и наземные калибровки прибора позволили измерить функцию угловой чувствительности прибора [1]. Ее полная ширина на полувысоте (FWHM) составляет около  $14^\circ$ , что хорошо согласуется с геометрической оценкой. При регистрации потока нейтрона от поверхности Марса с орбиты ТГО высотой 400 км ширина функции угловой чувствительности соответствует диаметру поля зрения на поверхности около 100 км [1]. Эта величина определяет «физическое» пространственное разрешение прибора, которое может быть достигнуто при достаточной статистической обеспеченности измерений. Очевидно, что при построении карты нейтронного потока элементарные участки поверхности (пикселы) должны иметь размер, сопоставимый с указанной величиной. Однако следует учитывать, что изучение пространственной переменности нейтронного излучения должно быть основано на сопоставлении измеренных потоков нейтронов для разных пикселов. Поэтому для достоверной регистрации относительного различия потоков в двух разных пикселах на уровне  $\delta\%$  необходимо, чтобы относительная статистическая погрешность разницы их потоков была меньше, чем  $1/3 \delta\%$  (условие 3 сигма). Отсюда вытекает, что фактическая разрешающая способность телескопа для измерения пространственной переменности потока зависит от соотношения величины переменности и статистической обеспеченности измерений. Поэтому при проведении нейтронного картографирования следует пользоваться понятием «статистически обеспеченного» пространственного разрешения. Отсюда следует два важных вывода:

- 1) При заданной статистике отсчетов: чем больше относительная переменность потока, тем более высокое пространственное разрешение может быть достигнуто при картографировании.
- 2) При заданной величине относительной переменности: чем больше статистика отсчетов, тем выше пространственное разрешение, с которым эта переменность может быть обнаружена.

Очевидно, что во всех случаях пространственное разрешение прибора не может превышать величину, соответствующую его «физическому разрешению».

Таблица 1. Параметры нейтронного телескопа ФРЕНД

Параметр	Значение
Полная масса прибора (кг)	35
Полная потребляемая мощность (Вт)	11.4
Энергетические диапазоны измерения эпитепловых и быстрых нейтронов	0.4 эВ – 10 МэВ
Энергетические диапазоны измерения заряженных частиц	100 кэВ – 80 МэВ
Угловое разрешение нейтронного телескопа для эпитепловых нейтронов (FWHM, градусы)	14

## 2. Результаты измерений

Ниже представлены первые результаты картографирования нейтронного излучения Марса прибором ФРЕНД в сезонный период марсианского года с  $L_s = 170^\circ - 247^\circ$ , который соответствует интервалу времени от 3 мая до 10 сентября 2018 гг. Этот период составляет всего около 14% от полного времени нейтронного картографирования, запланированного для миссии ТГО [2]. Однако обработка данных измерений для этого начального периода показала, что благодаря своему высокому пространственному разрешению прибор ФРЕНД позволяет обнаружить локальные районы с размерами  $< 300$  км, для которых концентрация воды существенно отличается от значений, полученных на основе предшествующих измерений всенаправленными детекторами.

Для картографирования исходных данных были выбраны элементарные участки на поверхности (пикселы) с размером  $5^\circ \times 5^\circ$  (эквивалентный масштаб на экваторе соответствует  $300 \times 300$  км). Во время орбитального картографирования в каждом пикселе накапливаются отсчеты регистрации эпитепловых нейтронов и время пролета аппарата над ним (время экспозиции). Полное число отсчетов включает как измерения нейтронов от марсианской поверхности (отсчеты *сигнала*), так и отсчеты от нейтронов, которые возникли в веществе космического аппарата под воздействием частиц ГКЛ (отсчеты *фона*). Вклад отсчетов фона был оценен на основе летных калибровок прибора на этапе межпланетного перелета. До построения карты нейтронного излучения измеренные отсчеты корректировались с учетом переменной эффективности детекторов прибора и также для исключения эффекта переменной ГКЛ на основе данных измерений дозиметра «Люлин».

На рисунке 3а представлена первая карта излучения эпитепловых нейтронов по данным начального этапа измерений телескопа ФРЕНД. На рисунке 3б также представлена карта излучения эпитепловых нейтронов, полученная на основе данных прибора ХЕНД за этот же период наблюдений. Для обеих карт используется одинаковая отнормированная шкала темпа счета, что позволяет выполнить их детальное сравнение и найти локальные районы пространственной переменной, обнаруженные на фоне карты прибора ХЕНД благодаря более высокому пространственному разрешению телескопа ФРЕНД.

Для нормировки шкалы представленных карт применялись две процедуры. Во-первых, была проведена относительная кросс-нормировка темпов счета приборов ФРЕНД и ХЕНД, учитывающая различие в эффективности этих двух приборов. Для этого были построены усредненные широтные профили пространственной переменной нейтронного излучения и определен коэффициент относительной нормировки отсчетов прибора ХЕНД, который позволяет совместить эти два профиля в пределах широтного пояса от  $40^\circ$  ю.ш. до  $40^\circ$  с.ш. (рис. 2). За пределами этого широтного пояса поток нейтронного излучения испытывает сезонные вариации, которые два прибора могут регистрировать по-разному вследствие различного пространственного разрешения. Удовлетворительное совпадение двух профилей в пределах указанного широтного пояса подтверждает, что крупномасштабная переменность нейтронного потока от Марса обоими приборами наблюдается одинаково.

Во-вторых, была проведена абсолютная нормировка шкалы отсчетов. По данным измерений потока нейтронов и гамма-лучей приборами ХЕНД, MONS и GRS проекта Марс Одиссей было установлено, что наиболее вероятное содержание воды в области Solis Planum составляет около 2% по массе [6]. Исходя из этого факта, темп счета нейтронов для области Solis Planum с координатами  $115^\circ \dots 65^\circ$  з.д. и  $55^\circ \dots 15^\circ$  ю.ш. был отнормирован на 1. Благодаря абсолютной нормировке шкалы отсчетов стало возможно определить массовую долю воды в веществе поверхности на основе известного закона относительной переменной потока эпитепловых нейтронов в зависимости от массовой доли воды (рис.

1). Соответственно, на рисунке 2 цветовая шкала относительной переменности темпа счета нейтронов сопровождается оценкой массовой доли воды в веществе.

Вообще говоря, на картах двух приборов наблюдается сходство переменности массовой доли воды в веществе планеты. Хорошо заметны околополярные области марсианской вечной мерзлоты с высоким содержанием воды. Если формально определить границу этих областей, как линия изоуровня для 5% массовой доли воды, то эти границы по данным обоих приборов практически везде совпадают (рис. 2). Вместе с тем, в некоторых локальных районах поверхности наблюдается значительное различие в оценках содержания воды, которое возникает благодаря более высокому пространственному разрешению прибора ФРЕНД. Так, например, в районах Utopia Planitia и Amazonis Planitia наблюдаются значительные отклонения в сторону экватора границы северной вечной мерзлоты по сравнению с ее границей по данным прибора ХЕНД.

Для отождествления локальных районов вариаций содержания воды в марсианском грунте по данным прибора ФРЕНД на фоне усредненных значений по данным прибора ХЕНД был выполнен поиск локальных групп пикселей, для которых данные измерений двух приборов статистически значимо различаются друг относительно друга. В результате этого поиска были обнаружены 6 «влажных» локальных районов с пониженным потоком излучения нейтронов (*Neutron Suppression Regions, NSR*) и 5 «сухих» локальных районов с повышенным потоком нейтронов (*Neutron Excess Regions, NER*). Оценки содержания воды в этих районах и их расположение на поверхности Марса представлены в таблице 2 и на рисунках 4 – 5.

Таблица 2. Локальные районы с повышенным (NSR) или с пониженным (NER) содержанием воды по данным прибора ФРЕНД

Тип и номер района	Статистическая значимость в величинах сигма	Оценка массы воды (%) по ФРЕНД	Оценка массы воды (%) по ХЕНД	Область на поверхности Марса
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Локальные районы с пониженным излучением нейтронов (NSR) и соответственно с повышенным содержанием воды				
NSR1	3.2	$7.0^{+1.2}_{-0.9}$	$4.3^{+0.3}_{-0.2}$	Utopia Planitia
NSR2	5.3	$6.8^{+0.8}_{-0.7}$	$4.0 \pm 0.2$	Amazonis Planitia
NSR3	3.2	$6.7^{+1.1}_{-0.9}$	$4.3 \pm 0.2$	Memnonia Fossae
NSR4	3.6	$6.6^{+1.4}_{-1.0}$	$3.6 \pm 0.2$	Ismenia Fossae
NSR5	3.5	$6.6^{+2.4}_{-1.6}$	$2.6 \pm 0.3$	Область между Terra Sirenum и Daedalia Planum
NSR6	3.3	$4.5 \pm 0.5$	$3.1 \pm 0.2$	Noachis Terra
Локальные районы с повышенным излучением нейтронов (NER) и соответственно с пониженным содержанием воды				
NER1	3.1	$1.6^{+0.4}_{-0.3}$	$3.3 \pm 0.4$	Область между Chryse Planitia и Arabia Terra
NER2	4.6	$2.0 \pm 0.2$	$3.3 \pm 0.2$	К западу от Tharsis Montes
NER3	3.5	$2.2 \pm 0.4$	$4.6^{+0.5}_{-0.4}$	К югу от Alba Mons
NER4	4.0	$2.4 \pm 0.3$	$4.3 \pm 0.3$	К западу от Olympus Mons
NER5	6.0	$3.3 \pm 0.3$	$5.9 \pm 0.3$	Область между Maridiani Planum и Terra Sabaea

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Район NSR1 с наибольшим содержанием воды  $7.0_{-0.9}^{+1.2}$  (Таблица 2) представляет собой направленный в сторону экватора «язык» на границе северной вечной мерзлоты в области Utopia Planitia (рис. 4). Район NSR1 хорошо совпадает с рельефным образованием в Hrad Vallis, природа которого вероятно связана с потоком лавы, который сопровождался катастрофическим наводнением [11] во время Амазонской эпохи. Кроме этого, район NSR1 находится на границе древнего вулкана Hecates Tholus, для которого были обнаружены признаки относительно недавней ледниковой активности, которая имела место 5 – 20 миллионов лет тому назад [12]. Примерно такое же содержание воды  $6.8_{-0.7}^{+0.8}$  имеет район NSR2, который также представляет собой «язык» границы северной вечной мерзлоты на границе области Amazonis Planitia [13]. Если оба района, NSR1 и NSR2, действительно являются вытянувшимися в сторону экватора частями северной вечной мерзлоты, то наиболее вероятной формой воды в веществе этих районов является водяной лед. В таком случае водяной лед в марсианском грунте впервые наблюдается в такой непосредственной близости от экватора, на широтах около  $20^{\circ}$  с.ш.

Три локальных «сухих» района NER 2 – 4 (Таблица 2) расположены в непосредственной близости от трех древних марсианских вулканов (рис. 4): NER2 рядом с Tharsis Montes, NER3 рядом с Alba Mons и NER4 рядом с Olympus Mons. Сухие области в окрестности этих вулканов могут указывать на то, что никакой процесс накопления воды в извергнутой породе не происходил за все время после их извержений 3.2 – 3.6 миллиардов лет тому назад [14, 15].

В центральной части обеих карт хорошо виден обширный район в повышенном содержании воды, название которого традиционно связывают с областью Arabia Terra (рис. 3). На рисунке 5 видно, что условная граница этого района вдоль изолинии, соответствующей 4% воды, проходит значительно за пределами области Arabia Terra. Вероятно, лучшим названием этого обширного района может стать *Giant Water-rich Territory* (GWT). На северо-востоке границу GWT определяет район NSR4 с достаточно высоким содержанием воды около 7% (см. Таблицу 2). С другой стороны, район NSR6 в области земли Ноя может рассматриваться, как южная оконечность GWT (рис. 5). Практически в центре GWT расположен локальный «сухой» район NER5, в котором оценка количества воды составляет всего около 3% (см. Таблицу 2). Этот район разделяет GWT на северную и южную части. Южная часть GWT включает область Noachis Terra, которая гораздо старше, чем области в северной части GWT.

Поскольку северная и южная части GWT имеют примерно одинаковое содержание воды в грунте 4 – 6%, но при этом у них разный возраст и геоморфологическое происхождение, можно предположить, что повышенное содержание воды в GWT не связано с процессами формирования и эволюции поверхности, а вызвано какой-либо внешней причиной глобального характера. Следует отметить, что геометрический центр GWT имеет координаты около  $10^{\circ}$  в.д. и  $15^{\circ}$  с.ш. (рис. 4). Следует отметить, что примерно диаметрально противоположно этой точке находится район NSR3 (рис. 3) с массовой долей воды  $6.7_{-0.9}^{+1.1}$  %. Можно предположить, что вода в грунте областей GWT и NSR3 накопилась в раннюю эпоху, когда в них находились полярные районы Марса.

#### 5. Заключение

Сопоставление карты содержания воды в марсианском грунте полученной по данным эксперимента ФРЕНД с геоморфологической картой поверхности Марса позволяет сделать вывод, что в ходе эволюции планеты вероятно имели место три различных процесса, которые определили современную картину распространенности воды в верхнем слое марсианской поверхности.

Во-первых, районы с повышенным содержанием воды около 5 – 7 % наблюдаются в участках поверхности, которые образовались в раннюю Амазонийскую эпоху 3.5 – 2.0 млрд. лет тому назад. Эти районы, примерами которых являются NSR1 и NSR2 (рис. 4), вероятно образовались под воздействием потоков лавы древних вулканов и сопровождавших их катастрофических наводнений вследствие истечения на разогретую поверхность воды из недр планеты [11]. Кроме этого, район NSR1 находится на границе древнего вулкана Купол Гекаты, для которого были обнаружены признаки относительно недавней ледниковой активности, которая имела место 5 – 20 миллионов лет тому назад. Те области в окрестности вулканов, куда не попадали потоки глубинной воды остались сухими со времен Амазонийской эпохи. Примером этих «сухих» районов являются NER2 – 4.

Во-вторых, протяженные области вечной мерзлоты с высоким содержанием воды более 5 – 7 % наблюдаются вокруг северного и южного полюсов Марса выше 60° с.ш. и ю.ш. Северный и южный районы имеют сопоставимое содержание воды, наиболее вероятно в форме водяного льда, при том, что их поверхности существенно различаются по возрасту и по геоморфологии. Известно, что наблюдаемые границы областей вечной мерзлоты (рис. 3) хорошо согласуются с предсказанной границей стабильности водяного льда в верхнем слое реголита для современных значений наклона оси вращения Марса 25° и эллиптичности его орбиты [16]. Вследствие гравитационных возмущений эти параметры существенно изменяются с характерным временем от десятков до сотен тысяч лет. При этом значительно меняются условия нагрева поверхности, и, соответственно условия стабильности водяного льда. Так, при наклоне оси 32° водяной лед может сохраняться на всей поверхности планеты [16]. Таким образом, границы областей вечной мерзлоты на Марсе определяются текущими параметрами его вращения и орбитального движения и обеспечиваются процессами конденсации и сублимации водяного пара между поверхностью и атмосферой. Отсюда можно сделать вывод, что граница современной вечной мерзлоты около 60° с.ш. и ю.ш. имеет возраст порядка нескольких десятков тысяч лет.

В-третьих, на экваториальных и умеренных широтах Марса наблюдаются две диаметрально расположенные протяженные области с высоким содержанием воды. Возможно что эти области также связаны с полюсами планеты, но с теми, которые располагались в их окрестности в раннюю историческую эпоху Марса. Гипотезы о произошедшем в прошлом значительном повороте коры и мантии планеты относительно ядра неоднократно обсуждались в литературе (см. напр. [17, 18]). Можно предположить, что после поворота полюсов районы вечной мерзлоты вокруг древних полюсов утратили скопившийся на них водяной лед, но значительная часть воды сохранилась в веществе реголита в связанной форме.

Согласно плану научных исследований проекта ЭкзоМарс, дальнейшие наблюдения Марса нейтронным телескопом ФРЕНД позволят накопить статистику нейтронов, которая в 5 – 10 раз превысит современное значение. Это даст возможность существенно, в 2 – 3 раза, повысить пространственное разрешение карты содержания воды в веществе поверхности, и тем самым получить возможность исследовать структурные детали рельефа с разрешением порядка 100 км. Это, в свою очередь, позволит продвинуться в исследовании роли воды в процессах формирования отдельных деталей на поверхности Марса, так

например предоставит возможность изучения распространенности воды внутри и в окрестности крупных ударных кратеров этой планеты.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЕКА за участие в наземных испытаниях и отработке аппаратуры ФРЕНД и успешное начало реализации проекта ЭкзоМарс 2016. Данная работа была выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций в рамках темы «ОСВОЕНИЕ» №АААА-А18-118012290370-6.

### Подписи к рисункам

Рис. 1. Относительная зависимость эмиссии эпитепловых нейтронов от содержания воды в грунте, численно смоделированная для стандартного марсианского грунта. Исходный темп счета 1 отсчет в секунду выбран для обозначения 2% массовой доли водорода (показано штрих линией). Линии точек показывают минимальный и максимальный измеренный темп счёта. Эта калибровка применена на карте ФРЕНД на рис. 3.

Рис. 2. Широтные профили темпов счёта эпитепловых нейтронов ФРЕНД и ХЕНД, усреднённые по широтам (сплошные и пунктирные линии, соответственно). Применена кросс-нормировка для получения единых усреднённых значений на сезонно-независимом широтном поясе  $40^\circ$  ЮШ ...  $40^\circ$  СШ. Четыре последовательных интервала  $L_s$  [ $170^\circ$ - $187^\circ$ ], [ $187^\circ$ - $207^\circ$ ], [ $207^\circ$ - $227^\circ$ ] и [ $227^\circ$ - $247^\circ$ ] показывают переменность нейтронной эмиссии вне этого широтного пояса, связанную с появлением сезонной углекислой снежной шапки в осенний период в северном полушарии и исчезновение аналогичной шапки в весенний период в южном полушарии [19].

Рис. 3. Карты темпа счёта эпитепловых нейтронов прибора ФРЕНД (3а, наверху) за период с 3 мая по 10 сентября 2018, соответствующая  $L_s$  [ $170^\circ$ - $247^\circ$ ] и ХЕНД за всё время измерений (3б, внизу), показывающая отсчёты в секунду, с значением 1 соответствующим 2% массовой доли (wt%) воды в марсианском грунте. Соответствующее содержание воды в wt% так же показано на цветовой шкале. Черные контуры показывают линию изоуровня 5 wt% воды для каждого прибора. Пунктирная линия на карте ФРЕНД показывает изолинию 5 wt% по данным ХЕНД, для сравнения. Рельеф построен по данным MOLA [20]. Зелёная и красная точки показывают отобранные места посадки ЭкзоМарс и Марс Ровер 2020 соответственно.

Рис 4. Регион вулканической активности с обозначенными областями повышенного (NER) и пониженного (NSR) темпа счёта эпитепловых нейтронов. Черная сплошная линия соответствует изоуровню 5 wt% воды в грунте по данным ФРЕНД.

Рис. 5. Регион Giant Water Rich Territory с обозначенными областями повышенного (NER) и пониженного (NSR) темпа счёта эпитепловых нейтронов. Черная сплошная линия соответствует изоуровню 5 wt% воды в грунте, черная пунктирная линия соответствует изоуровню 4% wt% воды в грунте по данным ФРЕНД.

### Рисунки

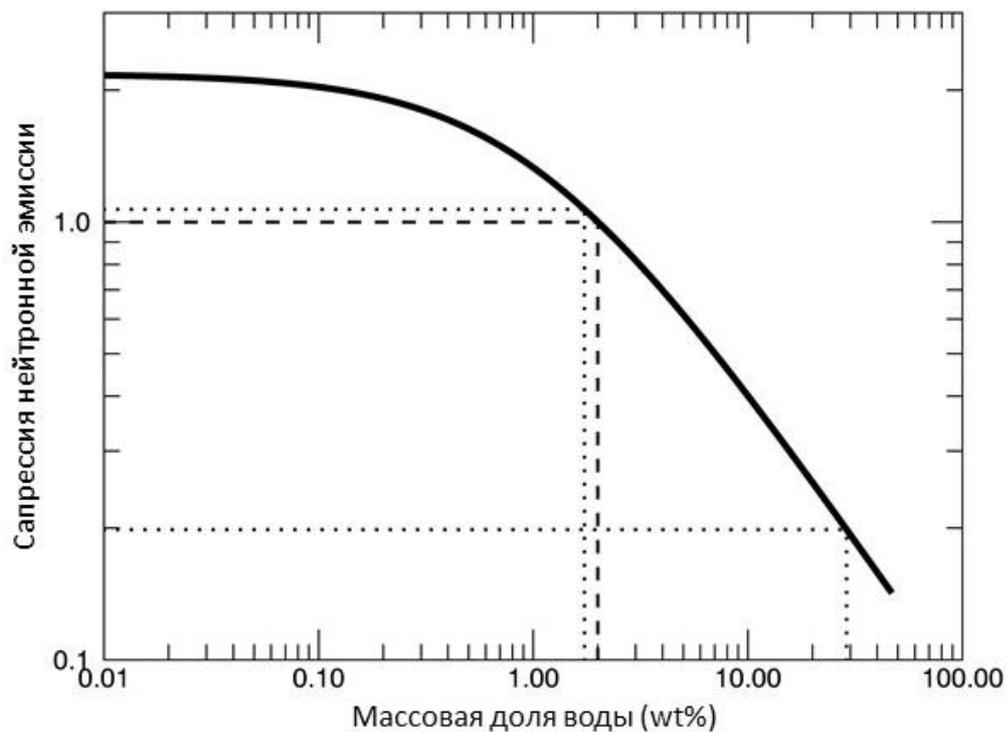


Рис. 1. Кривая супрессии нейтронной эмиссии в зависимости от массовой доли воды в грунте Марса

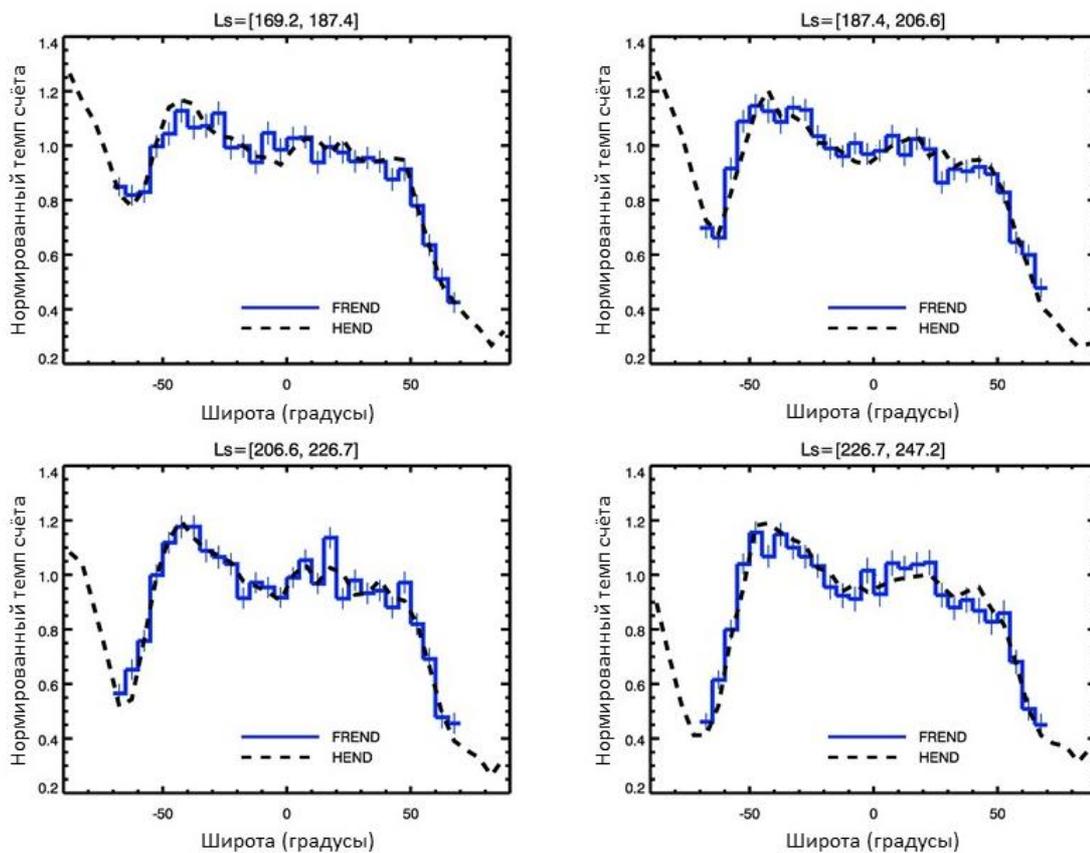


Рис. 2. Широтные кривые средних темпов счёта ФРЕНД и ХЕНД для разных времён года.

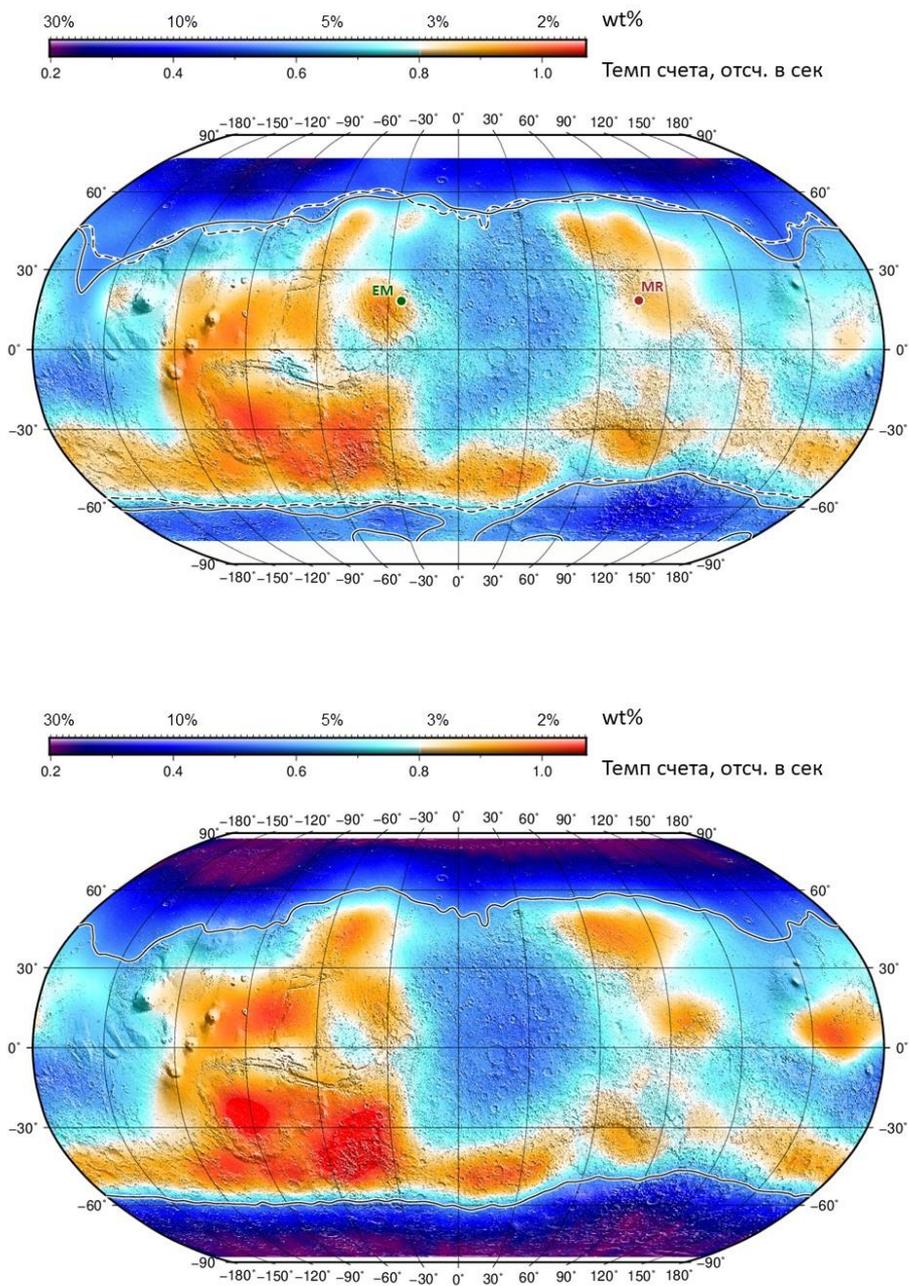


Рис. 3а (наверху). Карта содержания воды по данным ФРЕНД.  
Рис. 3б (внизу). Карта содержания воды по данным ХЕНД

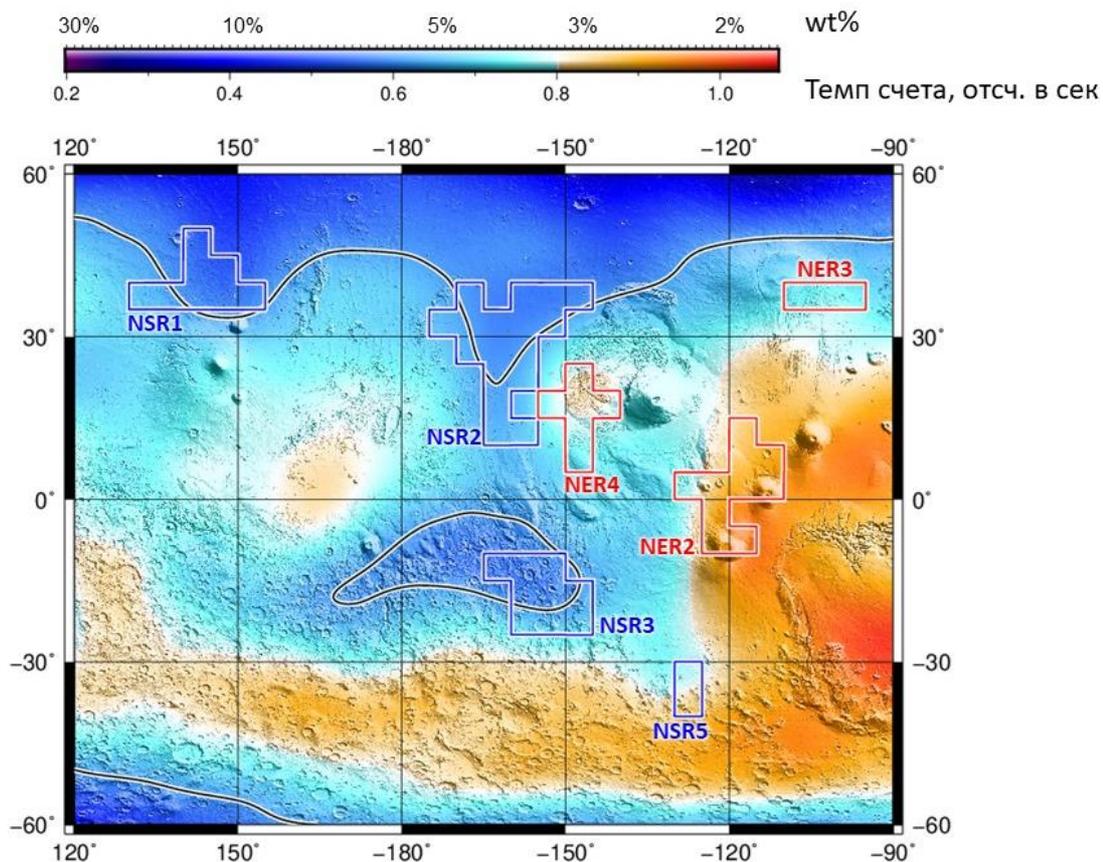


Рис. 4. Район великих вулканов и области повышенного (NER) и пониженного (NSR) темпа счёта ФРЕНД.

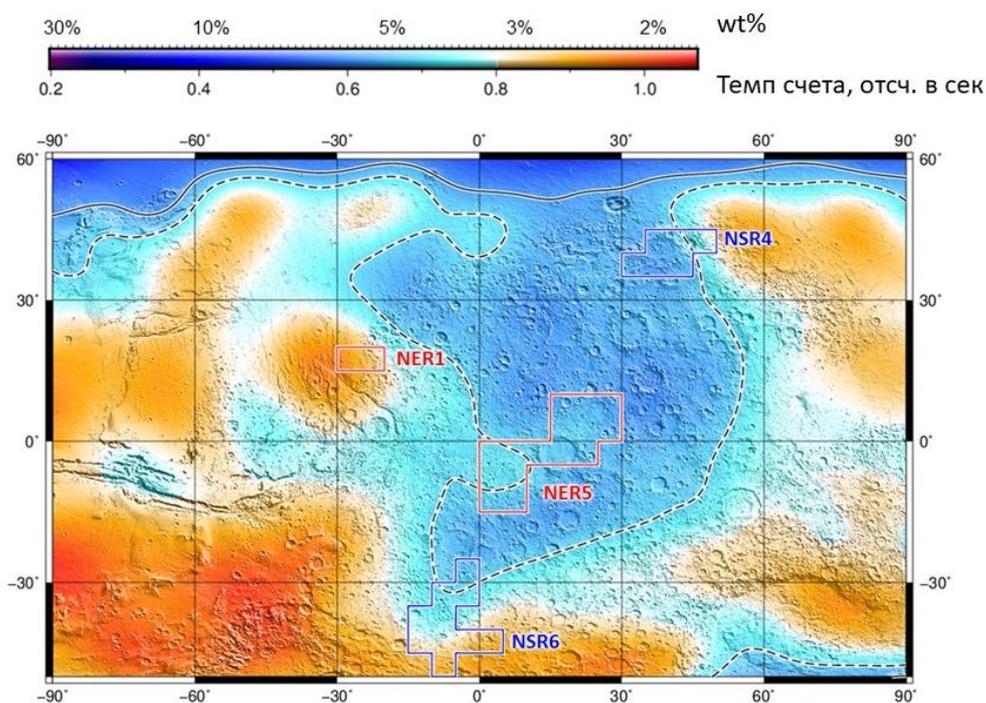


Рис. 5. Район Арабии и области повышенного (NER) и пониженного (NSR) темпа счёта ФРЕНД

## Ссылки

1. Mitrofanov, I. et al. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter. *Space Science Reviews*, **214**, 86 (2018).
2. Vago, J. et al. ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars. *Solar System Research*, **49**, 7 (2015).
3. Drake, D., Feldman, W. C., Jakosky, B. M. Martian neutron leakage spectra. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 6353-6368 (1988).
4. Mitrofanov, I. et al. Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey. *Science*, **297**, 78-81 (2002).
5. Boynton, W. V. et al. Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits. *Science*, **297**, 81-85 (2002).
6. Mitrofanov, I. G. et al. Search for Water in Martian Soil Using Global Neutron Mapping by the Russian HEND Instrument Onboard the US 2001 Mars Odyssey Spacecraft, *Solar System Research*, **37**, 5 (2003).
7. Wilson, J.T. et al. Equatorial locations of water on Mars: Improved resolution maps based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data, *Icarus*, **299**, 148-160 (2018).
8. Mitrofanov, I. et al. Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter. *Space Science Reviews*, **150**, 183-207, (2010).
9. Sanin, A. et al, Hydrogen distribution in the lunar polar regions. *Icarus*, **283**, 20-30 (2017).
10. Semkova, J. et al., Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FREND instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit. *Icarus*, **303**, 53-66 (2018).
11. Hamilton C. W., Mouginiis-Mark P. J., Sori M.M., Scheidt S. P., & Bramson A. M, Episodes of aqueous flooding and effusive volcanism associated with Hrad Vallis, Mars. *JGR Planets*, **123**, 1484–1510 (2018).
12. Huber E. et al. Discovery of a flank caldera and very young glacial activity at Hecates Tholus. *Nature*. **434**, 7031 (2005).
13. Fuller E. R., Head J. W. Amazonis Planitia: The role of geologically recent volcanism and sedimentation in the formation of the smoothest plains on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **107**, E10 (2002).
14. Werner, S.C.; Tanaka, K.L.; Skinner, J.A. Mars: The Evolutionary History of the Northern Lowlands Based on Crater Counting and Geologic Mapping. *Planet. Space Sci.*, **59**, 11-12 (2011).
15. Hartmann, W.K. Martian Cratering 8: Isochron Refinement and the Chronology of Mars. *Icarus*. **174**, 2 (2005).
16. Bouley, S.; Baratoux, D.; Matsuyama, I.; Forget, F.; Sejourne, A.; Turbet, M.; Costard, F. Late Tharsis formation and implications for early Mars. *Nature*, 2016; DOI: 10.1038/nature17171.
17. Melon, M.T., Jakosky, B.M. The distribution and behavior of Martian ground ice during past and present epochs. *Journal of Geophys. Research*, v. 100, No. E6, pages 11,781 – 11,799 (1995).
18. Arkani-Hamed, J., (2001). Paleomagnetic pole positions and reversals of Mars. *Geophys. Res. Letters*, **28**, 3409-3412.
19. Litvak M.L. et al. Comparison between polar regions of Mars from HEND/Odyssey data. *Icarus*, **180**, 23-37 (2006).
20. Smith, D. et al. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical research*, **106**, 23689-23722 (2001).