

УДК 520.6

ФИЗИЧЕСКИЕ КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННОГО ТЕЛЕСКОПА ФРЕНД, УСТАНОВЛЕННОГО НА БОРТУ МАРСИАНСКОГО СПУТНИКА TGO

© 2022 г. А. В. Малахов¹, *, И. Г. Митрофанов¹, М. Л. Литвак¹, А. Б. Санин¹, Д. В. Головин¹, М. В. Дьячкова¹, С. Ю. Никифоров¹, А. А. Аникин¹, Д. И. Лисов¹, Н. В. Лукьянов¹, М. И. Мокроусов¹, В. Н. Швецов², Г. Н. Тимошенко²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*malakhov@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 10.01.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В статье представлены результаты наземной калибровки нейтронного телескопа ФРЕНД на борту космического аппарата TGO российско-европейского проекта ЭкзоМарс. Основная задача космического эксперимента ФРЕНД – измерение содержания водорода в приповерхностном слое Марса на глубину до 1 м. На основе данных измерений строятся карты массовой доли воды в грунте с высоким пространственным разрешением. В ходе наземных физических калибровок были получены оценки эффективных площадей и измерены функции угловой чувствительности для каждого из пяти детекторов прибора ФРЕНД. Показано, что измерительные характеристики прибора ФРЕНД соответствуют заявленным научным задачам и позволяют обнаруживать и исследовать локальные области с повышенным содержанием воды/водяного льда на поверхности Марса с высоким пространственным разрешением 60–200 км.

DOI: 10.31857/S0023420622010095

ВВЕДЕНИЕ

Методы нейтронной и гамма-спектроскопии давно используются в космических экспериментах для исследования состава поверхности небесных тел Солнечной системы. Под воздействием высокоэнергичных заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ) в приповерхностном слое грунта небесных тел, не имеющих сильного магнитного поля и толстой атмосферы, генерируется вторичное нейтронное и гамма-излучение, потоки и энергетические спектры которого зависят от элементного состава грунта (см., например [1]). В частности, измерения вариаций нейтронного альbedo в разных энергетических диапазонах позволяют оценить содержание водорода в приповерхностном слое грунта с толщиной около 1 м. Если предположить, что весь обнаруженный водород входит в состав молекул H₂O, то по оценке массовой доли водорода можно оценить массовую долю воды в грунте небесного тела. В свою очередь, по массовой доле воды можно определить форму ее содержания в грунте: при низком содержании порядка 5–10% наиболее вероятной формой является адсорбированная вода на поверхности частиц грунта; содержание от 10 до 30% обычно отождествляют с химически свя-

занной водой в составе гидратированных минералов; наконец массовая доля более 30% скорее всего указывает на наличие в грунте водяного льда. Подобные измерения уже были выполнены в ранних планетных исследованиях для Луны, Марса, Меркурия и некоторых малых планет (см., например [2]).

Измерение массовой доли воды в грунте небесного тела выделяется в отдельную научную задачу космического проекта, для решения которой достаточно использовать нейтронный детектор тепловых, надтепловых и быстрых нейтронов. Длительные орбитальные наблюдения позволяют построить глобальные карты вариаций нейтронного альbedo поверхности и определить на их основе глобальное распределение воды в приповерхностном грунте. Так, по данным нейтронного спектрометра LPNS, установленного на орбитальном аппарате NASA Lunar Prospector было обнаружено повышенное содержание водорода в грунте полярных районов Луны [3]. Этот эффект было предложено интерпретировать как присутствие водяного льда в вечно затененных полярных кратерах [3]. Измерения российского прибора ХЕНД и американского прибора MONS на борту спутника NASA Mars Odyssey позволили

построить глобальные карты распределения воды в грунте Марса [4–6]. Эксперимент с нейтронным спектрометром на борту аппарата NASA *MESSENGER* выявил наличие водяного льда в холодных ловушках на северном полюсе Меркурия [7]. В этом ряду следует особо отметить эксперимент ЛЕНД на борту американского лунного спутника *LRO* [8], смотрите ниже.

Дело в том, что важную роль в анализе данных нейтронного картографирования поверхности небесного тела играет сопоставление обнаруженных областей с повышенным содержанием воды льда с локальными особенностями рельефа и геохимическими свойствами поверхности. Это может дать ответ на вопрос о происхождении наблюдаемых залежей воды в современную эпоху и о гидрологической эволюции планеты в прошлом. Пространственное разрешение всенаправленных нейтронных детекторов примерно равно 1.5 высоты орбиты космического аппарата. Например, высота круговой орбиты лунного спутника NASA *LRO* составляла около 50 км, и пространственное разрешение всенаправленных нейтронных детекторов прибора ЛЕНД, установленного на его борту, оценивалось как 75 км [9]. Для прибора ХЕНД на борту спутника NASA *Mars Odyssey* с высотой орбиты около 400 км пространственное разрешение на поверхности составило около 600 км [10]. Такое относительно низкое пространственное разрешение не позволяет провести прямое сопоставление данных нейтронных измерений с расположением отдельных кратеров или локальных областей с гораздо меньшим размером, где по данным других экспериментов были обнаружены геоморфологические особенности поверхности.

Решить такую задачу можно на основе применения метода коллимации нейтронного потока в космическом орбитальном эксперименте, регистрируя только те нейтроны, которые попали в детектор из узкого телесного угла, направленного в нади́р. Первым таким экспериментом для космических исследований является российский эксперимент с нейтронным телескопом ЛЕНД на борту лунного спутника NASA *LRO* запущенного в 2009 г. [8, 11]. Он позволил при картографировании лунных полюсов достичь пространственного разрешения до 5 км (полуширина на полувысоте с орбиты в 50 км) и тем самым сопоставить данные по вариациям нейтронных потоков с расположением вечно затененных полярных кратеров. Благодаря этому свойству прибора ЛЕНД было впервые показано, что не все вечно затененные кратеры содержат водяной лед, и при этом часть льдистой вечной мерзлоты может находиться под освещаемой Солнцем поверхностью в окрестности полюсов [8, 12].

Успешный опыт эксперимента ЛЕНД был использован для разработки нейтронного телескопа

ФРЕНД (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector) для марсианских исследований. Этот прибор установлен на борту марсианского спутника *Trace Gas Orbiter (TGO)* российско-европейского проекта ЭкзоМарс, запуск которого состоялся в марте 2016 г. [13]. В научные задачи эксперимента ФРЕНД входит построение карт распространенности воды в приповерхностном грунте Марса с гораздо более высоким пространственным разрешением, чем то, которое было достигнуто в предыдущих экспериментах ХЕНД или MONS (около 600 км). С мая 2018 г. на борту *TGO* практически непрерывно проводится нейтронное картографирование марсианской поверхности нейтронным телескопом ФРЕНД. Обработка данных измерений за первые 40 дней миссии позволила обнаружить несколько локальных областей на Марсе, совпадающих с геоморфологическими структурами рельефа поверхности планеты, в которых может присутствовать водяной лед [14].

В данной статье приведены результаты наземных физических калибровок нейтронного телескопа ФРЕНД, необходимые для обработки и интерпретации данных измерений этого космического эксперимента.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ФРЕНД

Выше отмечалось, что марсианское нейтронное альbedo возникает за счет взаимодействия заряженных частиц с атмосферой и приповерхностным слоем грунта Марса (см., например [1]). В результате взаимодействия заряженных частиц ГКЛ и ядер вещества планеты рождаются быстрые нейтроны с энергиями около 20 МэВ. Эти нейтроны, диффундируя в грунте, теряют энергию при столкновениях с ядрами породообразующих элементов и замедляются до надтепловых или тепловых энергий. Часть нейтронов вылетает из-под поверхности в атмосферу Марса и достигает орбиты, где они регистрируются нейтронным детектором. Спектральная плотность потока вылетающих с поверхности нейтронов зависит от содержания водорода: массы ядра водорода (протона) и нейтрона равны, и поэтому в столкновениях с ядрами водорода быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются или даже термализуются. Таким образом, повышение содержания водорода в грунте приводит к более эффективному замедлению быстрых нейтронов: соответственно, в потоке вылетающих с поверхности нейтронов доля быстрых и надтепловых частиц уменьшается, а доля тепловых частиц увеличивается. В эксперименте ФРЕНД проводится картографирование потока надтепловых и быстрых нейтронов для определения содержания водорода в приповерхностном слое грунта глубиной до 1 м (см. [14]).

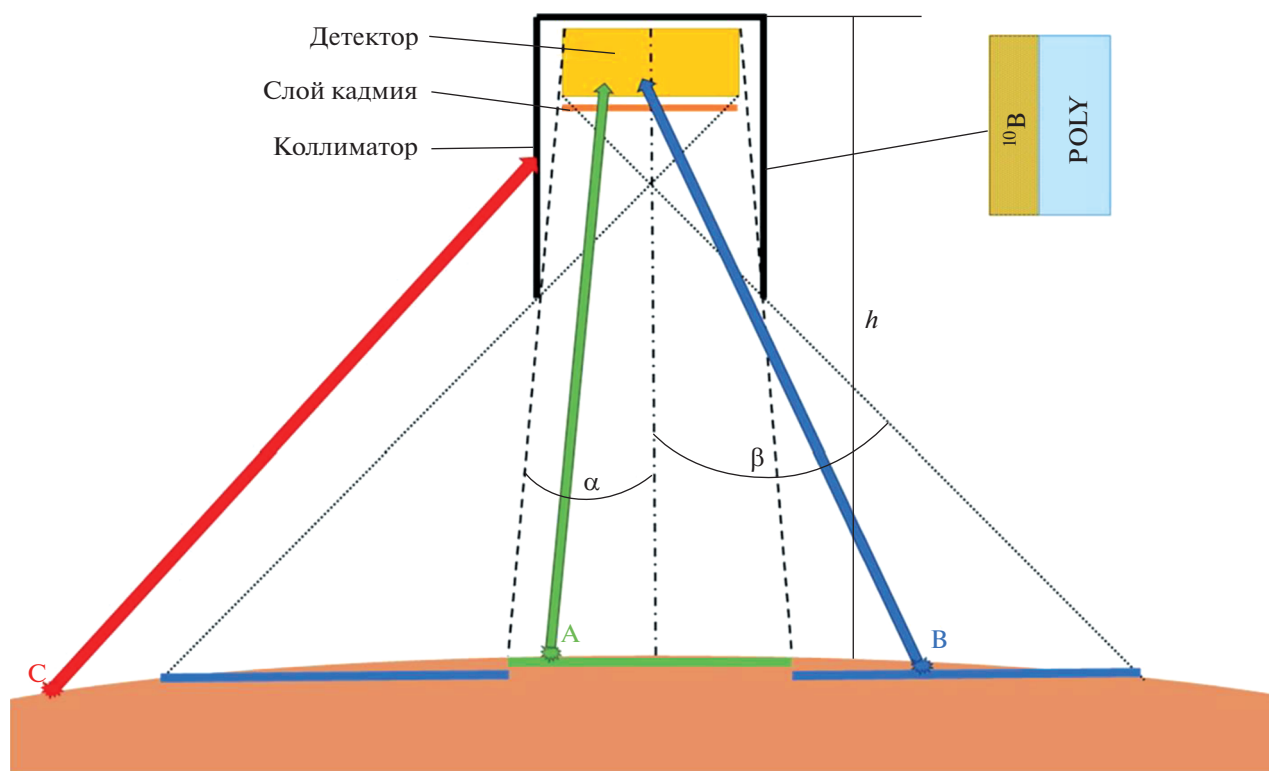


Рис. 1. Принципиальная схема коллимации для нейтронного орбитального телескопа прибора ФРЕНД.

Для повышения пространственного разрешения в приборе ФРЕНД используется метод нейтронной коллимации. Нейтронный коллиматор состоит из материалов, способных эффективно затормозить и поглотить нейтроны, прилетающие с направлений вне его поля зрения (рис. 1). В результате коллимации удастся значительно увеличить соотношение сигнал/шум, если за сигнал принять отсчеты от нейтронов из локальной области на поверхности с размером, соответствующем полю зрения прибора, а за шум — отсчеты от нейтронов с поверхности вне такой локальной области. Благодаря коллиматору существенно повышается пространственное разрешение прибора, но одновременно значительно увеличивается его масса за счет материала коллиматора, замедляющего и поглощающего нейтроны.

Пространственное разрешение коллиматора характеризуется двумя углами, α и β относительно оси коллиматора (рис. 1). Нейтроны, попадающие в детектор под углом менее α не затеняются. Нейтроны, попадающие в детектор в интервале углов $[\alpha, \beta]$ частично затенены стенками коллиматора. Наконеч нейтроны, попадающие в детектор под углом более β полностью затенены стенками коллиматора. Все нейтроны из этих направлений испытывают частичное поглощение (о прозрачности коллиматора смотрите ниже в разделе). Для прибора ФРЕНД $\alpha = 4^\circ$ и $\beta = 14^\circ$ (см.

ниже). С учетом высоты орбиты *TGO* равной 400 км углам α и β соответствуют области на поверхности Марса с диаметрами 60 и 200 км соответственно.

Для построения карты потока нейтронов от Марса на основе данных орбитальных измерений поверхности сфер орбиты и планеты разбиваются на одинаковые элементарные участки (пиксели), расположенные друг над другом. Во время орбитального картографирования все отсчеты распределяются между пикселями карты орбиты в соответствии с координатами, которые имел космический аппарат во время их регистрации. Для каждого пикселя также регистрируется время экспозиции, которое равно суммарному времени всех пролетов космического аппарата в пределах его поверхности. Частное от деления полного числа отсчетов на время экспозиции определяет сигнал, равный темпу регистрации нейтронов для данного пикселя орбитальной карты.

Кроме полезного нейтронного сигнала, детекторы прибора регистрируют локальный нейтронный фон, вызванный заряженными частицами ГКЛ в самом приборе и также в элементах конструкции космического аппарата. Для коллимированного нейтронного телескопа фоном также являются отсчеты от нейтронов с поверхности небесного тела, которые пришли из направлений вне поля зрения вследствие частичной прозрач-

ности коллиматора. Суммарный нейтронный фон нужно учитывать при измерении пространственных вариаций полезного сигнала.

Оценка фонового темпа счета детекторов от заряженных частиц ГКЛ и от вторичных нейтронов космического аппарата была выполнена на этапе перелета к Марсу, когда прибор не регистрирует нейтронный поток от Марса. Так как поток ГКЛ меняется со временем, фон, измеренный на перелете, впоследствии поправляется на величину вариации ГКЛ на основе данных независимых измерений блока Люлин, входящего в состав прибора ФРЕНД [13]. При работе на орбите Марса, планета заслоняет собой часть неба, таким образом снижая поток ГКЛ и соответствующих ему вторичных нейтронов от космического аппарата. Эта поправка вносится с учетом телесного угла, закрываемого Марсом для каждого момента времени.

Оставшийся темп счета соответствует полному нейтронному излучению Марса на высоте орбитального полета, включающему как отсчеты от нейтронов, пришедших из поля зрения прибора так и отсчеты от нейтронов с направлений вне его поля зрения частично прошедших сквозь стенки коллиматора. Именно величины полного темпа счета нейтронов от Марса, распределенные по пикселям орбитальной карты, являются исходным научным продуктом первого уровня для нейтронного картографирования Марса.

На основе карты отсчетов первого уровня может быть построена карта второго уровня, которая отображает пространственное распределение потока нейтронного излучения на поверхности Марса. Для получения этой карты на основе карты первого уровня необходимо знать спектральную и угловую зависимость $S_{\text{eff}}(E, \mathbf{n})$ эффективной площади нейтронных детекторов прибора (здесь E и \mathbf{n} соответствуют энергии нейтрона и направлению его движения с поверхности небесного тела относительно главных осей системы координат прибора). Функции спектральной и угловой чувствительности должны быть известны как для детекторов надтепловых нейтронов, так и для детектора быстрых нейтронов (см. раздел 2).

Итоговым научным продуктом нейтронного картографирования является карта поверхности третьего уровня, пиксели которой содержат оценку массовой доли воды в веществе Марса. Прямая логика обработки данных измерений предполагает построение такой карты третьего уровня на основе обработки данных карты второго уровня для потока нейтронного излучения, построенной в свою очередь на основе экспериментальных данных для темпа регистрации нейтронов, представленных на карте первого уровня. Однако опыт показал, что более практичным является метод численного моделирования всего эксперимента,

который в рамках единой сквозной модели предсказывает величины темпа счета нейтронов в пикселях орбитальной карты первого уровня в соответствии со значениями массовой доли воды в соответствующих пикселях на карте третьего уровня. В этом методе фактически реализована логика обратного моделирования эксперимента: от величины воды в грунте — к оценке темпа счета нейтронов в детекторе. Сопоставление модельно предсказанных значений отсчетов для разных величин массовой доли воды с реально измеренными значениями отсчетов позволяет достичь цель эксперимента — получить оценку для массовой доли воды в приповерхностном слое марсианского грунта.

Для построения такой сквозной численной модели эксперимента ФРЕНД необходимо решить две физические задачи:

Задача 1: получить оценку спектральной и угловой плотности потока нейтронов $F(E, \mathbf{n}, \xi)$ над поверхностью Марса (в единицах $\text{кэВ}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) на высоте орбиты космического аппарата в зависимости от массовой доли воды ξ в веществе поверхности Марса, которая излучает нейтроны под воздействием ГКЛ. Фактически решение этой задачи позволяет построить модельную карту второго уровня, то есть карту для потока нейтронов на орбите на основе исходной карты третьего уровня, то есть карты массовой доли воды на поверхности.

Задача 2: получить оценки темпа счета нейтронов в детекторах прибора ФРЕНД в зависимости от спектральной и угловой плотности потока нейтронов $F(E, \mathbf{n})$ на орбите. Решение этой задачи обеспечивает связь модельной карты потока нейтронов второго уровня с картой первого уровня, для которой предсказываются значения темпа счета нейтронов детекторами.

Применение сквозной численной модели эксперимента для оценки массовой доли воды в грунте с типичным для Марса содержанием породообразующих элементов на основе данных измерений проиллюстрировано на рис. 2. Так, модель предсказывает, что при переходе от сухого грунта к грунту с содержанием воды 1% темп счета надтепловых нейтронов в гелиевых детекторах прибора понижается более чем на 30%, а для грунта с содержанием воды 10% темп счета понижается почти в 5 раз.

Знание о массовой доле воды в грунте какого-то определенного района поверхности и монотонная зависимость темпа счета нейтронов от массовой доли воды позволяют проводить оценку этой величины в других районах на основе измерения изменений темпов счета этих районов относительно темпа счета для известного района. Для Марса таким известным районом можно считать территорию Плато Солнца, для которой

оценка массовой доли воды составляет 2.78% [2]. Абсолютные значения темпа счета C для пикселей карты первого уровня можно отнормировать на среднее значение C_{sp} , соответствующее пикселям, покрывающим территорию Плато Солнца. Относительную величину $S = C/C_{sp}$ можно назвать супрессией (от слова suppression, подавление). Этот термин выбран в связи с тем, что при увеличении массовой доли воды относительно значения 2.78% величина S уменьшается и для случая чистого водяного льда S стремится к 0.

Очевидно, что решение задачи 1 должно быть представлено в форме физической величины плотности потока нейтронов в интервалах углов и энергий, и оно не зависит от свойств прибора. Напротив, задача 2 напрямую связана с характеристиками прибора. Для ее решения необходимо знать спектральную и угловую зависимость эффективной площади детектора $S_{eff}(E, \mathbf{n})$, которая определяет темп счета детекторов в зависимости от величины налетающего потока.

Функция $S_{eff}(E, \mathbf{n})$ была рассчитана для телескопа ФРЕНД методом численного моделирования. Однако модельные расчеты должны быть экспериментально проверены на основе экспериментальных результатов физических калибровок, прежде чем численная модель будет применяться для анализа измерений прибора над Марсом. Данная статья содержит описание физических калибровок детекторов прибора ФРЕНД и представляет результаты сопоставления данных калибровочных измерений с предсказаниями численной модели.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

На рис. 3 показано сечение прибора ФРЕНД, иллюстрирующее внутреннюю структуру коллиматора и расположение детекторов. Детектирующая часть прибора ФРЕНД состоит из 4 пропорциональных счетчиков на основе ${}^3\text{He}$ HE1–HE4 и одного сцинтилляционного детектора на основе кристалла стильбена SC. Гелиевые счетчики регистрируют надтепловые нейтроны с энергиями от кадмиевого порога 0.4 эВ до значения ~ 0.5 МэВ, которое определяется падением эффективности счетчиков. Эти счетчики закрыты кадмиевой защитой на торцах со стороны Марса. Такая защита практически полностью поглощает нейтроны с энергиями до 0.4 эВ. Они также окружены коллиматором со всех направлений вне поля зрения прибора (смотрите рис. 1 и 3).

Пропорциональные счетчики HE1–HE4 на основе ${}^3\text{He}$ производства LND Inc. имеют форму цилиндров диаметром 50.8 мм и длиной 78 мм. Давление газа в них составляет 6 атмосфер. Счетчики регистрируют нейтроны благодаря реакции ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$, которая сопровождается энер-

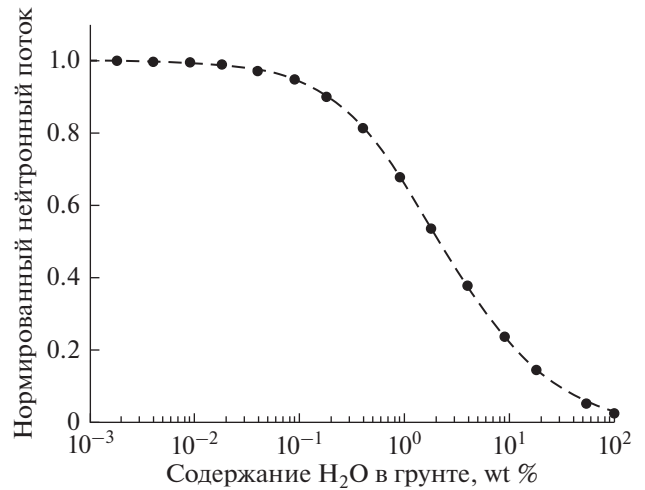


Рис. 2. Зависимость темпа счета надтепловых нейтронов с поверхности Марса в гелиевых детекторах прибора ФРЕНД (нормирован на 1 в максимуме) от массовой доли воды в приповерхностном слое грунта.

говывделением 764 кэВ, распределенным между протоном (573 кэВ) и тритоном (191 кэВ). На рис. 4 представлены энергетические спектры отсчетов, измеренные во время наземных калибровок с прибором ФРЕНД. На них хорошо виден пик полного поглощения обоих продуктов реакции внутри объема счетчика (764 кэВ) и низкоэнергетическая часть, возникающая в случае, когда один из продуктов (как правило, протон) покидает объем счетчика, а второй (как правило, это тритон) остается в объеме счетчика и выделяет в нем свою энергию. Таким образом регистрируемый спектр отсчетов тепловых и надтепловых нейтронов не зависит от энергий падающего на него нейтронного потока. Благодаря этому форма спектра отсчетов, измеренная во время калибровок (рис. 4), может быть использована в качестве эталонной для разделения отсчетов от нейтронов и от фоновых заряженных частиц ГКЛ в космическом эксперименте.

Для регистрации быстрых нейтронов используется сцинтилляционный детектор SC на основе кристалла стильбена. Он выполнен в форме цилиндра высотой 36 мм и диаметром 36 мм и может регистрировать быстрые нейтроны в диапазоне энергий от ~ 500 кэВ до 15 МэВ по сцинтилляционным вспышкам от протонов отдачи. Стильбен также регистрирует заряженные частицы ГКЛ и гамма-лучи от Марса и от локального фона космического аппарата. Чтобы исключить фоновые отсчеты от гамма-излучения Марса и от заряженных частиц ГКЛ, кристалл стильбена со всех сторон окружен пластиковой оболочкой толщиной в 5 мм, в которой возникают сцинтилляционные вспышки при прохождении фотонов и частиц ГКЛ. Кристалл стильбена и его пластиковая обо-

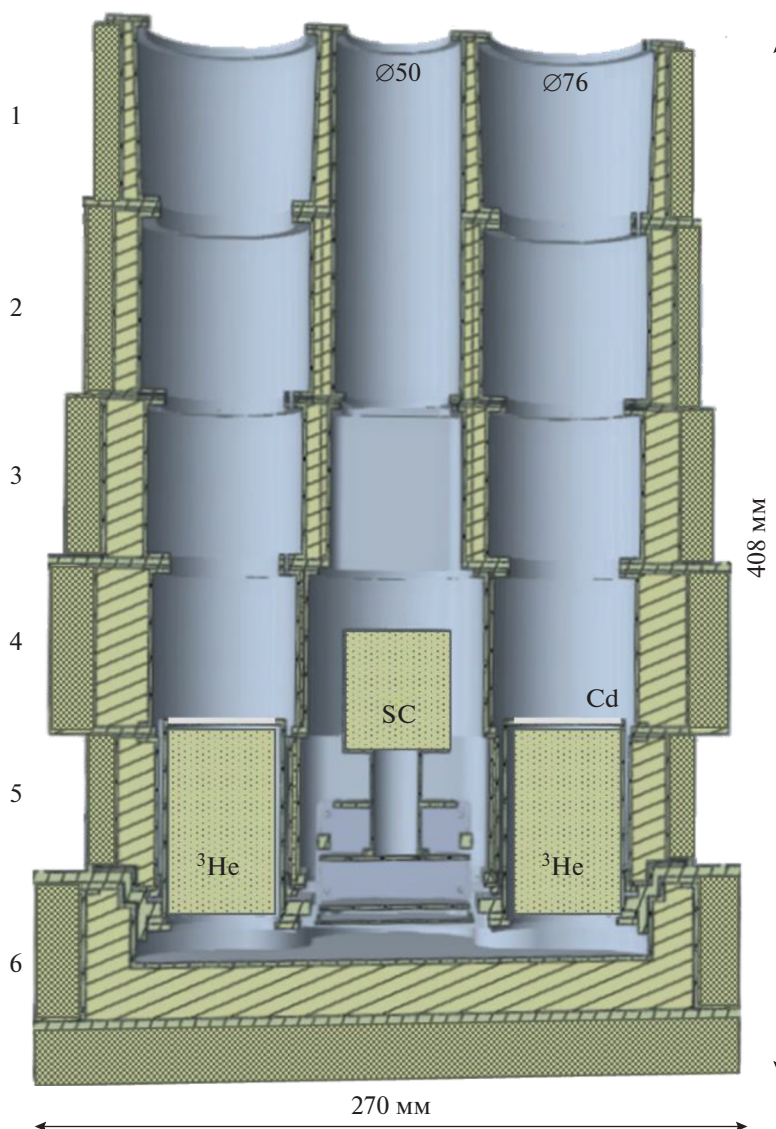


Рис. 3. Сечение коллиматора прибора ФРЕНД. Грубая штриховка обозначает внутренний объем, заполненный изотопом бора ^{10}B . Мелкая штриховка – внешний слой коллиматора из полиэтилена высокого давления. Внутри коллиматора расположены детекторы на основе ^3He и сцинтилляционный детектор. Гелиевые детекторы закрыты кадмиевой защитой на торцах в направлении Марса. Цифрами пронумерованы секции коллиматора.

лочка просматриваются одним ФЭУ, и аналоговая электроника детектора производит селекцию отсчетов от нейтронов по амплитуде и форме их импульсов. Толщина защитной пластиковой оболочки оптимизирована таким образом, чтобы импульсы отсчетов ФЭУ от заряженных частиц и гамма-лучей существенно отличались по амплитуде и по длительности от импульсов отсчетов ФЭУ от нейтронов с энергиями 0.5–15 МэВ. Для заряженных частиц с энергиями от 20 до 200 МэВ импульсы ФЭУ соответствуют энергии от 20 до 60 МэВ, которая много больше, чем энергия импульсов ФЭУ для быстрых нейтронов 0.5–15 МэВ. Поэтому такие частицы могут быть эффективно селектированы по амплитуде. Частицы в остав-

шихся энергетических диапазонах (менее 20 МэВ и более 200 МэВ) производят импульсы с энергиями от 1 до 20 МэВ, сравнимыми с энергиями нейтронов, однако формы импульсов значительно отличаются по длительности: импульсы для нейтронов имеют медленную компоненту, по которой они однозначно идентифицируются аналоговой электроникой. Таким образом на выходе детектора SC формируются два потока данных – SCN для отсчетов от быстрых нейтронов и SCG для отсчетов от заряженных частиц и гамма-фотонов.

По бокам пропорциональные HE1–HE4 счетчики и сцинтилляционный детектор SC окруже-

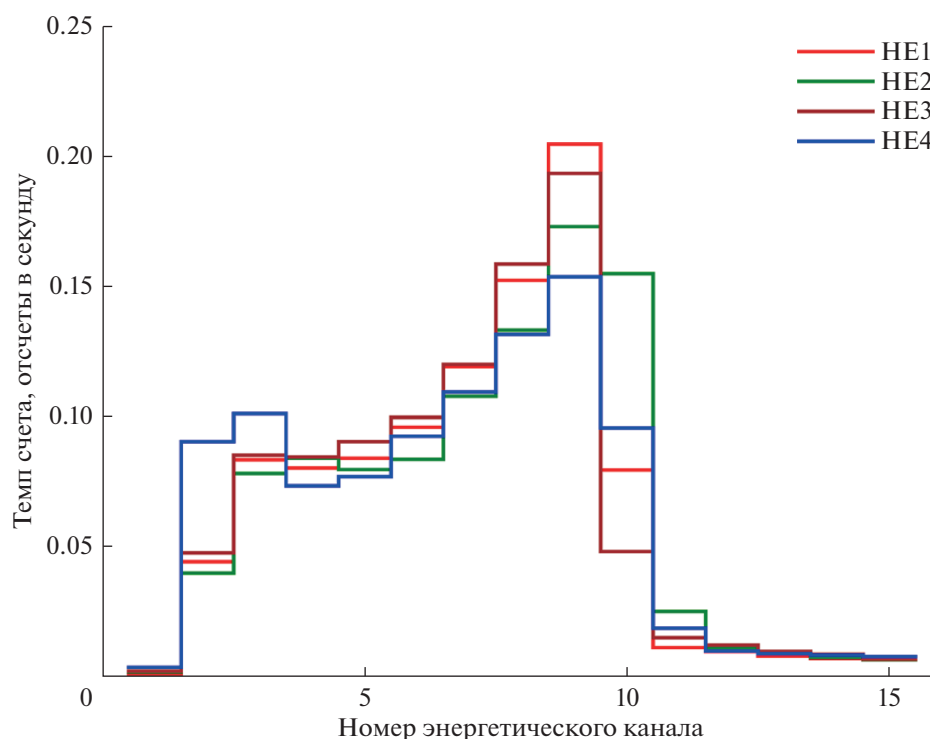


Рис. 4. Спектры отсчетов в ^3He детекторах прибора ФРЕНД.

ны толстым коллиматором (рис. 3). Внешний слой коллиматора состоит из полиэтилена высокого давления — материала с химической формулой $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$, который за счет большого количества водорода эффективно замедляет нейтроны. Пройдя сквозь внешний слой, замедленные нейтроны захватываются ядрами изотопа бора ^{10}B , который находится во внутреннем слое коллиматора. Данный изотоп обладает одним из наибольших сечений поглощения тепловых и надтепловых нейтронов. Форма коллиматора ФРЕНД повторяет форму коллиматора ЛЕНД для секций 1–5 (смотрите рис. 3). Секция 6 была разработана дополнительно для прибора ФРЕНД для того, чтобы повысить защиту детекторов от потока фоновых нейтронов, которые либо рождаются в массивном теле космического аппарата под воздействием ГКЛ, либо попадают в детектор от Марса вследствие обратного рассеяния в веществе аппарата. Секция 6 оказалась необходимой вследствие того, что прибор ФРЕНД расположен в непосредственной близости к конструкции аппарата.

Толщины и геометрия слоев полиэтилена и бора были выбраны в результате численного моделирования коллиматора так, чтобы при фиксированной массе прибора получить максимальную эффективность поглощения. Параметры коллиматора также определялись исходя из механических и технологических требований к конструк-

ции прибора и условий его размещения на борту космического аппарата.

Масса коллиматора ограничена требованиями космического аппарата, и поэтому он не идеален. Даже для надтепловых нейтронов его стенки обладают частичной прозрачностью. Это означает, что в данных орбитальных измерений обязательно присутствует фоновый сигнал от нейтронов, прошедших сквозь стенки коллиматора с поверхности вне поля зрения. Поэтому при построении карты пространственной переменности потока нейтронов с поверхности Марса необходимо учитывать отношение темпа счёта нейтронов сигнала, пришедших из телесного угла поля зрения, к темпу счёта нейтронов фона, пришедших с направлений вне поля зрения. Измерение угловой зависимости эффективного сечения коллимированных детекторов является одной из основных задач наземной калибровки прибора.

3. МЕТОДИКА НАЗЕМНЫХ КАЛИБРОВОК

Для успешного достижения целей научных измерений, поставленных перед экспериментом с прибором ФРЕНД, на этапе наземной отработки были проведены его физические калибровки. Как уже отмечалось, целью этих калибровок было экспериментальное определение значений эффективных площадей детекторов прибора в зависимости от энергии и направления распростране-

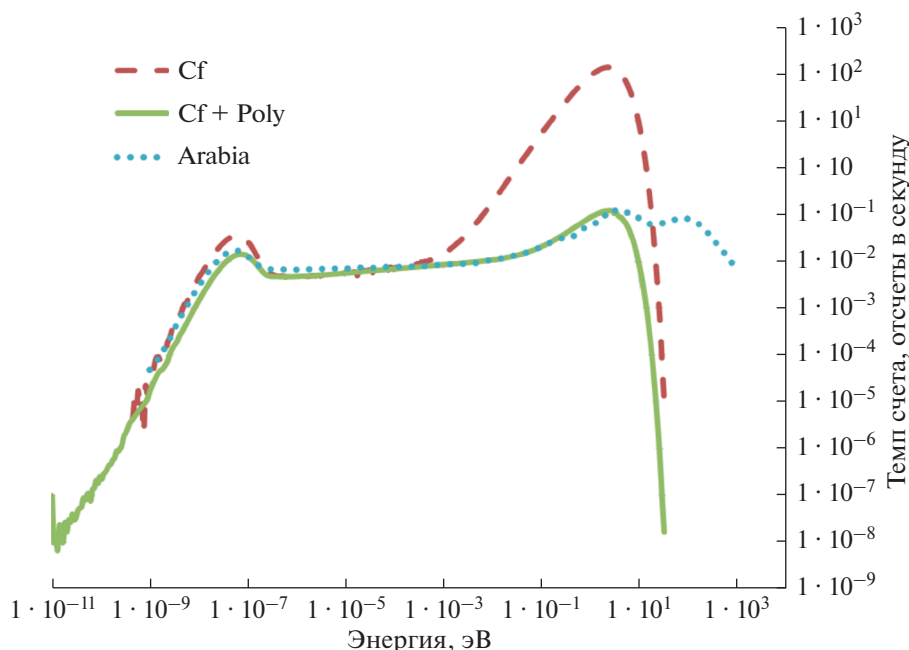


Рис. 5. Энергетические спектры радиоактивного изотопа ^{252}Cf (красный штрих), реперного излучателя с источником ^{252}Cf в полиэтиленовой сфере (зеленый сплошной) и потока нейтронов с поверхности Марса для области Arabia с 10% воды в грунте (голубой пунктир).

ния потока налетающих нейтронов. Для проведения физических калибровок были обеспечены следующие условия измерений:

1) Был создан источник нейтронов с известной интенсивностью, форма энергетического спектра которого удовлетворительно воспроизводит рассчитанный энергетический спектр потока нейтронов на орбите Марса (рис. 5).

2) Были обеспечены низкофоновые условия измерений.

3) Была собрана измерительная установка, которая позволяет проводить измерения в условиях, когда источник находится на разных расстояниях от детекторов прибора и под разными углами относительной оси поля зрения каждого детектора.

Все калибровки с летным образцом прибора ФРЕНД проводились в августе 2015 г. в лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в городе Дубна. Измерения с прибором ФРЕНД проводились в большом лабораторном зале с размерами $10 \times 10 \times 10$ м, где ранее в 2008 г. были выполнены калибровки прибора ЛЕНД [15]. Большая площадь помещения и высокие потолки позволили максимально уменьшить локальный нейтронный фон в окрестности измерительной установки.

Для калибровок использовался реперный излучатель нейтронов, представляющий собой радиоактивный источник на основе изотопа ^{252}Cf , помещенный в полиэтиленовую сферу. Диаметр

сферы 7.6 см был подобран таким образом, чтобы форма энергетического спектра излучаемых нейтронов была максимально близка к спектру нейтронного альbedo Марса (см. рис. 5). Интенсивность излучения нейтронного источника составила $2.3 \cdot 10^6$ нейтронов в секунду и определялась исходя из паспортных данных радиоактивного источника и их коррекции с учетом периода его полураспада 2.65 года. Следует отметить, что эффективности регистрации нейтронов детекторами HE1–HE4 и SC в наземных калибровках определялись относительно известного потока частиц от реперного излучателя с учетом спектральной зависимости эффективного сечения детекторов.

Видно, что реперный излучатель обеспечивает достаточно хорошее согласие с марсианским спектром в диапазоне энергий для надтепловых и быстрых нейтронов до 10 МэВ. Различие между спектрами нейтронов от реперного излучателя и от Марса наблюдается при энергиях >10 МэВ. Оно несущественно, так как гелиевые детекторы HE1–HE4 чувствительны к нейтронам с энергиями от 0.4 эВ до 1 кэВ, а сцинтилляционный детектор – от 0.5 до 15 МэВ.

На рис. 6 схематически представлена конфигурация измерительной установки, использованной для физических калибровок прибора ФРЕНД. Во время измерений прибор располагался максимально близко к геометрическому центру зала и равноудаленно от пола и потолка помещения. Он был установлен на поворотном

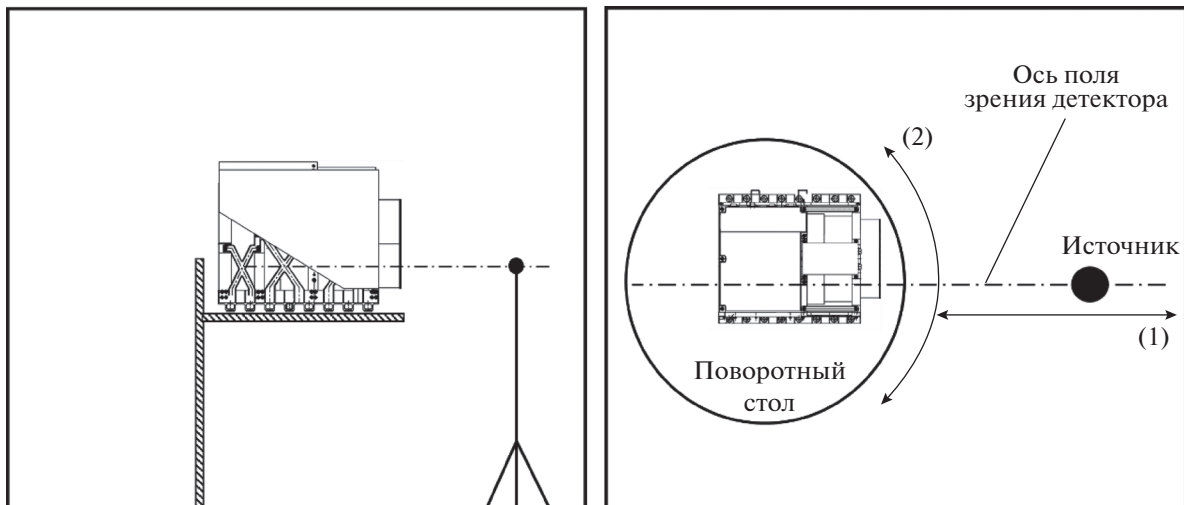


Рис. 6. Схема проведения калибровок. Слева, вид сбоку: прибор расположен в геометрическом центре испытательного зала, равноудаленно от стен и потолков при помощи подъемного механизма. Источник расположен при помощи штатива на оси поля зрения детектора. Справа, вид сверху: прибор расположен на поворотном столе. Источник движется по направлению (1) для проведения измерений эффективной площади детекторов. Поворотный стол вращается в направлении (2) для измерения угловой функции чувствительности детекторов.

столе на вершине подъемного механизма. Подъемный механизм обеспечивал установку прибора на расстоянии порядка 5 м от пола и потолка, а поворотный стол позволял изменять угол между осью поля зрения каждого коллимированного детектора и направлением на источник. Ось вращения поворотного стола всегда проходила через геометрический центр калибруемого детектора. Излучатель нейтронов помещался на штативе на переменном расстоянии от прибора по горизонтали на том же расстоянии порядка 5 м от пола и потолка, как и сам прибор. При калибровке каждого детектора прибора положение излучателя выставлялось таким образом, чтобы горизонтальная ось проходила через геометрические центры излучателя и детектора.

Для измерения эффективной площади каждого детектора при осевом расположении излучателя использовался так называемый метод R^2 , при котором центр излучателя располагался на разных расстояниях от центра детектора, но строго на его геометрической оси. Это условие соответствует углу θ между осью детектора и направлением на центр источника равному 0. При наблюдениях с орбиты это же условие соответствует наведению осей детекторов в направлении надира.

Зависимость полного темпа счета $C(0)$ от эффективной площади детектора $S_{\text{eff}}(0)$ можно выразить формулой:

$$C = S_{\text{eff}} \frac{I}{4\pi R^2} + C_{\text{фон}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{фон}}$ — темп счета для локального фона, R — расстояние между центрами детектора и реперно-

го излучателя, I — известная интенсивность реперного нейтронного излучателя в диапазоне энергий от 0.4 эВ до 1 кэВ для гелиевых счетчиков и от 0.5 до 15 МэВ для сцинтилляционного детектора. Эти диапазоны выбраны в соответствии со спектральными зависимостями эффективных сечений детекторов.

При изменении расстояния между излучателем и детектором полезный сигнал, измеряемый детектором, уменьшается как квадрат расстояния, а фон остается примерно постоянным. Если выполнить серию измерений на разных расстояниях R , получившуюся зависимость можно аппроксимировать кривой из уравнения (1) с двумя свободными параметрами $S_{\text{eff}}(0)$ и $C_{\text{фон}}^{(0)}$. Варьируя эти параметры, можно найти наилучшее согласие их значений с данными измерений (см. ниже).

Измерения эффективностей детекторов при осевом расположении излучателя по методу R^2 были сделаны для 6 положений источника относительно центра каждого детектора прибора на расстояниях от 0.5 до 5 м. На максимальном расстоянии время измерения составляло порядка 70 мин.

При изменении угла θ между осью коллиматора и направлением на реперный источник изменяется темп счета в детекторах, т. к. нейтроны задерживаются коллиматором при выходе источника из поля зрения коллиматора. Поэтому измеряя темп счета в детекторе в зависимости от угла поворота $C(\theta)$ можно определить угловую зависимость его эффективной площади. Источник располагался на расстоянии $R_0 = 1.6$ м до центра калибруемого детектора. Было экспериментально

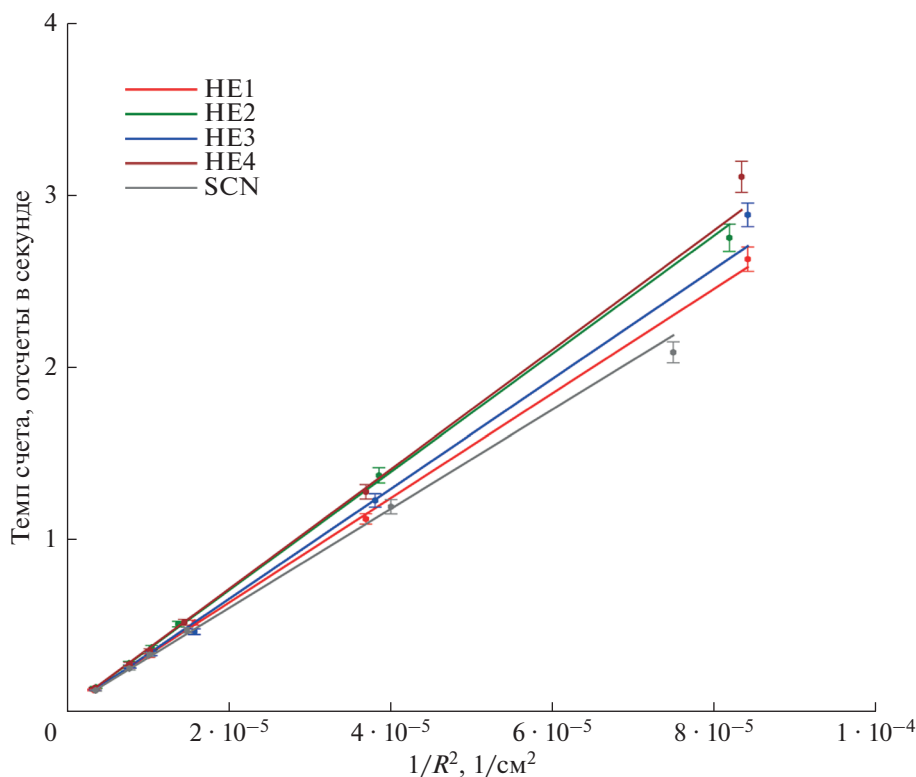


Рис. 7. Зависимость темпа счёта от расстояния до коллимированных детекторов HE1–HE4, сцинтилляционного детектора SCN и их аппроксимация.

установлено, что локальный фон в центре зала $C_{фон}^{(0)}$ практически не менялся при поворотах прибора. Величина эффективной площади измерялась как

$$S_{эф}(\theta) = (C(\theta) - C_{фон}^{(0)}) \times 4\pi R_0^2 / I. \quad (2)$$

Во время измерений прибор поворачивался вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр каждого детектора на углы $\pm 1^\circ, \pm 2^\circ, \pm 3^\circ, \pm 4^\circ, \pm 7^\circ, \pm 10^\circ, \pm 11^\circ, \pm 13^\circ, \pm 16^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 70^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$ относительно направления на излучатель. В совокупности для каждого из детекторов была проведена серия из 31 измерения. При затенении источника коллиматором поток нейтронов, достигающий детектор, тем больше ослабляется, чем толще стенки коллиматора на прямой между источником и детектором. Поэтому для того, чтобы достигнуть одинаковой статистической обеспеченности измерений, для углов с сильным затенением требовалось больше времени экспозиции по сравнению с углами в пределах поля зрения (100 мин по сравнению с 10 мин). С учетом ограниченности времени, доступного на выполнение всей программы калибровок, для каждого измерения накапливаемое количество отсчетов соот-

ветствовало статистической погрешности не менее 3%.

Полное время физических калибровок всех 5 детекторов прибора ФРЕНД составило 27 ч непрерывной работы. Было получено 16 Гб данных измерений, которые готовятся к загрузке в Planetary Science Archive ЕКА (<http://psa.esa.int>) с обеспечением свободного доступа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ ЛЕТНОГО ОБРАЗЦА ПРИБОРА ФРЕНД

Оценки величин эффективной площади детекторов. На рис. 7 показаны зависимости темпа счёта за вычетом фона от расстояния для коллимированных детекторов HE1–HE4 и детектора быстрых нейтронов SCN. На рисунке также показаны аппроксимации полученных зависимостей с помощью функции (1). В табл. 1 представлены оценки темпа счёта для каждого детектора на расстоянии 1 м, оценка фоновое темпа счёта и оценка эффективной площади при осевом расположении реперного излучателя относительно оси детектора.

Значения, представленные в табл. 1, показывают, что детекторы надтепловых нейтронов HE1–HE4 летного образца ФРЕНД имеют сопоставимые эффективные площади, которые разли-

Таблица 1. Результаты измерения эффективной площади детекторов прибора ФРЕНД

Детектор	Темп счета, отсчеты в секунду	Фон, отсчеты в секунду	Оценка эфф. площади, см ²
HE1	1.15 ± 0.03	0.0308	1.48
HE2	1.21 ± 0.05	0.0235	1.59
HE3	1.15 ± 0.04	0.0205	1.48
HE4	1.26 ± 0.04	0.0228	1.63
SCN	1.99 ± 0.04	0.0303	0.27

чаются между собой всего в пределах 10%. Средняя эффективная площадь составляет 1.55 см². Это примерно в три раза меньше, чем средняя эффективная площадь детекторов летного образца прибора ЛЕНД (она составляет 4.69 см², см. [15]), который прошел аналогичные калибровки с тем же реперным излучателем и в том же лабораторном зале.

Меньшее значение эффективной площади детекторов надтепловых нейтронов прибора ФРЕНД связано с использованием счетчиков с давлением газа 6 атмосфер по сравнению с давлением 20 атмосфер в счетчиках прибора ЛЕНД. Такое давление было выбрано с целью повышения надежности высоковольтного узла прибора относительно высоковольтных пробоев. Поскольку эффективность регистрации пропорциональна давлению гелия в счетчике, можно сделать вывод, что различие значений эффективных площадей в 3 раза свидетельствует о хорошем согласии данных калибровок между двумя экспериментами. С другой стороны, известно (смотрите [5] и [9]), что переменность нейтронного потока Марса в разы больше переменности потока от Луны, поэтому для достижения целей эксперимента ФРЕНД уменьшение эффективной площади детекторов для повышения их надежности является вполне целесообразным.

Оценки угловой зависимости эффективной площади. Результаты измерений угловых чувствительностей для каждого детектора летного образца прибора ФРЕНД приведены на рис. 8–12. Полученные кривые зависимости темпа счета от угла между осью поля зрения коллиматора и осью направления на излучатель нейтронов подтверждают хорошую коллимационную эффективность прибора ФРЕНД. Если при 0° темп счета, как и ожидалось для незатененного поля зрения, достигает максимума, то при наибольшем затенении, при углах 14°–15°, там, где на пути нейтронов находится наибольшее количество вещества коллиматора, темп счета уменьшается примерно в 10 раз.

Таким образом можно заключить, что коллиматор, созданный для прибора ФРЕНД, может эффективно ослаблять нейтронный поток марсианского альбеда за пределами поля зрения прибора и обеспечивает заявленное пространственное разрешение прибора.

Кривые эффективного сечения всех четырех гелиевых детекторов хорошо совпадают с кривыми, полученными в результате численного моделирования прибора. На кривой угловой зависимости эффективной площади гелиевых счетчиков можно выделить три интервала, которые хорошо иллюстрируют физические условия коллимации. Видно, что в интервале [–4°; +4°] наблюдается плато в темпе счета, объясняемое беспрепятственным попаданием нейтронов от реперного излучателя в детекторы (см. рис. 1). Далее, в интервале углов от ±4° до ±14°, наблюдается резкий спад темпа счета, так как в этом интервале углов поток налетающих нейтронов начинает затеняться стенками коллиматора. В области углов ±14° затенение достигает максимума, поскольку под такими углами сечение стенок коллиматора имеет наибольшую толщину поглощающего материала. Углы $\alpha = \pm 4^\circ$ и $\beta = \pm 14^\circ$ показаны на рис. 1 и обусловлены исключительно геометрией коллиматора. Физические калибровки прибора подтвердили особенности угловой зависимости для эффективной площади для этих углов, как ограничивающих поле зрения прибора. Соответственно, наземные калибровки подтвердили оценки для его пространственного разрешения в 60–200 км при наблюдениях с орбиты, как это описано в разделе 1.

Следует обратить внимание на несимметричность всех кривых для эффективного сечения гелиевых детекторов: для каждого детектора темпы счета в левом и правом “крыльях” кривой значительно отличаются друг от друга. Это объясняется геометрией коллиматора и расположением в нем детекторов. Каждый из них, с одной стороны, затенен только одним слоем коллимационного материала, а в направлении соседнего детектора — уже двойным.

Для сопоставления с предыдущими экспериментами на рис. 13 представлена угловая зависимость эффективного сечения для гелиевых детекторов прибора ЛЕНД. Из сравнения следует, что коллимация детекторов прибора ФРЕНД существенно лучше и поэтому обеспечивает лучшее соотношение сигнал/шум, где в качестве сигнала выступает темп счета в поле зрения в пределах углов ±14°, а в качестве шума — темп счета из

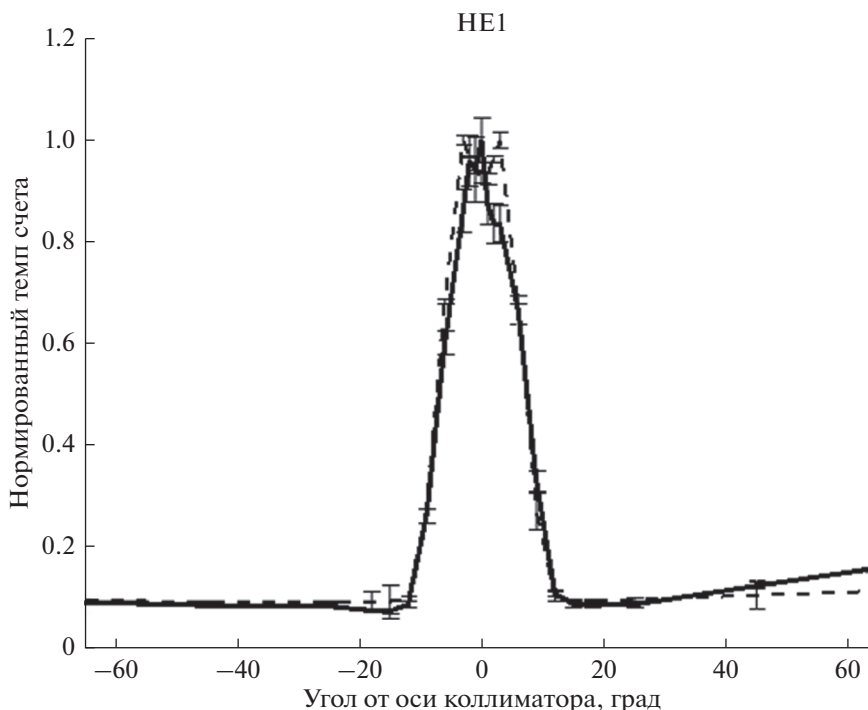


Рис. 8. Угловая зависимость эффективного сечения гелиевого детектора HE1 (сплошная линия) и его численная модель (пунктирная линия). Темпы счета нормированы на 1 в максимуме.

остальных направлений. Численные расчеты показывают, что для прибора ЛЕНД коллимированный сигнал составляет примерно 40% от полного темпа счета [16]. Для прибора ФРЕНД эта величина составляет около 50%. Кроме того, в связи с незначительным отличием в конструкции приборов (детекторы ЛЕНД на 4 см менее заглублены в коллимационное отверстие, что означает чуть большее поле зрения), коллимационный пик для прибора ЛЕНД несколько шире.

Хотя коллиматор и не оптимизирован для поглощения быстрых нейтронов (0.5–15 МэВ), он тем не менее существенно ослабляет их поток, прошедший через стенки коллиматора. Это подтверждает угловая зависимость эффективного сечения, измеренная для сцинтилляционного детектора ФРЕНД (рис. 12). В отличие от пропорциональных счетчиков, расположенных несимметрично внутри коллиматора, сцинтилляционный детектор расположен в его центральной части и окружен со всех сторон примерно одинаковой толщиной поглощающего материала. Как результат его угловая зависимость эффективного сечения детектора SCN симметрична для положительных и отрицательных углов. Она достигает максимума в пределах поля зрения (углы $\pm 4^\circ$). При углах $\pm 20^\circ$ она имеет минимум, уменьшаясь примерно в 5 раз. Максимальное ослабление чувствительности сигнала SCN на углах $\pm 20^\circ$ по сравнению с углами $\pm 14^\circ$ для пропорциональных

счетчиков связано с тем, что угол раскрытия β коллиматора для сцинтилляционного детектора больше из-за его размеров и расположения внутри коллиматора. Кривая угловой зависимости эффективного сечения для детектора SCN имеет более высокие крылья, чем для пропорциональных счетчиков. Этот эффект вызван тем, что быстрые нейтроны легче проникают сквозь стенки коллиматора.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРА ФРЕНД

Как отмечалось выше, спектрально-угловая зависимость эффективной площади детекторов прибора ФРЕНД для потока марсианских нейтронов была рассчитана на основе численного моделирования (см. выше, раздел 2 задача 2) эксперимента на около марсианской орбите. Для верификации этой модели ее упрощенный вариант был применен для описания другой, более простой физической ситуации, соответствующей условиям физической калибровки прибора с реперным излучателем нейтронов.

Численное моделирование эксперимента ФРЕНД проводилось с использованием пакета Geant4 [17], реализующего метод Монте-Карло. Данный пакет широко используется для моделирования ядерно-физических процессов и, в том числе, производства и транспорта нейтронов во

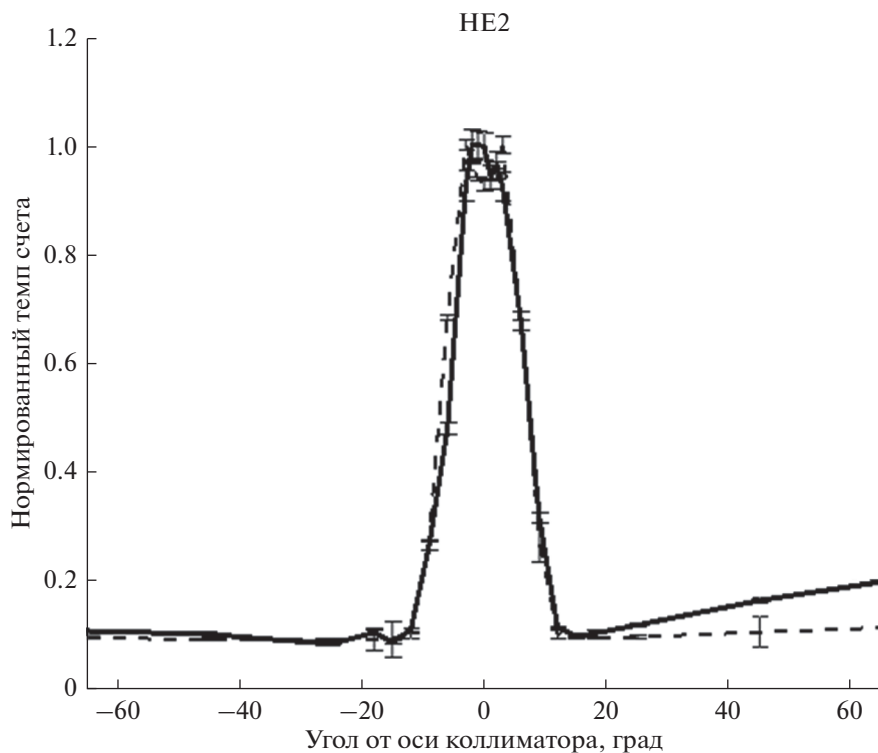


Рис. 9. Угловая зависимость эффективного сечения гелиевого детектора HE2 (сплошная линия) и его численная модель (пунктирная линия). Темпы счета как на рис. 8.

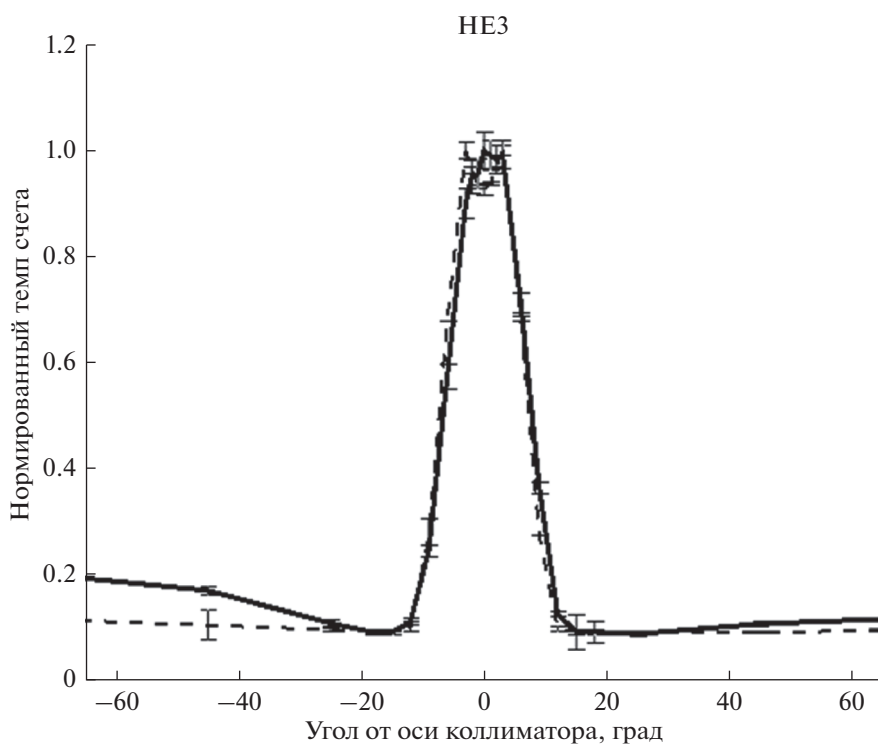


Рис. 10. Угловая зависимость эффективного сечения гелиевого детектора HE3 (сплошная линия) и его численная модель (пунктирная линия). Темпы счета как на рис. 8.

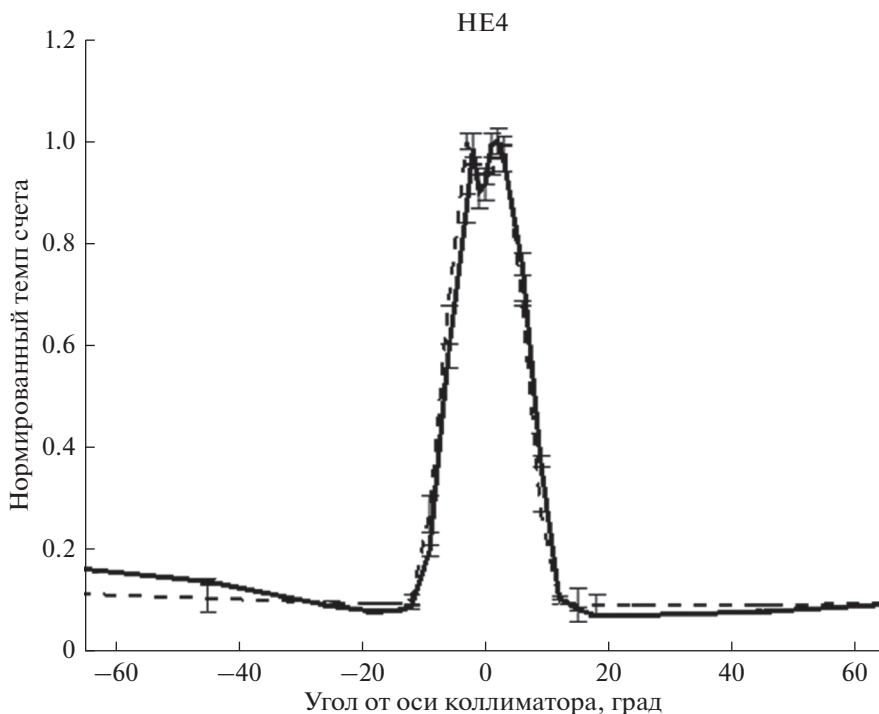


Рис. 11. Угловая зависимость эффективного сечения гелиевого детектора HE4 (сплошная линия) и его численная модель (пунктирная линия). Темпы счета как на рис. 8.

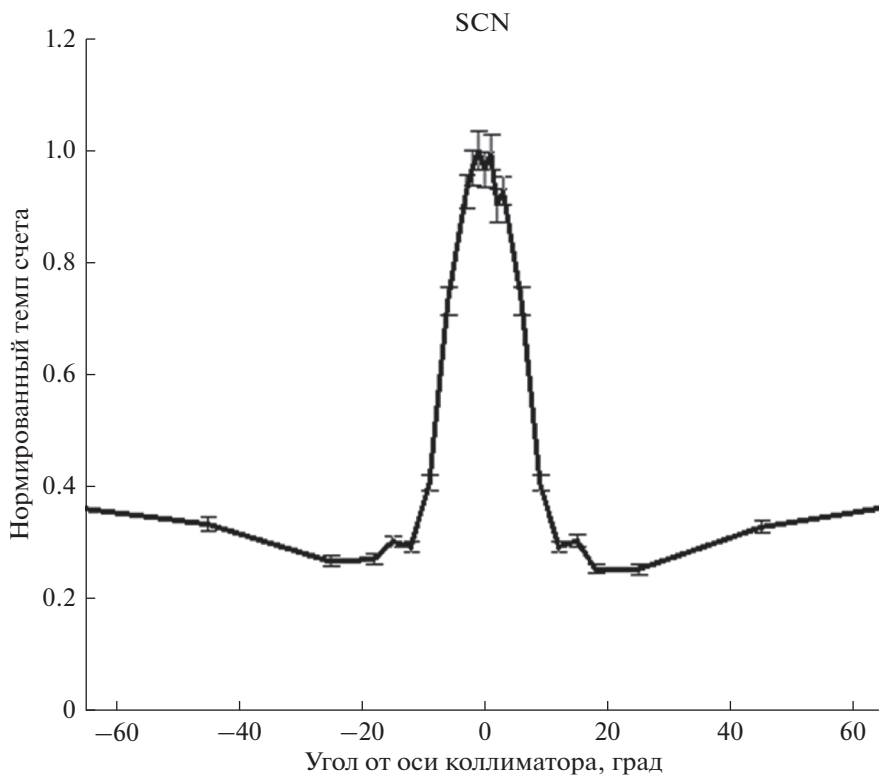


Рис. 12. Угловая зависимость эффективного сечения нейтронного сигнала сцинтиляционного детектора SCN. Темп счета как на рис. 8.

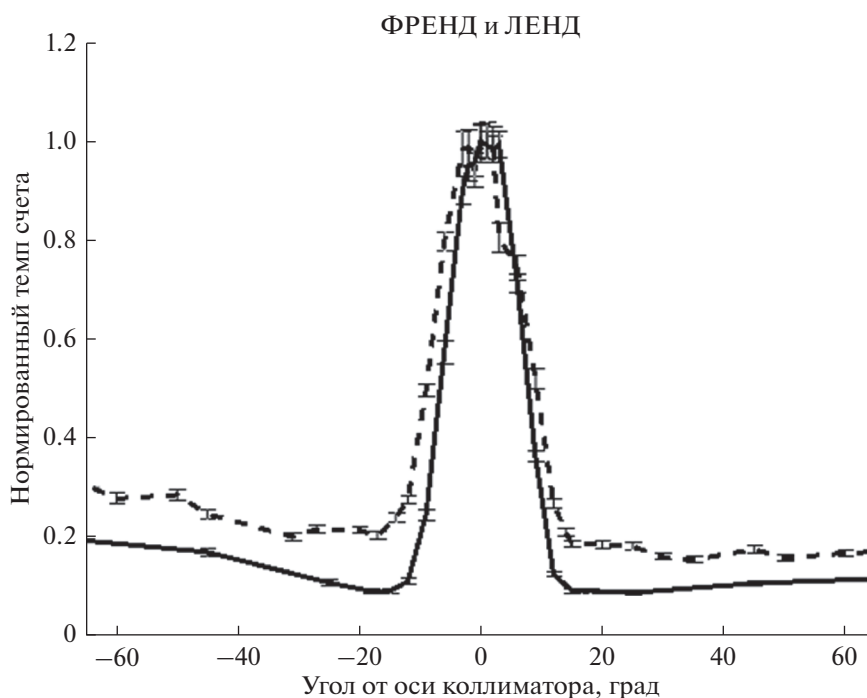


Рис. 13. Сравнение угловых зависимостей эффективного сечения гелиевых детекторов приборов ФРЕНД (сплошная линия) и ЛЕНД (пунктирная линия). Темп счета как на рис. 8.

многих планетных исследованиях [18–20]. Для получения численной модели спектрально-угловой зависимости эффективной площади детекторов ФРЕНД, на основе конструкторской документации прибора, в пакете Geant4 было создано геометрическое описание прибора и всех его детекторов, учитывающее взаимное расположение регистрирующих объемов детекторов и остальной конструкции прибора, в частности материала коллиматора, кадмиевой защиты (см. рис. 3). При помощи пакета Geant были промоделированы спектральные и угловые характеристики потока нейтронов от реперного источника (см. рис. 5), использовавшегося при измерениях и описанного в секции 3 данной статьи. Построенное геометрическое описание прибора и найденные спектрально-угловые характеристики потока нейтронов от источника, позволили провести численное моделирование всех проделанных в ходе калибровок измерений (см. рис. 6). Кривые угловой эффективности, полученные в результате численного моделирования физической калибровки детекторов HE1–HE4 прибора ФРЕНД показаны на рис. 8–11. Видно хорошее согласие модели с экспериментальными данными. Важно отметить, что численная модель прибора ФРЕНД позволила рассчитать не только чувствительности детекторов от угла при поворотах в одной плоскости, выбранной для проведения измерений, но также для любой плоскости, проходящей через ось поля зрения детекторов с учетом трехмерной конфигурации коллиматора.

Кроме того, было выполнено моделирование “облучения” численного описания прибора плоскопараллельными потоками нейтронов с энергиями от 10^{-4} эВ до 1 ГэВ с различных направлений в системе отсчета каждого детектора, одна ось которой совпадает с осью поля зрения детектора, а другие фиксированы относительно прибора (т.е. системы отсчета совпадают с точностью до параллельного переноса). В результате сквозного моделирования процессов взаимодействия нейтронов с элементами конструкции прибора, с коллиматором и детекторами была получена матрица спектрально-угловой зависимости эффективной площади детекторов. Эта матрица позволяет предсказать темп счета прибора для потока нейтронов с заданным спектром, падающего на прибор с заданного направления. Аналогичное моделирование проводилось ранее для прибора ЛЕНД [16], его результаты верифицированы в ходе космического полета этого прибора. Для верификации численной оценки эффективной площади детекторов также было проведено сравнение предсказания полного нейтронного темпа счета, полученного с помощью численной модели прибора ФРЕНД, с реальными данными, измеренными на орбите Марса на протяжении 1 г. для района Плато Солнца, одного из самых сухих на Марсе. Показано хорошее согласие: предсказанный и измеренный темпы счета составили 0.16 и 0.19 отсчетов в секунду, соответственно.

Таким образом можно говорить о качественном согласии численной модели эксперимента

ФРЕНД с результатами как наземных калибровочных измерений, так и с результатами измерений в полете. Это позволило верифицировать сквозную численную модель всего эксперимента ФРЕНД, что необходимо для анализа измерений на орбите Марса и оценки содержания воды в его грунте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор ФРЕНД специально разработан для картографирования распределения воды в приповерхностном слое Марса с борта спутника ЕКА *TGO* с высоким пространственным разрешением, ранее недостижимым в предшествующих измерениях с применением всенаправленных нейтронных спектрометров.

Во время физических калибровок летного образца прибора ФРЕНД в лаборатории нейтронной физики ОИЯИ были измерены эффективные площади и их угловые зависимости для каждого детектора. Было показано, что полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными калибровок аналогичного прибора ЛЕНД, и при этом демонстрируют существенное улучшение коллимационных свойств прибора ФРЕНД. Было установлено, что по сравнению с прибором ЛЕНД, прибор ФРЕНД благодаря большей массе поглощающего материала и оптимизации конструкции коллиматора имеет более узкие пики коллимации и меньший фон от нейтронного потока вне поля зрения. Показано, что доля коллимированного сигнала в полном темпе счета нейтронов от Марса составляет не менее 50%.

Текущие измерения на орбите показывают, что полный нейтронный темп счета сильно меняется в наблюдаемой части поверхности Марса от 74° с.ш. до 74° ю.ш. Для областей, находящихся в экваториальных и умеренных широтах, например Арабии (с повышенным содержанием связанной воды) или на Плато Солнца (одна из наиболее сухих областей Марса) поток может меняться в диапазоне от 0.1 до 0.15 отч/с. Это означает, что коллимированный сигнал для этих областей составляет 0.05 и 0.08 отч/с, соответственно. Исходя из рассчитанной зависимости нейтронных отсчетов прибора от массовой доли воды и принимая, согласно [2], что массовая доля воды в грунте Плато Солнца составляет 2.78%, можно сделать вывод, что средняя массовая доля воды в грунте Арабии составляет 10%. Детальный анализ данных измерений для различных районов Марса представлен в [21].

Зная средние темпы счета нейтронов сигнала и фона и их статистические погрешности, можно определить минимально необходимое время экспозиции каждого района поверхности с заданными размерами для достижения заданного уровня

статистической значимости оценки массовой доли воды. Данные наземных калибровок и летных испытаний прибора показали, что для поиска локальных областей с размером не более 200 км и содержанием воды около 10% понадобится порядка одного марсианского года. Это соответствует длительности основной миссии *TGO* в один марсианский год [13]. При увеличении продолжительности миссии до 2 марсианских лет данные прибора позволят обнаружить локальные области с гораздо меньшей массовой долей воды, около 4.5% по массе.

Таким образом, данные калибровочных измерений летного образца прибора ФРЕНД показали, что конструкция прибора обеспечивает заявленные измерительные свойства. Анализ данных измерений совместно с разработанной и верифицированной численной моделью эксперимента позволяет как использовать данные измерений, полученные с орбиты Марса для восстановления величины нейтронного потока по измеренному темпу счета, так и осуществлять поиск локальных областей с повышенным содержанием связанной воды или водяного льда по пространственным вариациям темпа счета нейтронов с масштабом от 60 до 200 км.

Обработка данных калибровок прибора ФРЕНД выполнена в рамках темы АААА-А18-118012290370-6 ОСВОЕНИЕ Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Masarik J., Reedy R.C.* Gamma ray production and transport in Mars // *J. Geophysical Research: Planets*. 1996. V. 101. № E8. P. 18891–18912.
2. *Boynton W.V. et al.* Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits // *Science*. 2002. V. 297. Is. 5578. P. 81–85.
3. *Feldman W.C. et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // *Science*. 1998. V. 281. P. 1496–1500.
4. *Feldman W.C. et al.* Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. № 5578. P. 75–78.
5. *Mitrofanov I. et al.* Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. P. 78–81.
6. *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. V. 38. № 4. P. 253–257.
7. *Lawrence D.J. et al.* Evidence for water ice near mercury's north pole from MESSENGER neutron spectrometer measurements // *Science*. 2013. V. 339. Is. 6117. P. 292–296.
8. *Mitrofanov I.G. et al.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330.

9. *Litvak M.L. et al.* Global maps of lunar neutron fluxes from the LEND instrument // *J. Geophysical Research E: Planets*. 2012. V. 117. Is. 6003. P. 483–486.
10. *Maurice S. et al.* Mars Odyssey neutron data: 1. Data processing and models of water-equivalent-hydrogen distribution // *J. Geophysical Research E: Planets*. 2011. V. 116. P. E11008.
11. *Mitrofanov I.G. et al.* Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter // *Space Science Reviews*. 2010. V. 150. P. 183–207.
12. *Sanin A.B. et al.* Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO // *J. Geophysical Research: Planets*. 2012. V. 117. P. E00H26.
13. *Mitrofanov I. et al.* Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Space Science Reviews*. 2018. V. 214. Article number 86.
14. *Mitrofanov I. et al.* Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) onboard ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. First data and future results // *COSPAR*. 2018. V. 42. P. B4.1-17-18.
15. *Mitrofanov I.G. et al.* Physical calibration of the LEND space-based neutron telescope: the sensitivity and the angular resolution // *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. V. 59. Is. 4. P. 578–591.
16. *Litvak M.L. et al.* The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations // *Planetary and Space Science*. 2016. V. 122. P. 53–65.
17. *Allison J. et al.* Recent developments in GEANT4 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2016. V. 835. P. 186–225.
18. *Mesick K.E. et al.* Benchmarking Geant4 for Simulating Galactic Cosmic Ray Interactions Within Planetary Bodies // *Earth and Space Science*. 2018. V. 5. P. 324–338.
19. *Peplowski P.N. et al.* Cosmogenic radionuclide production modeling with Geant4: Experimental benchmarking and application to nuclear spectroscopy of asteroid (16) Psyche // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2019. V. 446. P. 43–57.
20. *Köhler J. et al.* Measurements of the neutron spectrum on the Martian surface with MSL/RAD // *J. Geophysical Research: Planets*. 2014. V. 119. P. 594–603.
21. *Малахов А.В. и др.* “Оазисы” льдистой вечной мерзлоты вблизи экватора Марса: нейтронное картографирование планеты по данным прибора ФРЕНД на борту спутника TGO российско-европейского проекта “ЭкзоМарс” // *Письма в астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*. 2020. Т. 46. С. 1–16.