

УДК 629.786.2:52.728

## ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В ОКРЕСТНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “БТН-НЕЙТРОН”

© 2022 г. М. Л. Литвак<sup>1</sup>, \*, И. Г. Митрофанов<sup>1</sup>, Д. В. Головин<sup>1</sup>, А. Пеков<sup>1</sup>, М. И. Мокроусов<sup>1</sup>, А. Б. Санин<sup>1</sup>, В. И. Третьяков<sup>1</sup>, Ц. П. Дачев<sup>2</sup>, Й. В. Семкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София, Болгария

\*litvak@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.10.2020 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В статье представлены результаты анализа данных космического эксперимента “БТН-Нейтрон”, проводимого на борту российского модуля “Звезда”, входящего в состав *Международной космической станции*. Большой период наблюдений с 2008 по 2019 г. захватывает конец 23-го и почти полностью включает 24-й солнечный цикл. Это позволило оценить амплитуду долгопериодических вариаций нейтронного фона снаружи *МКС*, обусловленных солнечной модуляцией Галактических космических лучей (ГКЛ). Для экваториальных областей с высоким индексом геомагнитного обреза она не превышает 10%, в то время как для высокоширотных областей вокруг магнитных полюсов Земли и Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАМА) нейтронный фон меняется почти в 1.5–2 раза. Для периодов минимума и максимума солнечной активности внутри 24-го солнечного цикла по данным эксперимента “БТН-Нейтрон” были построены карты распределения мощности нейтронной компоненты и оценены средние мощности нейтронной дозы, которую могли получить космонавты за эти периоды. Было показано, что для максимума и минимума солнечной активности средняя мощность нейтронной дозы меняется от 25 до 35 мкЗв/день для нейтронов с энергиями меньше 15 МэВ.

DOI: 10.31857/S0023420622030062

### ВВЕДЕНИЕ

На внешней поверхности российского модуля “Звезда”, входящего в состав *МКС*, установлен блок нейтронного спектрометра БТН-МД научной аппаратуры “БТН-Нейтрон” [1, 2]. В список основных научных задач этого эксперимента входят:

1) Непрерывный мониторинг в широком спектральном диапазоне нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности *МКС*, включая исследование вариаций фона на разных временных масштабах – от орбитальной переменности до долгопериодических изменений, связанных с одиннадцатилетним солнечным циклом.

2) Поиск пространственной переменности нейтронного потока на разных широтах, включая пролеты на ЮАМА и высокими геомагнитными широтами.

3) Мониторинг нейтронного фона во время сильных солнечных протонных событий и солнечных вспышек, поиск и регистрация солнечных нейтронов.

4) Оценка мощности нейтронной компоненты радиационной дозы и сопоставление с данными других экспериментов внутри и снаружи *МКС*.

Нейтронный фон на орбите *МКС* возникает как вторичное излучение за счет взаимодействия потоков галактических или солнечных космических лучей, а также протонов, захваченных в радиационных поясах Земли, с ядрами химических элементов, входящих в состав верхней атмосферы Земли и материалами самой орбитальной станции. Кроме этого, свой небольшой вклад вносят солнечные нейтроны, которые могут генерироваться в мощных солнечных протонных событиях.

Первичный поток протонов испытывает существенные временные и пространственные вариации, вызывая соответствующие вариации потока вторичных нейтронов. Измерения спектральной плотности нейтронного потока имеют не только важное значение для понимания физики первичных процессов (например, короткопериодических и долгопериодических вариаций ГКЛ или

распределения захваченных протонов радиационных поясах), но и для оценки радиационной дозы, связанной с нейтронной компонентой. В первую очередь это относится к жилым отсекам *МКС* и оценке радиационной дозы, которую могут получить космонавты во время длительного пребывания в космосе. Как правило, для небольших космических аппаратов основной вклад в радиационную дозу вносят заряженные частицы, а нейтроны составляют лишь небольшую, порядка 1–5%, часть (см., например, [3, 4]). Для крупных пилотируемых космических станций это соотношение может существенно поменяться за счет образования вторичных нейтронов первичными протонами ГКЛ внутри самой станции.

В последние годы был проведен ряд экспериментов и численных расчетов, которые позволили оценить спектральную плотность нейтронного потока внутри и вне *МКС* и определить вклад нейтронной компоненты в полную радиационную дозу. С помощью нейтронных детекторов, чувствительных к различным энергиям на основе тория и урана, с кадмиевыми и борными фильтрами внутри российского сегмента *МКС* была измерена мощность радиационной дозы нейтронной компоненты. Было показано, что ее величина в среднем составляет 60 мкЗв/день для нейтронов с энергиями до 20 МэВ и порядка 140 мкЗв/день в более широком, до нескольких сотен МэВ, диапазоне [5, 6]. Кроме этого, проводился мониторинг нейтронного потока помощью нейтронных спектрометров. Так, спектрометр Bonner Ball Neutron Detector (BBND), использующий 6 газонаполненных пропорциональных счетчиков, окруженных полиэтиленовыми сферами разного радиуса, позволял измерять нейтронный поток в диапазоне до 15 МэВ. Этот прибор разработан Японским космическим агентством (JAXA) и сначала был установлен внутри американского сегмента *МКС* (с 23.III.2001 по 14.XI.2001), а потом снаружи японского экспериментального сегмента (KIBO) *МКС* (измерения начались в августе 2009 г.), см. [7, 8]. По данным измерений была восстановлена спектральная плотность нейтронного потока и оценена мощность нейтронной компоненты радиационной дозы. В среднем она составила 69–88 мкЗв/день (в зависимости от расположения прибора внутри сегмента) [7]. Наибольшие значения (~100 мкЗв/час) наблюдались при пролете над ЮАМА [7].

Блок БТН-МД российского эксперимента “БТН-Нейтрон” установлен снаружи *МКС* и также использует многодетекторную схему, основанную на комбинации пропорциональных счетчиков с разной толщиной замедлителя из полиэтилена и органического сцинтиллятора из кристалла стибьбена, для регистрации эпитепловых и быстрых нейтронов с энергиями в диапазоне 1 эВ–15 МэВ. Эксперимент “БТН-Нейтрон”

начался в феврале 2007 г. и после летных отработок и калибровок начал постоянный мониторинг нейтронного фона снаружи российского служебного модуля “Звезда”. По данным этого космического эксперимента была оценена величина потока нейтронов в разных спектральных диапазонах и построены карты распределения потоков нейтронов на орбите *МКС*, которые хорошо согласуются с результатами эксперимента BBND [2]. Измерения спектральной плотности потока нейтронов были использованы для оценки нейтронной компоненты радиационной дозы. Максимальная мощность радиационной дозы составила более 50 мкЗв/ч при пролете над ЮАМА, а минимальная (~0.1 мкЗв/ч) при пролете над экваториальными районами с низкой геомагнитной широтой [2].

Одним из главных преимуществ эксперимента “БТН-Нейтрон” является длительная и непрерывная работа в течение 12 лет. Это позволяет следить за долгопериодическими вариациями потока нейтронов в окрестности *МКС* в ходе 23-го и 24-го солнечных циклов. В этой статье мы продолжили анализ данных этого эксперимента и исследовали, как менялся поток нейтронов и связанная с ним мощность нейтронной компоненты радиационной дозы в течение 2008–2020 гг. при пролете *МКС* над участками земной поверхности с разными индексами геомагнитного обрезания.

## ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ “БТН-НЕЙТРОН”

Научная аппаратура “БТН-Нейтрон” состоит из двух блоков. Один из них (блок управления) установлен внутри станции, а второй, блок детектирования БТН-МД, закреплен на специальном кронштейне снаружи станции. БТН-МД представляет собой запасной летный образец прибора ХЕНД, установленного на борту орбитального космического аппарата NASA *Марс Одиссей* и предназначенного для исследования и картографирования нейтронного излучения поверхности Марса [9]. Эта научная аппаратура работает на орбите вокруг Марса с 2001 г. Таким образом, на орбитах Земли и Марса, начиная с 2007 г. параллельно работают два идентичных нейтронных монитора, позволяющих одновременно наблюдать вариации нейтронного фона, следить за долгопериодическими вариациями ГКЛ, и, используя различные позиции Земли и Марса на своих орбитах вокруг Солнца, смотреть под разными углами на сильные солнечные события. В состав обоих приборов входят три детектора (SD, MD, LD), собранные на основе газонаполненных ( $^3\text{He}$ ) пропорциональных счетчиков нейтронов, окруженных экранами из кадмия и полиэтиленовыми обложками разной толщины. За счет реакции захвата теплового и эпитеплового нейтрона пропорцио-

нальный счетчик является эффективным детектором нейтронов с энергиями до нескольких сотен электронвольт. Оболочка из кадмия поглощает тепловые нейтроны с энергиями ниже 0.4 эВ. Полиэтилен (СН<sub>2</sub>) за счет наличия водорода является эффективным замедлителем нейтронов высоких энергий. Поэтому увеличивая толщину полиэтиленовой оболочки можно существенно повысить эффективность регистрации быстрых нейтронов. Выбранная конфигурация детекторов SD, MD, LD обеспечивает регистрацию нейтронов в широком диапазоне вплоть до нескольких МэВ [2].

Четвертый детектор, входящий в состав приборов “БТН-Нейтрон” и ХЕНД, предназначен для регистрации нейтронов высоких энергий в диапазоне от 350 кэВ до 15 МэВ. Он представляет собой органический сцинтиллятор, изготовленный из кристалла стильбена (С<sub>14</sub>Н<sub>12</sub>), окруженный активной защитой от совпадений из кристалла CsI:Тl<sub>3</sub><sup>+</sup>. Быстрые нейтроны в стильбене регистрируются по протонам отдачи. Поскольку сцинтилляторы также эффективно регистрируют заряженные частицы и гамма-фотоны, для того, чтобы выделить нейтронный сигнал используется специальная методика. Формы импульсов в стильбене от протонов отдачи (нейтронный сигнал) и электронов (гамма-сигнал) существенно различаются, что позволяет электронике эффективно разделять тип регистрируемых частиц. Кроме этого, внешний сцинтилляционный детектор (CsI:Тl<sub>3</sub><sup>+</sup>) малочувствителен к нейтронам, но имеет высокую эффективность при регистрации гамма-лучей и заряженных частиц с энергиями выше 50 кэВ. За счет включения схемы анти-совпадений это дает возможность существенно подавить фон внешних протонов (ГКЛ, СКЛ, радиационные пояса). При установке блока БТН-МД на борту космической станции ось сцинтилляционного блока была ориентирована таким образом, чтобы часть кристалла стильбена, закрытая внешним детектором, смотрела в зенит, т.е. в открытое космическое пространство, а открытая часть в надир – в сторону Земли и основной массы космической станции. Таким образом, телесный угол, в котором доминируют протоны космических лучей, закрыт защитой от совпадений. В телесном угле, где нет защиты от совпадений, наибольший вклад дают нейтроны, произведенные протонами космических лучей в материалах станции. Использование сцинтилляционных детекторов расширило энергетический диапазон регистрируемых нейтронов до энергий в 15 МэВ.

#### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПРОЦЕДУРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Научная аппаратура “БТН-Нейтрон” была установлена вне станции 23.XI.2006, а первые те-

стовые измерения и летные испытания начались 22.II.2007. В этой статье мы представляем данные, полученные за период с конца 2008 г. по конец 2019 г.

В соответствии с процедурами обработки данных [2] были учтены и скорректированы систематические инструментальные эффекты.

В нашем анализе мы работали с периодами спокойного солнца, поэтому из данных исключались сильные солнечные протонные события, во время которых фон может возрасти в десятки раз.

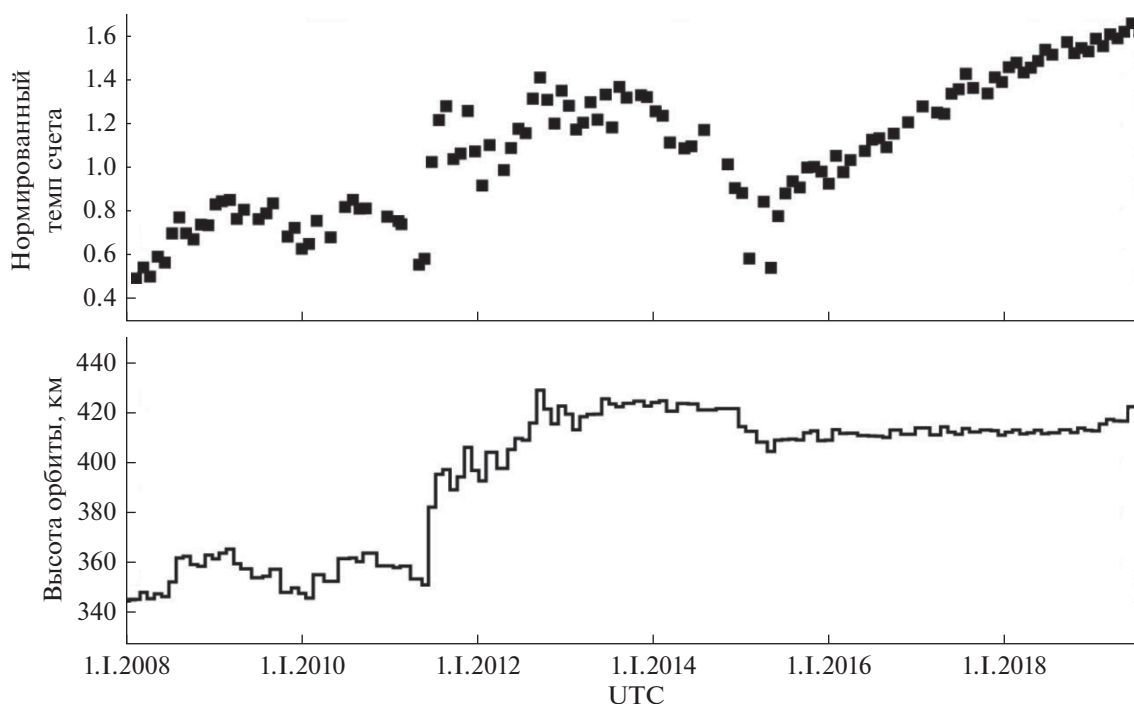
Детекторы, основанные на пропорциональных счетчиках, также способны регистрировать заряженные частицы, прежде всего протоны, способные вызвать ионизацию газа внутри счетчика, поэтому использовалась специальная методика анализа спектров, позволяющая выделять в этих детекторах нейтронный сигнал. Ее особенно важно применять при пролете магнитных аномалий и на высоких геомагнитных широтах, где фон заряженных частиц возрастает на порядки [2].

Ранее было обнаружено, что темп счета в детекторах зависит от температуры за счет температурного дрейфа коэффициента усиления. Эта зависимость достаточно хорошо описывается полиномом 2 степени, что позволяет сравнительно легко исключить ее из данных [2].

Используя процедуры обработки данных, мы постарались проанализировать и привести к одинаковым условиям измерений весь доступный набор данных “БТН-Нейтрон”. Это позволило провести поиск долгопериодических вариаций при пролете *МКС* над разными участками поверхности Земли.

#### ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ОКРЕСТНОСТИ *МКС*

Нейтронный фон – это вторичное излучение, прежде всего возникающее при взаимодействии высокоэнергичных протонов с корпусом *МКС*. В предыдущих работах (см., например, [2, 7]) было показано, что пространственное распределение нейтронного фона при пролете над различными участками поверхности Земли крайне неоднородно и определяется конфигурацией магнитного поля Земли. Эту зависимость можно охарактеризовать с помощью параметра жесткости геомагнитного обрезания. Он вводится как минимальное значение импульса заряженной частицы, необходимого для ее вертикального проникновения до поверхности Земли (см., например, [10–12]). Для проникновения на высоту орбиты *МКС* в экваториальных районах заряженная частица должна иметь высокую начальную энергию, поскольку ей требуется двигаться перпендикулярно магнитным силовым линиям, направленным в этих районах преимущественно параллельно земной



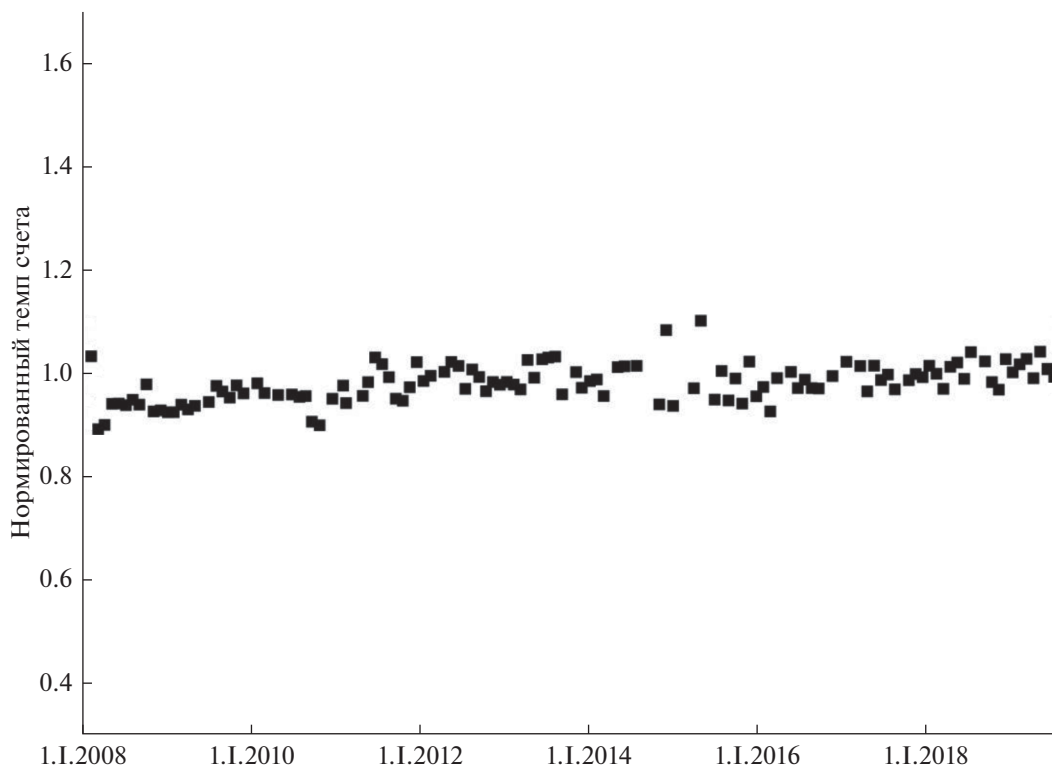
**Рис. 1.** Долгопериодические вариации нейтронного потока, измеренные НА “БТН-Нейтрон” при пролете над ЮАМА (верхний график) и их сопоставление с вариациями орбиты *МКС* (нижний график).

поверхности. В окрестностях магнитных полюсов частице достаточно иметь меньшую начальную энергию, т.к. магнитные силовые линии направлены под большим углом к поверхности Земли.

В целом можно выделить три области, где различие по наблюдаемому нейтронному потоку может достигать нескольких порядков. Наиболее низкие значения интенсивности нейтронного потока наблюдаются при пролете над экваториальными областями с жесткостью геомагнитного обрезания  $>10$  ГВ. На высоких широтах, по мере приближения к магнитным полюсам, жесткость геомагнитного обрезания понижается до значений  $<1$  ГВ, а нейтронный поток возрастает более чем на порядок [2, 7]. Наконец, максимальные значения интенсивности нейтронного потока наблюдаются в области ЮАМА. Здесь напряженность магнитного поля Земли падает до минимальных значений, а внутренний радиационный пояс с захваченными заряженными частицами опускается до высот всего в 200 км. Внутренний радиационный пояс населен большим количеством протонов с энергиями  $>100$  МэВ, что достаточно для производства вторичных нейтронов в обшивке *МКС* при ее пролете через ЮАМА. Поэтому интенсивность потока нейтронов над этой областью в 10 раз превышает значения, которые наблюдаются на высоких геомагнитных широтах, и в 100 раз — данные измерений над экваториальными районами с высоким показателем жесткости геомагнитного обрезания.

Научная аппаратура “БТН-Нейтрон” работает на борту *МКС* уже более 12 лет, что позволяет использовать полученные данные для поиска, наблюдения и анализа долгопериодических вариаций нейтронного потока вокруг станции. Исходя из выше сказанного, этот анализ зависит от того за каким районом над поверхностью Земли ведется наблюдение.

При пролете над ЮАМА значимую роль играет высота орбиты. Плотность заряженных частиц здесь сильно меняется с высотой и даже небольшие коррекции орбиты *МКС* могут приводить к вариациям наблюдаемого потока заряженных частиц, и, соответственно, потока вторичных нейтронов в несколько раз. Так, небольшие изменения в средней высоте орбиты *МКС* вызывают существенные колебания темпа счета в нейтронных детекторах, а поднятие высоты орбиты *МКС* с 350 до 390 км в 2011 г. привело к тому, что нейтронный поток при пролете над ЮАМА возрос почти в два раза [2]. На рис. 1 показаны вариации нейтронного потока при пролете над ЮАМА за все время наблюдений БТН. Из этого рисунка хорошо видна высокая степень корреляции высоты орбиты станции и величины нейтронного потока. Она хорошо заметна в данных вплоть до середины 2015 г. После этого и до конца 2018 г. высота орбиты станции оставалась примерно постоянной (~410–415 км). Этот период частично захватил минимум и максимум солнечной активности внутри 24-го солнечного цикла. В данных, при



**Рис. 2.** Долгопериодические вариации нейтронного потока, измеренные НА “БТН-Нейтрон” при пролете над экваториальными районами Земли с высоким индексом геомагнитного обрезания.

пролетах над ЮАМА, это отразилось в виде монотонного роста, за счет увеличения потока ГКЛ в ходе солнечного цикла. Общая амплитуда вариаций на этом временном интервале, когда высота орбиты *МКС* оставалась примерно постоянной, составила примерно 1.6 раза (см рис. 1).

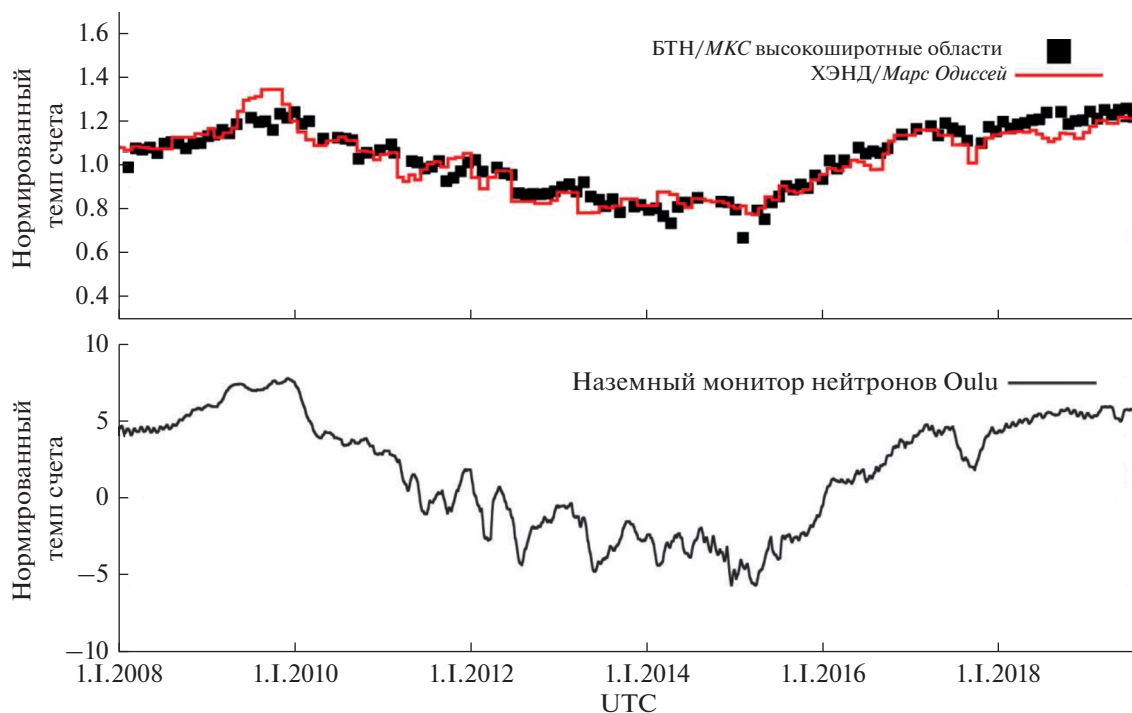
Зависимость долгопериодических вариаций вторичного нейтронного потока напрямую связана с солнечной модуляцией ГКЛ и проявляется в разной степени при пролете и над другими областями Земли, в зависимости от конфигурации магнитного поля Земли.

В гелиосфере частицы ГКЛ подвергаются воздействию межпланетных магнитных полей и солнечного ветра, и поэтому поток ГКЛ варьируется в течение 11-летнего солнечного цикла. Солнечная модуляция ГКЛ проявляется как антикорреляция потока ГКЛ и уровня солнечной активности (см., например, [13–17]). Наибольшее влияние солнечная модуляция оказывает на низкоэнергетичную часть спектра ГКЛ (<10 ГэВ). В течение максимума солнечной активности поток ГКЛ может существенно уменьшаться за счет вымывания низкоэнергетичных заряженных частиц (см., например, рис. 1 из [16]), приводя к соответствующему уменьшению потока вторичных частиц, произведенных ГКЛ в веществе планет и космических аппаратов. В этом спектральном диапазо-

не вариации потока ГКЛ могут составить несколько раз.

Таким образом, при пролетах *МКС* над экваториальными районами Земли с высоким индексом геомагнитного обрезания, наблюдаемые долгопериодические вариации должны иметь маленькую амплитуду. Это связано с тем, что сюда проникают только заряженные частицы ГКЛ с высокими энергиями, поток которых мало подвержен солнечной модуляции. Подтверждение данного вывода проиллюстрировано на рис. 2, где показаны вариации нейтронного потока, наблюдавшиеся при пролете экваториальных районов в интервале долгот от 80° в.д. до 140° в.д. с индексом геомагнитного обрезания ~15 ГВ. Хорошо видно, что в указанных районах поток нейтронов в течение всего периода наблюдений менялся в среднем не более чем на 10%.

С точки зрения поиска долгопериодических вариаций особый интерес представляют пролеты над высокоширотными областями с низким индексом геомагнитного обрезания, где находятся магнитные полюса Земли. На высоких широтах (~50° с.ш./ю.ш.), над которыми пролетает *МКС*, в зависимости от близости к магнитным полюсам, индекс геомагнитного обрезания может составлять 1–3 ГВ (см., например, [18]). Сюда могут проникать заряженные частицы ГКЛ низких энергий, поток которых в наибольшей степени зависит от



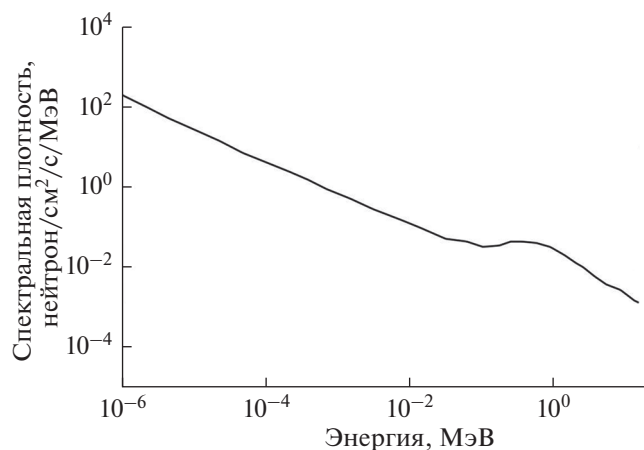
**Рис. 3.** Долгопериодические вариации нейтронного потока, измеренные НА “БТН-Нейтрон” при пролете над областями вокруг магнитных полюсов Земли (верхний график) и их сопоставление с данными наблюдений другого космического нейтронного монитора (прибор ХЭНД на борту КА *Марс Одиссей*, верхний график, красный цвет) и наземного нейтронного монитора в университете Oulu, Финляндия (нижний график).

солнечной модуляции. На рис. 3 (верхний график) показана кривая темпа счета нейтронов, усредненная по пролетам над северной и южной областями вокруг магнитных полюсов Земли. Хорошо видно, что представленный временной профиль демонстрирует существенные колебания (около полутора раз), которые коррелируют с одиннадцатилетним солнечным циклом, точнее с концом 23-го цикла (декабрь 2008) и большей частью 24-го цикла (заканчивается примерно в мае 2020). Благодаря длительной работе НА БТН на борту *МКС* удалось наблюдать два минимума солнечной активности (в конце 2009 г. и в конце 2018), а также один максимум (в 2014). Полученный профиль нейтронного потока мы сопоставили с другими наблюдениями вариаций потока ГКЛ. На рис. 3 (нижний график) представлен профиль приполярного наземного нейтронного монитора, установленного в университете Oulu, Финляндия (индекс геомагнитного обрезания 0.8 ГВ (см., например, <https://www.nmdb.eu/station/oulu/>), входящего в сеть наземных нейтронных мониторов, предназначенных для наблюдений вариаций потока ГКЛ. Из сопоставления приведенных на рис. 3 графиков следует, что оба временных профиля, построенных по данным измерений на поверхности и на орбите, хорошо согласуются друг с другом в части крупномасштабной переменности. При этом относительная амплитуда вариации, из-

меренная научной аппаратурой “БТН-Нейтрон” существенно выше, по сравнению с той, что наблюдалась по данным наземного нейтронного монитора Oulu. По всей видимости это связано с условиями измерений в космосе и на Земле. “БТН-Нейтрон” в основном регистрирует вторичные нейтроны произведенные заряженными частицами ГКЛ в корпусе *МКС* и в верхних частях земной атмосферы. Темп счета наземного нейтронного монитора определяется сверткой спектра ГКЛ и функцией выхода детектора, которая зависит и от эффективности выхода детектора, и от прохождения частиц ГКЛ через атмосферу с образованием вторичных частиц в атмосферных ливнях [19] и может давать меньшие вариации сигнала чем исходная модуляция ГКЛ.

Прибор ХЭНД, установленный на борту КА *Марс Одиссей*, и представляющий собой копию научной аппаратуры “БТН-Нейтрон” (см., выше описание научной аппаратуры “БТН-Нейтрон”), работал на орбите Марса параллельно с “БТН-Нейтрон”. Его данные мы также наложили на графике наблюдений на борту *МКС* и получили хорошее согласие как в долгопериодической переменности (совпадение основных минимумов и максимумов, перепад по амплитуде между ними), а также в большей части мелкомасштабных особенностей.





**Рис. 4.** Спектральная плотность нейтронного потока при пролете *МКС* над экваториальными районами с высоким индексом геомагнитного обрезания.

Таким образом, сравнительный анализ всех представленных данных позволяет изучить, насколько одинаково меняется поток ГКЛ во внутренней части солнечной системы на разных расстояниях от Солнца.

#### МОДЕЛЬНО-ЗАВИСИМОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА И ОЦЕНКА МОЩНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗЫ

Детекторы, входящие в состав НА “БТН-Нейтрон”, позволяют регистрировать нейтроны в широком диапазоне энергий (от 0.4 эВ до 15 МэВ). По полученным данным можно вычислить спектральную плотность нейтронного потока и затем оценить вклад нейтронной компоненты в полную дозу. Чтобы перейти от отсчетов в детекторе к спектру попадающих в него нейтронов, в общем случае необходимо решить сложное интегральное уравнение [2], где производится свертка определяемого спектра нейтронов с функцией чувствительности самого детектора.

Вместо решения такого уравнения, часто используют модельный подход, в рамках которого подбирается аналитическая функция со свободными параметрами, описывающая предполагаемую форму спектра. Детекторный блок “БТН-Нейтрон” установлен снаружи служебного модуля “Звезда”, так что значительную часть телесного угла поля зрения детекторов занимает сама *МКС*. Поэтому, большой вклад в измеряемый нейтронный поток дает собственный фон станции, произведенный протонами ГКЛ и протонами, захваченными в радиационных поясах Земли.

Функция, описывающая предполагаемую форму нейтронного спектра, подвергается опера-

ции “свертка” с функцией эффективности детекторов, чтобы получить модельный темп счета. С помощью процедуры минимизации функционала невязки модельного и измеренного спектров, ее свободные параметры варьируются до тех пор, пока модельные отсчеты наилучшим образом не совпадут с экспериментальными измерениями. Использование статистических критериев сравнения (например, критерий Пирсона) позволяют оценить, насколько предложенная модель с конкретными значениями параметров (проверяемая гипотеза) может быть принята в качестве адекватного описания данных (см., например, [2]).

В этой работе мы использовали результаты анализа, полученные в работах [2, 7], а также численные расчеты. Модельная форма спектра представлена на рис. 4, на котором в качестве примера показана спектральная плотность нейтронного потока для пролетов *МКС* над экваториальными районами.

Форма нейтронного спектра может быть условно разделена на три части. Самая низкоэнергичная часть спектра (не показана на рисунке) характеризуется диапазоном энергий много меньше 1 эВ и описывается распределением Максвелла нейтронов с тепловыми скоростями нейтронов.

Средняя часть спектра выше 1 эВ и до десятков кэВ описывается степенным законом, представляющей собой процесс замедления быстрых нейтронов в веществе *МКС* за счет реакций упругого и неупругого рассеяния.

Распределение нейтронов высоких энергий, начиная от 10 кэВ и заканчивая сотнями МэВ, имеет наиболее сложную структуру с наличием локальных минимумов и максимумов. Она объясняется наличием резонансов и пороговых реакций с ядрами мишени, а также спадающим хвостом нейтронов высоких энергий, непосредственно рожденных при взаимодействии заряженных частиц ГКЛ и вещества *МКС* в реакциях скалывания (spallation reaction).

С точки зрения радиационной обстановки наибольшую опасность представляют нейтроны именно высоких энергий, так как они эффективно замедляются, оставляя большую часть своей энергии в водородосодержащих средах (человеческое тело).

Космические нейтронные спектрометры, такие как “БТН-Нейтрон”, обычно предназначены для оценки амплитуды вариаций спектральной плотности нейтронного потока во времени и пространстве. Это необходимо для решения различных планетологических задач, чтобы, например, оценить как распределена вода по поверхности планеты или для оценки хода сезонных вариаций (как это делается для Марса в эксперименте ХЕНД). Поэтому такие приборы не проходили

**Таблица 1.** Оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы для максимума и минимума солнечной активности (24-й солнечный цикл) при пролете *МКС* над различными областями

	Измерения во время максимума солнечной активности, мкЗв/ч	Измерения во время минимума солнечной активности, мкЗв/ч
Экваториальные области	0.184 ± 0.002 (0.47 ± 0.047)*	0.197 ± 0.002 (0.49 ± 0.049)
Высокоширотные области	1.31 ± 0.01 (3.5 ± 0.35)	2.03 ± 0.02 (5.1 ± 0.51)
ЮАМА	17.0 ± 0.8 (31.1 ± 3.11)	25.9 ± 1.1 (37.1 ± 3.71)
Средняя доза, мкЗв/день	25.1 ± 0.8 (66.7 ± 6.7)	35.3 ± 1.2 (76.2 ± 7.6)

\* – в скобках показаны измерения болгарского дозиметра R3DR/R3DR2.

специальную наземную калибровку для измерения поглощенных доз. Тем не менее, имея экспериментальную абсолютную оценку спектральной плотности потока нейтронов, можно перейти к решению практических задач, в том числе к оценке эквивалентной дозы нейтронной компоненты радиационного фона. Для этого, в соответствии с общепринятыми нормами радиационной безопасности, можно использовать взвешивающие коэффициенты, которые определяют степень воздействия данного типа излучения на человеческие органы и позволяют оценить эквивалентную дозу на единичный поток нейтронов с данной энергией (см., например, [20] или нормы радиационной безопасности). Из зависимости взвешивающих коэффициентов для нейтронов от энергии следует, что различие в поражающем воздействии быстрых нейтронов с энергиями более 1 МэВ и тепловыми нейтронами составляет почти два порядка. В нашем анализе мы оценивали мощность эквивалентной дозы нейтронов (*D*) по следующей формуле:

$$D = \int_{E_1}^{E_2} \frac{dN}{dE}(E) g(E) dE, \quad (1)$$

где  $\frac{dN}{dE}(E)$  – это спектральная плотность потока нейтронов, полученная по данным измерений “БТН-Нейтрон”, *g*(*E*) – это функция, описывающая зависимость взвешивающих коэффициентов от энергии. В качестве пределов интегрирования брались значения от 0.4 эВ до 15 МэВ. Это энергетический диапазон, соответствующий чувствительности нейтронных детекторов “БТН-Нейтрон”. Именно для него была верифицирована зависимость  $\frac{dN}{dE}(E)$ .

Используя выражение (1), мы оценили мощность эквивалентной дозы нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности *МКС* для разных периодов времени и пролетов над разными участками поверхности. С точки зрения временного анализа было проведено сравнение измерений для периодов максимума и минимума солнечной активности, так как существенные ва-

риации потока ГКЛ могли значимо изменить нейтронный поток и, соответственно, величину нейтронной дозы. Были выбраны два интервала времени с 1.I.2014 по 1.VII.2015 и с 1.I.2018 по 1.I.2019. Первый интервал соответствует минимуму, а второй – максимуму потока ГКЛ и вторичных нейтронов в ходе 24-го солнечного цикла. Кроме этого, были получены средние оценки мощности нейтронной дозы для различных областей: экваториальные области с высоким индексом геомагнитного обрезания (10–20 ГВ), области вокруг магнитных полюсов Земли с низким индексом геомагнитного обрезания (1–2 ГВ) и выделенная область ЮАМА, где из-за локальной особенности напряженности магнитного поля Земли радиационный пояс подходит близко к ее поверхности, существенно увеличивая плотность заряженных частиц (и, соответственно, вторичных нейтронов) на высотах орбиты *МКС*. Результаты оценок радиационных доз суммированы ниже в табл. 1.

Хорошо видно, что мощность нейтронной компоненты радиационной дозы сильно меняется при пролетах в окрестностях магнитных полюсов Земли. Можно оценить, что вариации мощности эквивалентной нейтронной дозы в этом случае достигают 1.5 раза, меняясь от 1.3 до 2.0 мкЗв/ч.

В предыдущем параграфе было также показано, что при пролетах над ЮАМА важную роль в модуляции величины вторичного нейтронного потока, возникающего в обшивке *МКС* из-за столкновений с заряженными частицами внутреннего радиационного пояса, играют изменения высоты орбиты станции. Это может приводить к вариациям нейтронного потока до 2 раз (см. рис. 1). Однако, начиная с апреля 2015 по январь 2019 г., средняя высота орбиты сохранялась почти постоянной, но при этом наблюдался существенный рост нейтронного потока. Как и в случае с магнитными полюсами, скорее всего это было связано с увеличением потока ГКЛ по мере приближения к минимуму солнечного цикла. В итоге, это привело к тому, что мощность эквивалентной нейтронной дозы над ЮАМА также возросла в 1.5 раза с 17 мкЗв/ч во время максимума солнеч-



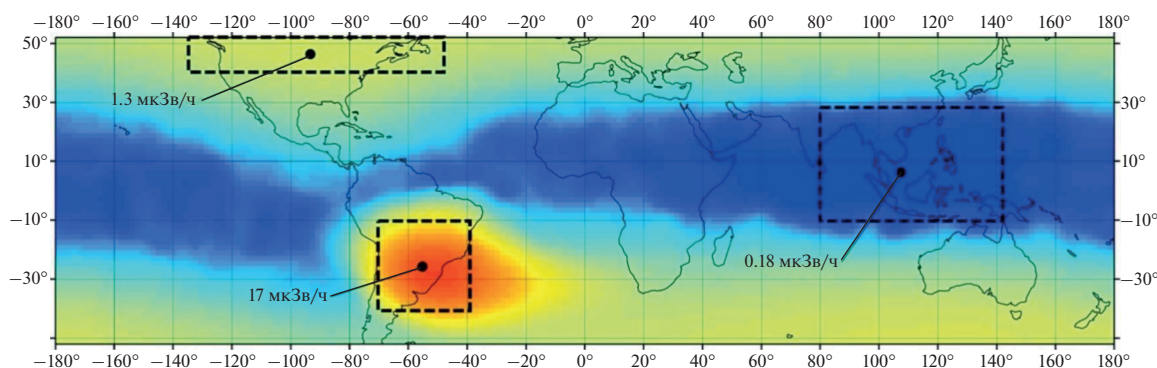


Рис. 5. Карта мощности нейтронной эквивалентной дозы, полученная по данным эксперимента “БТН-Нейтрон” за период 1.I.2014–1.VII.2015.

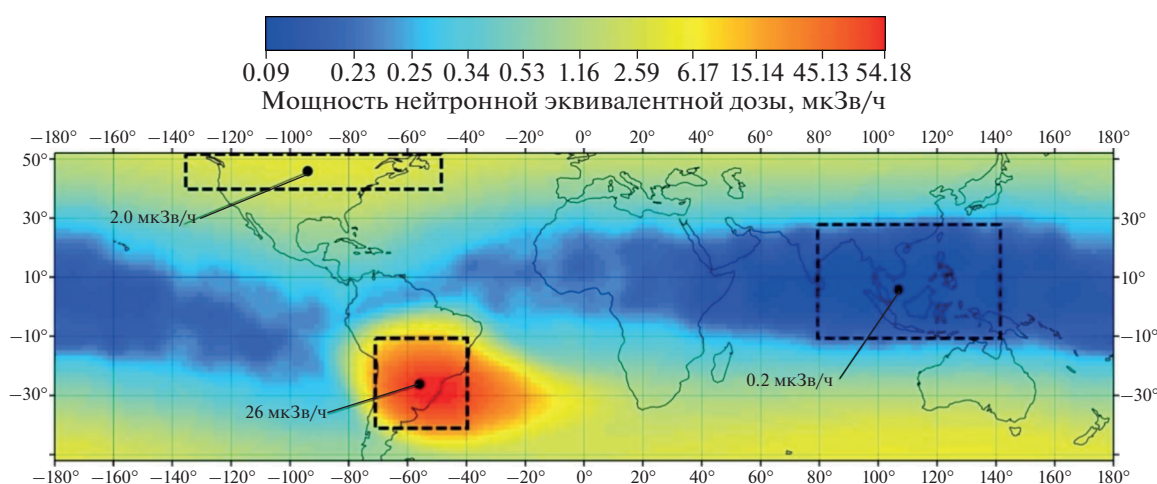


Рис. 6. Карта мощности нейтронной эквивалентной дозы, полученная по данным эксперимента “БТН-Нейтрон” за период 1.I.2018–1.I.2019.

ной активности до 26 мкЗв/ч во время минимума солнечной активности.

Наконец, над экваториальными районами с высоким индексом геомагнитного обрезания, куда проникают только самые энергичные частицы ГКЛ, изменения как потока ГКЛ, так и потока вторичных нейтронов практически не заметны (колеблются в пределах 10%). Поэтому и пересчет в мощность эквивалентной нейтронной дозы не приводит к большим изменениям. В среднем за все время наблюдений мощность эквивалентной нейтронной дозы над этими районами составляет 0.19 мкЗв/ч.

Чтобы оценить вклад пролетов над различными участками поверхности Земли в среднюю дозу, полученную космонавтами за большой период времени пребывания на орбите, мы построили карты (с разрешением 2 на 2 град. в диапазоне от широт от  $-51.5^\circ$  до  $+51.5^\circ$ , где летает МКС) мощности нейтронных доз для минимума и максимума солнечной активности. Они показаны на рис. 5 и 6.

Обе карты отражают исходное распределение нейтронного потока. Наиболее низкие значения нейтронных доз  $\sim 0.1$  мкЗв/ч наблюдаются при пролете над экваториальными областями с минимальными значениями нейтронного потока. При переходе на высокие геомагнитные широты мощность нейтронной дозы возрастает до значений 1–5 мкЗв/ч. Максимальные дозы, как и следовало ожидать, регистрируются при пролетах над ЮАМА. Они составляют 40–60 мкЗв/ч.

Используя построенные карты, можно оценить сколько времени МКС находилась над тем или иным участком поверхности и посчитать средневзвешенную дозу, полученную космонавтами в ходе минимума и максимума солнечной активности. Эти оценки также представлены на последней строке в табл. 1. Видно, что средняя мощность эквивалентной нейтронной дозы в ходе минимума солнечного цикла составляет порядка 35 мкЗв/день, а средняя мощность эквивалентной нейтронной дозы во время максимума солнечной активности опускается до 25 мкЗв/день.

Полученные данные можно сравнить с другими измерениями нейтронного фона, которые были сделаны внутри и снаружи *МКС*. Так, измерения, полученные с помощью нейтронных детекторов в рамках эксперимента BRADOS, установленных внутри модуля “Звезда”, составили 57 мкЗв/день для диапазона 0.2–20 МэВ [5] и 140 мкЗв/день для всего диапазона, с учетом нейтронов с энергиями в несколько сотен МэВ [6]. Наблюдаемые различия результатов этих двух экспериментов связаны с разными энергетическими диапазонами, а также с тем, что поток вторичных нейтронов внутри станции может быть выше за счет образования большого количества вторичных нейтронов в элементах конструкции внутри *МКС*. Оценки нейтронной компоненты радиационной дозы, полученные с помощью данных эксперимента “БТН-Нейтрон”, получены для диапазона 0.4 эВ–15 МэВ в соответствии с чувствительностью нейтронных детекторов, входящих в состав научной аппаратуры БТН. Вычисления показывают, что пересчет нейтронной дозы от диапазона 0.4 эВ–15 МэВ к диапазону 0.4 эВ–500 МэВ может увеличить мощность эквивалентной дозы до 3–4 раз за счет учета нейтронов высоких энергий, оказывающих наибольшее поражающее воздействие на человеческий организм. Таким образом, экстраполяция измерений “БТН-Нейтрон” вне станции указывает, что мощность нейтронной дозы может составлять 75–140 мкЗв/день, что в целом сопоставимо с измерениями, проведенными внутри станции.

Кроме сопоставления с измерениями, сделанными внутри станции, мы сравнили измерения “БТН-Нейтрон” с данными, полученными болгарскими дозиметрами R3DR и R3DR2 [21, 22], установленными на российском сегменте *МКС*, в непосредственной окрестности (на расстоянии 5–6 м) от “БТН-Нейтрон”. Они представляют собой компактные приборы для измерения солнечного излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазоне (4 канала), а также ионизирующего излучения с помощью полупроводникового детектора (кремниевый PIN – диод производства Hamamatsu). Методика обработки данных этого эксперимента позволяет, в том числе, грубо выделять и нейтронную компоненту. Первые результаты сравнения мощности нейтронной компоненты радиационной дозы, измеренной прибором “БТН-Нейтрон” для максимума и минимума солнечной активности с аналогичными данными, полученными с помощью приборов R3DR и R3DR2, показаны в табл. 1. Так как научная аппаратура “БТН-Нейтрон” и R3DR/R3DR2 работали одновременно, то в качестве периода солнечного максимума для R3DR/R3DR2 выбран интервал с 1.V по 15.VI.2015, а качестве периода солнечного минимума – интервал с 11.VI по 20.VIII.2010. Из табл. 1 видно, что наиболее близкие значения наблюдаются в области ЮАМА, где

разница составляет менее 2 раз. В экваториальных и высокоширотных областях мощность нейтронной компоненты радиационной дозы, измеренная болгарскими дозиметрами, примерно в 2–3 раза больше, чем измерения “БТН-Нейтрон”. Одним из важных факторов здесь является только примерная оценка нейтронного сигнала, так как R3DR и R3DR2 были изначально спроектированы для измерения дозы от ионизированных частиц, а не от нейтронов. Нейтронный сигнал оценивается как разница между полным темпом счета и вкладом от заряженных частиц. Кроме этого, как и в случае с экспериментом BRADOS, наблюдаемое различие также связано с различной чувствительностью по энергии. Наземные калибровки показали, что порог регистрации нейтронов в приборах R3DR и R3DR2 составляет ~1 МэВ, а верхняя граница может составлять около 50 МэВ. Это существенно более широкий диапазон, нежели чем у “БТН-Нейтрон”, что может увеличивать измеряемую дозу до двух раз. При этом для измерений над ЮАМА различие между двумя экспериментами меньше, так как основной вклад в измерения могут давать нейтроны более низких энергий, примерно одинаково наблюдаемые в экспериментах “БТН-Нейтрон” и R3DR/R3DR2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проанализированы данные космического эксперимента “БТН-Нейтрон”, проводимого на борту российского модуля “Звезда” *Международной космической станции*. Основная цель исследований заключалась в поиске и анализе долгопериодических вариаций нейтронного потока в диапазоне энергий от 0.4 эВ до 15 МэВ в окрестности станции за период с 2008 по 2019 гг. Двенадцать лет непрерывной работы научной аппаратуры “БТН-Нейтрон” позволили оценить, насколько сильно менялся нейтронный поток с изменением солнечной активности, в том числе при переходе от минимума к максимуму солнечной активности в ходе последнего, 24-го, солнечного цикла. Было показано, что можно выделить три больших географических района, где вариации нейтронного потока ведут себя по-разному: 1) экваториальный район с высоким индексом геомагнитного обреза; 2) области в окрестностях магнитных полюсов Земли; 3) область ЮАМА. В первом случае наблюдаемые вариации за время работы научной аппаратуры БТН составили не более 10%, что объясняется высоким индексом геомагнитного обреза, благодаря чему в эту область проникают только самые высокоэнергетичные частицы ГЛ, слабо зависящие от вариаций межпланетного магнитного поля в гелиосфере. Здесь наблюдается самый низкий поток вторичных нейтронов и, соответственно, самые низкие

показатели радиационного фона. Мощность нейтронной компоненты в этих районах составляет всего  $\sim 0.1$  мкЗв/ч. В районе магнитных полюсов индекс геомагнитного обрезания падает до 1–3 ГВ, поэтому здесь существенно возрастает поток заряженных частиц (за счет проникания низкоэнергичной компоненты ГКЛ) и поток вторичных нейтронов, генерируемых в обшивке МКС. Амплитуда вариаций нейтронного потока и мощности нейтронной компоненты в ходе солнечного цикла составляют здесь до 70%, а нейтронный фон в среднем колеблется в диапазоне 1.3–2.0 мкЗв/ч. Наконец, при пролетах над областью ЮАМА наблюдается самый большой поток заряженных частиц за счет их проникновения из внутреннего радиационного пояса. Это приводит к большому потоку вторичных нейтронов, который превышает экваториальные значения дозы больше чем на два порядка. Определяющую роль в наблюдаемых вариациях играет изменение высоты орбиты станции. Повышение высоты орбиты на несколько десятков километров может привести к увеличению потока вторичных нейтронов до двух раз. В те же моменты, когда высота орбиты постоянна, основной вклад, как и в случае окрестностей магнитных полюсов, вносят вариации потока ГКЛ. По данным эксперимента “БТН-Нейтрон” было обнаружено, что вариации потока вторичных нейтронов в области ЮАМА между минимумом и максимумом солнечного цикла составляют 1.6 раза. Это привело к тому, что мощность нейтронной дозы возросла с 17 до 26 мкЗв/ч.

Чтобы оценить, насколько в среднем менялась радиационная обстановка в ходе 24-го солнечного цикла, были построены карты мощности нейтронной дозы для минимума (1.I.2018–1.I.2019) и максимума солнечной активности (1.I.2014–1.VII.2015). Было обнаружено, что с учетом времени пролета МКС над различными областями мощность нейтронной дозы составляет в среднем 25 мкЗв/день для солнечного максимума и 35 мкЗв/день для солнечного минимума. Эти измерения получены для диапазона чувствительности детекторов научной аппаратуры “БТН-Нейтрон” от 0.4 эВ до 15 МэВ. Экстраполяция в диапазон энергий нейтронов до нескольких сотен МэВ показывает, что доза может увеличиться в 3–4 раза до значений 75–140 мкЗв/день, что сопоставимо с другими измерениями нейтронного фона, сделанными внутри и снаружи МКС.

В части обработки данных эксперимента “БТН-Нейтрон” работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, грант АААА-А18-118012290370-6.

В статье также используются общедоступные данные измерений болгарских дозиметров типа Liulin (см. <http://esapro.space.bas.bg/database>),

подготовленные при поддержке ЕКА, контракт № 4000117692/16/NL/NDe (финансируется Правительством Болгарии в рамках контракта ESA в рамках PECS). Обработка и анализ этих данных также поддержаны Соглашением между РАН и БАН “Фундаментальные космические исследования” и Болгарским научным фондом (проект № 129, двусторонний проект Болгария-Россия 2018-2019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Третьяков В.И. и др.* Первый этап космического эксперимента “БТН-Нейтрон” на борту российского сегмента *Международной космической станции* // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 293–307.
2. *Литвак М.Л. и др.* Наблюдение пространственных и временных вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента *Международной космической станции* по данным космического эксперимента “БТН-НЕЙТРОН” // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 116–130.
3. *Köhler J. et al.* Measurements of the neutron spectrum in transit to Mars on the Mars science laboratory // *Life Sci. Space Res.* 2015. V. 5. P. 6–12.
4. *Litvak M.L. et al.* Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations // *Planetary Space Science.* 2020. V. 184. P. 104866.
5. *Palfalvi J.K. et al.* Cosmic ray studies on the ISS using SSNTD, BRADOS projects, 2001–2003 // *Radiat. Meas.* 2005. V. 40. P. 428–432.
6. *Shurshakov V.A. et al.* Evaluation of the spectrometric and dose characteristics of neutron fields inside the Russian segment of the ISS by fission detectors // *Cosmic research.* 2016. V. 54. P. 111–117.
7. *Koshiishi H. et al.* Evaluation of the neutron radiation environment inside the *International Space Station* based on the Bonner Ball Neutron Detector experiment // *Radiation Measurements.* 2007. V. 42. P. 1510–1520.
8. *Koga K. et al.* Measurement of high-energy neutrons at ISS by SEDA-AP // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. P. 411–416.
9. *Mitrofanov I.G. et al.* Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science.* 2001. V. 297. P. 78–81.
10. *Herbst K. et al.* Influence of the terrestrial magnetic field geometry on the cutoff, rigidity of cosmic ray particles // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 1637–1643.
11. *Shea M.A., Smart D.F.* Estimating cosmic ray vertical cutoff rigidities as a function of the McIlwain L-parameter for different epochs of the geomagnetic field // *Phys. Earth Planet. Int.* 1986. V. 48. P. 200–205.
12. *Pilchowski J. et al.* On the definition and calculation of a generalised McIlwain parameter // *Astrophys. Space Sci.* 2010. V. 6. P. 9–17.
13. *Gleeson L.J., Axford W.I.* Solar modulation of galactic cosmic rays // *Astrophys. J.* 1968. V. 154. P. 1011.

14. *Caballero-Lopez R.A., Moraal H.* Limitations of the force field equation to describe cosmic ray modulation // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. A01101.
15. *Scherer K. et al.* Interstellar-terrestrial relations: Variable cosmic environments, the dynamic heliosphere, and their imprints on terrestrial archives and climate // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 127. P. 327–465.
16. *Usoskin I.G. et al.* Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951–2004 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. A12108.
17. *Usoskin I.G. et al.* Solar modulation parameter for cosmic rays since 1936 reconstructed from ground-based neutron monitors and ionization chambers // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. A02104.
18. *Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H. et al.* World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade // *Advances in Space Research.* 2021. V. 67. P. 2231–2240.
19. *Clem J.M., Dorman L.I.* Neutron monitor response functions // *Space Science Reviews.* 2000. V. 93. P. 335–359.
20. *International Commission on Radiation Units and Measurements.* Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57. Bethesda, Maryland. ICRU (1998).
21. *Dachev T.P., Horneck G., Häder D.P. et al.* EXPOSE-R cosmic radiation time profile // *J. Astrobiology.* 2015. V. 14. P. 17–25.  
<https://doi.org/10.1017/S1473550414000093>
22. *Dachev T.P., Bankov N.G., Tomov B.T. et al.* Overview of the ISS radiation environment observed during the ESA EXPOSE-R2 mission in 2014–2016 // *Space Weather.* 2017. V. 15. P. 1475–1489.  
<https://doi.org/10.1002/2016SW001580>