

УДК 523.4-854,524.1-52:524.6

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В СУТОЧНУЮ ДОЗУ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННУЮ ДОЗИМЕТРАМИ ДБ-8 СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЗА ПЕРИОД С 2001 ПО 2014 ГОДЫ

© 2020 г. А. Э. Лишневский^{1, *}, В. В. Бенгин^{1, 2}

¹Государственный научный центр РФ Институт медико-биологических проблем РАН, г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*ael@imbp.ru

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 04.07.2019 г.

На российском сегменте *МКС* с августа 2001 года до декабря 2014 года практически непрерывно функционировали дозиметры ДБ-8 штатной системы радиационного контроля (СРК) *МКС*. Получаемые с ее помощью данные использовались для ежедневной оперативной оценки радиационной обстановки на борту станции. В данной работе анализируются результаты разделения вклада в суточную дозу от галактических космических лучей (ГКЛ) и от внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ) по дозиметрическим данным, полученным в результате прохождений станции в областях наибольших геомагнитных широт. В статье приводятся результаты анализа дозиметрических данных по этой методике для периода 2001–2014 гг., а также – сравнение с аналогичными результатами, полученными авторами ранее по методике, основанной на анализе дозиметрических данных, получаемых в результате прохождений станции в области Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА). Данная статья является расширением результатов предыдущих работ авторов на весь временной диапазон функционирования дозиметров ДБ-8 в составе СРК *МКС*.

DOI: 10.31857/S002342062004007X

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] нами для периода с 2005 по 2011 годы были представлены результаты разделения вклада в суточную дозу от ЮАА и от ГКЛ для наименее и наиболее защищенных блоков ДБ-8 с использованием методики, основанной на анализе дозиметрических данных, получаемых в результате прохождений *МКС* в областях наибольших геомагнитных широт. Настоящая работа посвящена результатам дальнейшего расширения диапазона обработанных данных при использовании этой методики.

АППАРАТУРА

Описание системы радиационного контроля, анализу и результатам обработки данных которой посвящена данная работа, было ранее представлено в ряде статей [2–5]. СРК состоит из четырех дозиметрических блоков ДБ-8, дозиметра Р-16, и

двух блоков цифровой обработки данных. Результаты измерений СРК накапливались в блоках цифровой обработки данных и затем передавались по радиоканалу на Землю по системе телеметрии *МКС*.

В работе анализируются данные блоков ДБ-8, которые функционировали на *МКС* в период с 2001 г. по 2014 г. В каждом из четырех блоков ДБ-8 имеются два независимых дозиметрических канала с кремниевым детектором и электронной схемой обработки сигнала и передачи полученной информации. Детектор одного из каналов защищен сферой из свинца толщиной 3 г/см², другой таковой защиты не имеет. Блоки ДБ-8 были размещены в различных точках российского сегмента *МКС*; из-за этого они имели различную экранировку окружающим оборудованием станции. Данные о местах установки блоков ДБ-8 в модуле “Звезда” и условиях их защищенности подробно представлены в работе [4]. Наименее за-

Таблица 1

	D_{\max} , нГр/10 мин	b	c	λ_0 , град	φ_0 , град
Северное полушарие	3.99	0.0024	0.00036	-86.47	72.94
Южное полушарие	2.74	-0.0032	0.00038	114.64	-38.25

Таблица 2

D_{\max_ref} , нГр/10 мин	λ_{ref} , град	φ_{ref} , град	b	c	λ_0 , град	φ_0 , град
2.74	95	-51	-0.0032	0.00038	114.64	-38.25

щищенным окружающим оборудованием станции являлся блок ДБ-8 № 1, наиболее защищенным – ДБ-8 № 4. Далее в статье анализируются данные именно этих двух блоков.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В предыдущей работе [1] нами была подробно представлена методика обработки дозиметрической информации СРК, позволяющая связать данные, получаемые на участках траектории с наибольшими геомагнитными широтами, с суточными дозами от ГКЛ. Это обусловлено тем, что основной вклад в суточную дозу от ГКЛ определяется дозой, получаемой станцией на максимально удаленных от геомагнитного экватора участках траектории, имеющих минимальную жесткость геомагнитного обрезания [6]. Напомним основную идею методики, не углубляясь в излишние детали (подробное ее рассмотрение было изложено в [1]).

1. Значения дозы, регистрируемой за десятиминутный интервал времени в зоне высоких геомагнитных широт, аппроксимируются аналитической зависимостью от географических координат. Чтобы учесть вариации ГКЛ, вводится коэффициент, на который умножается эта аналитическая зависимость. Этот коэффициент является параметром, который можно оценить по результатам измерений. Этот же параметр должен характеризовать суточную дозу от ГКЛ.

В качестве аналитической аппроксимации мы выбрали поверхность второго порядка – парабола вида:

$$D_{approx} = D_{\max} - b(\varphi - \varphi_0)^2 - c(\lambda - \lambda_0)^2, \quad (1)$$

где: λ и φ – долгота и широта, соответствующие положению МКС в середине десятиминутного интервала времени, D_{\max} , b , c , λ_0 и φ_0 – константы, описывающие параболаид. Значения констант подобраны для северного и южного полушарий и приведены в табл. 1.

Коэффициент – множитель аналитической зависимости может быть оценен по результатам

измерений как отношение D_{exper}/D_{approx} , где D_{exper} – экспериментальное значение дозы за 10-минутный временной интервал, D_{approx} – расчетное значение дозы за этот же 10-минутный временной интервал, полученное по формуле (1). Для наглядности отображения результатов мы сочли удобным использовать значение дозы за 10-минутный временной интервал в некоторой точке высокоширотной зоны, которую мы назвали референтной. Вариации дозы в точке измерения мы приводили к соответствующей вариации дозы в этой референтной точке. Соответствующее этой точке значение дозы, вычисляемое по формуле (1), мы назвали D_{ref} , а значение дозы, пересчитанной с использованием множителя, полученного по экспериментальным данным – D_{calc} . Расчетная формула для D_{calc} имеет вид:

$$D_{calc} = D_{ref} \frac{D_{exper}}{D_{approx}}, \quad (2)$$

где: D_{exper} – экспериментальное значение дозы за 10-минутный временной интервал, D_{approx} – расчетное значение дозы за 10-минутный временной интервал, полученное по формуле (1), D_{ref} – вычисляемое по формуле (1) референтное значение дозы в специально выбранной точке, координаты и константы для которой приведены в табл. 2.

2. Далее производится переход от расчетных доз за временной интервал 10 минут, полученных в областях наибольших геомагнитных широт, к суточным дозам от ГКЛ (понимаемым как дозы, получаемые МКС за сутки при пролетах станции по всем участкам траектории, исключая область Южно-Атлантической Аномалии), с использованием регрессионных соотношений [1] между значениями расчетных доз D_{calc} и взятыми из работы [2] суточными дозами от ГКЛ.

3. Значения вклада в суточную дозу от ЮАА при использовании этого подхода определяются в виде разности между полной суточной дозой и значением вклада в суточную дозу от ГКЛ.

Как и в [1, 2], в данной работе анализировались дозиметрические данные, связанные с реги-

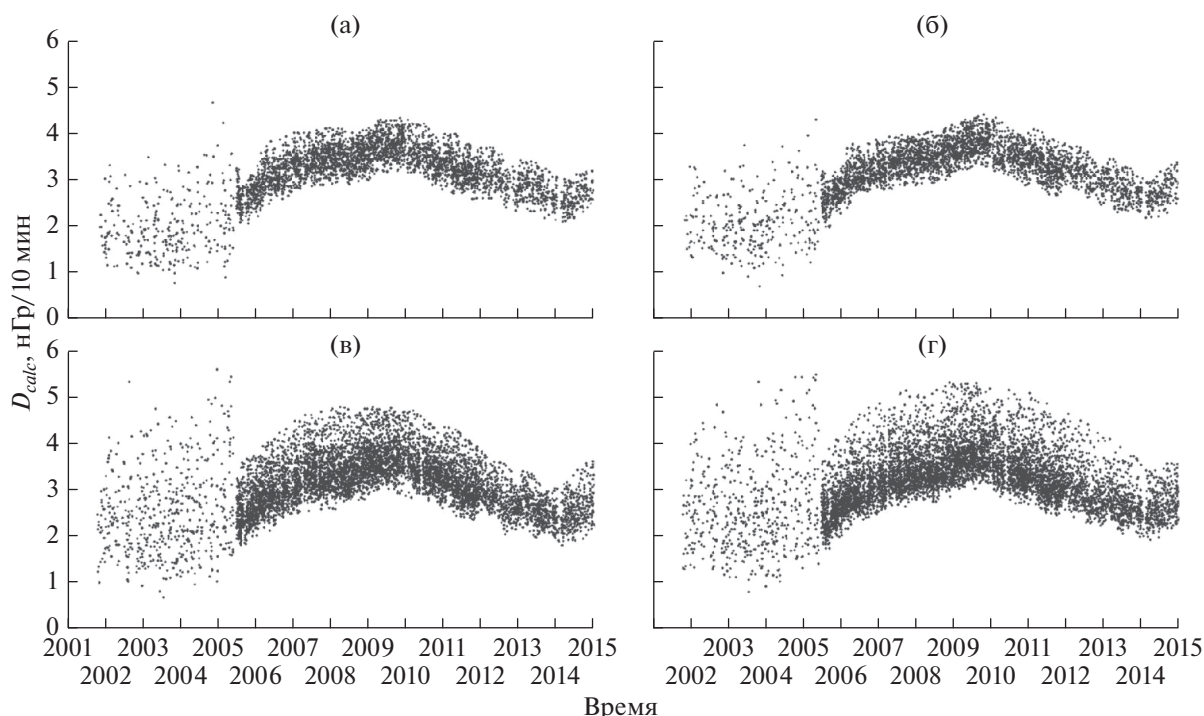


Рис. 1. Расчетные значения дозы (D_{calc}). На верхних графиках (рис. (а) и (б) для северной параболоидной аппроксимации, на нижних (рис. (в) и (г) — для южной. Для блока ДБ-8 №1 — на рис. (а) и (в), для блока ДБ-8 №4 — на рис. (б) и (г).

страцией доз только от ГКЛ и от ЮАА. Данные, связанные с солнечными протонными событиями, из обработки и анализа исключались. В качестве анализируемых значений использовались дозы, накопленные за 10-минутный временной интервал, и координаты точки траектории, соответствующие середине этого интервала времени. Необходимо отметить, что с середины 2001 г. и до середины 2005 г. бортовое программное обеспечение (ПО), отвечающее за формирование дозиметрических данных СРК, имело специфические особенности (позднее устраненные в новой версии ПО), приводящие к отсутствию дозиметрических данных на некоторых участках траектории станции. Это привело к ежесуточным потерям в части дозиметрических данных для периода функционирования СРК в 2001–2005 гг. Тем не менее, вышеописанная методика позволила определить вклад в суточную дозу на станции от ГКЛ и от РПЗ и для этого временного периода тоже, но с большей погрешностью.

Программная обработка данных СРК МКС производилась при помощи специализированного пакета программ, написанных на языке Visual Basic for Applications, встроенного в пакет офисных программ Microsoft Office 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Программная обработка данных СРК МКС была проведена для временного интервала 1.X.2001–31.XII.2014.

На рис. 1 представлены временные зависимости расчетных значений доз D_{calc} за каждое из прохождений станцией наибольших геомагнитных широт, рассчитанные по формуле (2) для северной (а, б) и южной (в, г) параболоидной аппроксимации по данным наименее (ДБ-8 № 1) и наиболее (ДБ-8 № 4) защищенных блоков. В процессе дальнейшей обработки данных значения доз D_{calc} , рассчитанные по данным измерений за десятиминутные интервалы, были усреднены за суточные интервалы времени. После этого полученные результаты были сглажены с использованием низкочастотного симметричного цифрового фильтра [7] вида $y_i = \sum_{k=-N}^{k=N} c_k x_{i-k}$ с коэффициентами “треугольной” формы $c_k = \frac{N+1-|k|}{(N+1)^2}$, $k = -N \dots N$ (была выбрана величина N , равная 15, что соответствует полному интервалу усреднения в 1 месяц). Далее сглаженные расчетные значения доз D_{calc} , с учетом полученных в работе [1] регрессионных соотношений (формулы (3) и (4) — для северного и южного полушария соответ-

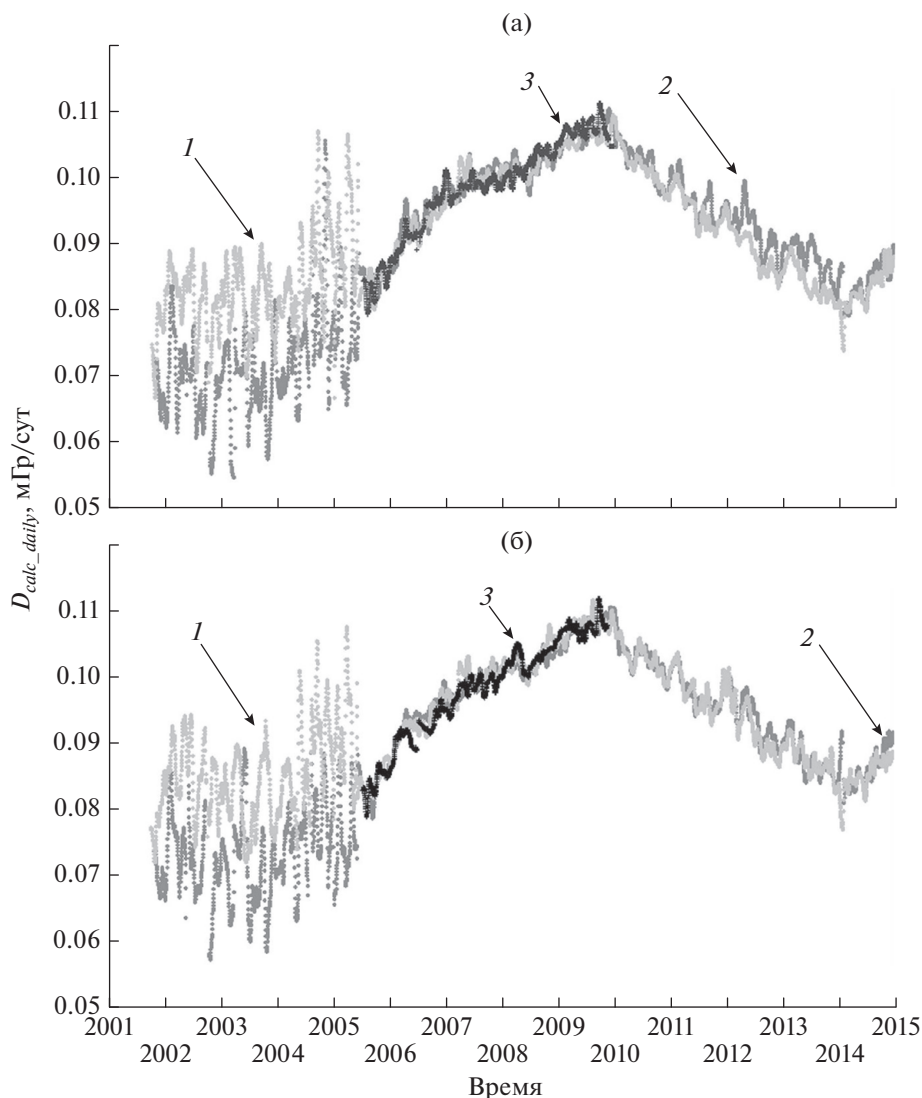


Рис. 2. Сравнение оценок суточных доз от ГКЛ. Кривые 1 и 2 – значения параметра D_{calc_daily} для южной и северной параболической аппроксимации соответственно, кривая 3 – дозы от ГКЛ, рассчитанные по методике [2]. Рис. (а) – оценки для ДБ-8 №1, рис. (б) – для ДБ-8 №4.

ственно), были пересчитаны в суточные дозы от ГКЛ (D_{calc_daily}):

$$D_{calc_daily} = 0.0205D_{calc} + 0.0301, \quad (3)$$

$$D_{calc_daily} = 0.0189D_{calc} + 0.0352. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены результаты этого пересчета для северной и южной параболической аппроксимации по данным наименее (рис. 2а) и наиболее (рис. 2б) защищенного блока ДБ-8, в сравнении с уже упоминавшимися суточными дозами от ГКЛ по данным [2]. Как было показано нами в работе [1], оценки суточных доз от ГКЛ, расположенные на временной зависимости между 2005 и 2009 гг. и полученные при помощи двух различных методик, хорошо соотносятся друг с

другом. Как и в [1], в наших дальнейших рассмотренных мы исходим из допущения, что полученные для других временных периодов оценки суточной дозы от ГКЛ также являются вполне корректными.

На рис. 2 наблюдаются значительные вариации суточной дозы от ГКЛ во временном интервале 2001–2005 гг., а также – заметное различие в значениях суточных доз от ГКЛ, получаемых по данным для северной и для южной параболической аппроксимации. Таких вариаций не наблюдается на временном промежутке с середины 2005 года и до конца всего временного диапазона проанализированных нами данных. Повышенный разброс значений D_{calc_daily} в период 2001–2005 гг. обусловлен отмеченным ранее систематическим отсут-

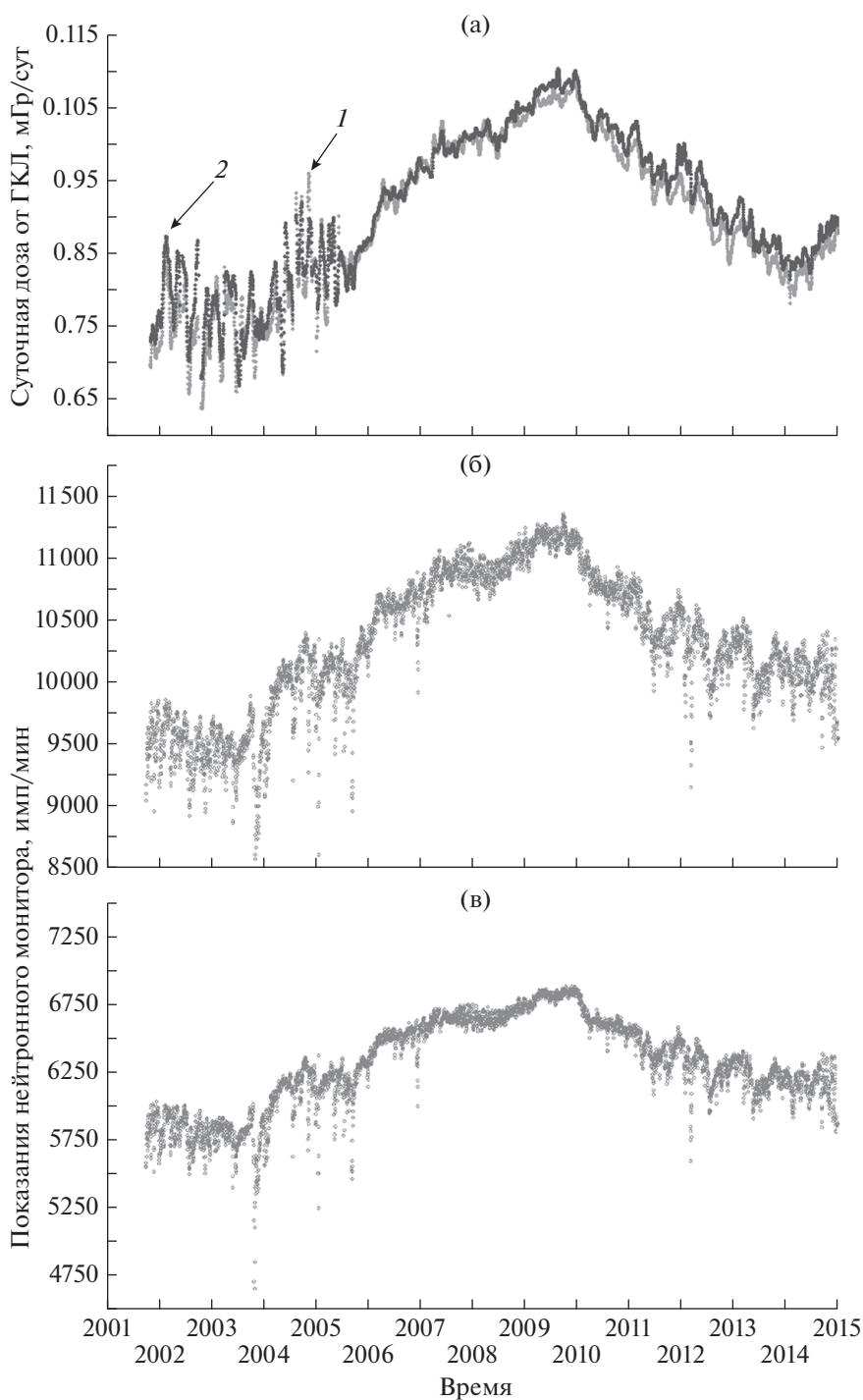


Рис. 3. Сравнение суточных доз от ГКЛ с показаниями нейтронных мониторов (рис. (а): кривая 1 – данные блока ДБ-8 №1, кривая 2 – данные блока ДБ-8 №4); рис. (б), (в) – данные нейтронных мониторов ПГИ и Оулу соответственно.

ствием данных измерений для части суток, что было обусловлено работой программного обеспечения. С целью уменьшения разброса значений мы провели усреднение суточных доз от ГКЛ, полученных по данным для северной и южной параболической аппроксимации. Это было осуществлено

при помощи вычисления среднего арифметического значения из двух имеющихся у нас значений D_{calc_daily} для северной и южной параболической аппроксимации. Усреднение было проведено для данных каждого из анализируемых нами дозиметрических блоков (ДБ-8 № 1 и ДБ-8 № 4). Таким обра-

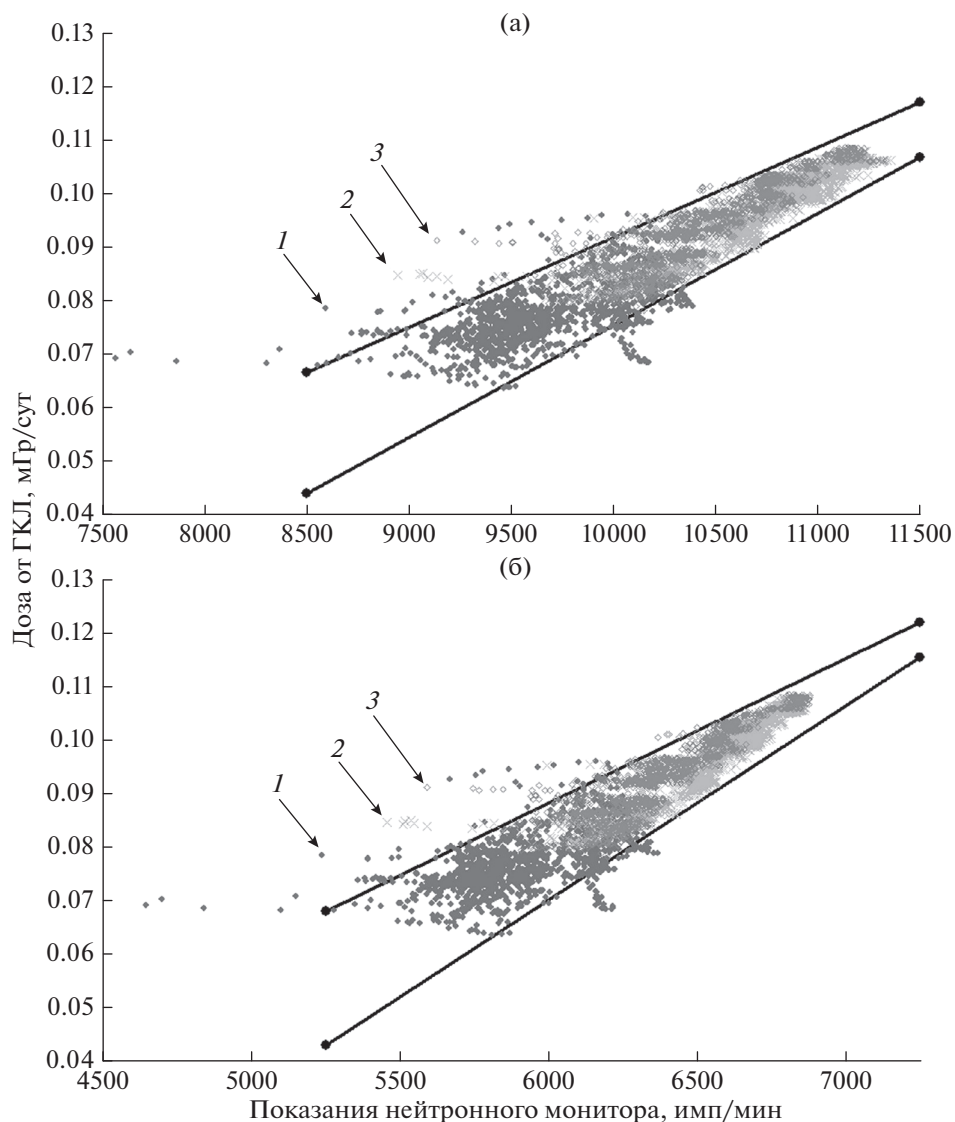


Рис. 4. Корреляционные зависимости между суточными дозами от ГКЛ и показаниями нейтронных мониторов ПГИ (рис. (а)) и Оулу (рис. (б)). Стрелками 1, 2, 3 обозначены данные для периодов 01.X.2001–30.VI.2005; 01.VII.2005–01.X.2009; 02.X.2009–01.III.2014 соответственно.

зом, были получены два значения суточной дозы от ГКЛ, именно, для наименее защищенного окружающим оборудованием станции блока ДБ-8 № 1, и для наиболее защищенного – ДБ-8 № 4. Результаты представлены на рис. 3, панель (а). На рис. 3, панели (б) и (в) представлены, соответственно, показания нейтронного монитора Полярного геофизического института (Россия, г. Апатиты, <http://pgia.ru/data/nm>) и университета г. Оулу (Финляндия, г. Оулу, <https://cosmicrays oulu.fi/>). Из рис. 3а видно, что разница между значениями суточной дозы от ГКЛ, полученным по данным наименее защищенного и наиболее защищенного блоков ДБ-8, минимальна, что согласуется с результатом, полученным нами ранее в работе [2]

для суточных доз от ГКЛ. Из сравнения рис. 3а и 3б, 3в видно, что полученные нами оценки суточных доз от ГКЛ и показания нейтронных мониторов изменяются со временем аналогичным друг другу образом. Можно видеть взаимосвязь между дозой на борту и показаниями нейтронных мониторов. Существенные расхождения наблюдаются только во время резкого уменьшения значений скорости счета нейтронных мониторов. Это объясняется тем, что форбуш-понижения, регистрируемые на нейтронных мониторах, в соответствующих значениях D_{calc_daily} не наблюдаются ввиду примененной методики сглаживания данных.

На рис. 4 представлены корреляционные диаграммы между полученными нами оценками су-

точных доз от ГКЛ и показаниями нейтронных мониторов. Дозы ГКЛ рассчитывались по данным блока ДБ-8 № 1. На рис. 4а проводится сопоставление с показаниями нейтронного монитора Полярного геофизического института (г. Апатиты), а на рис. 4б — с показаниями нейтронного монитора университета г. Оулу. Стрелкой 1 на рис. 4а и 4б показаны данные по суточным дозам от ГКЛ, полученным для периода 1.X.2001–30.VI.2005 (для этого периода дозиметрические данные имеют недостаточную полноту и целостность), стрелкой 2 — для периода 1.VII.2005–1.X.2009 (фаза спада солнечной активности), стрелкой 3 — для периода 2.X.2009–1.III.2014 (фаза роста солнечной активности). Линии, выполненные черным цветом — это мажорирующие линии, сверху и снизу ограничивающие распределение значений суточных доз от ГКЛ. На рис. 4а количество значений суточных доз от ГКЛ, находящееся вне пределов ограничения мажорирующими линиями, составляет, в процентном отношении, 6.25% к общему их количеству. Аналогичное значение для рис. 4б составляет 5.51%.

Диапазон возможных значений суточных доз от ГКЛ, выделяемый мажорирующими линиями для одного и того же значения показаний нейтронного монитора, позволяет сделать вывод о наличии ~20%-го разброса значения суточной дозы от ГКЛ для одного и того же значения скорости счета нейтронного монитора. Это свидетельствует о том, что взаимосвязь между сглаженными расчетными суточными дозами D_{calc_daily} и показаниями нейтронного монитора может, при необходимости, использоваться для оценки вклада в суточную дозу от ГКЛ на борту МКС. Однако, такой расчет суточных доз от ГКЛ по показаниям нейтронного монитора допустим лишь для “грубой” оценки и для определения тренда в изменениях дозы со временем.

Использованный нами метод обработки дозиметрических данных позволил установить, что вклад от ГКЛ в среднесуточную мощность дозы на станции изменялся: в период 2001–2005 гг. — в интервале от 0.07 до 0.08 мГр/сут, в 2005–2009 гг. — в интервале от 0.08 до 0.11 мГр/сут, и в период 2009–2014 гг. — в интервале от 0.11 до 0.08 мГр/сут, независимо от места расположения дозиметрического блока, что вполне согласуется с данными, полученными в работе [8] для европейского модуля Columbus Международной космической станции.

Для оценки вклада в дозу от РПЗ мы, как и ранее, в работе [1], использовали временные зависимости суточных доз. На рис. 5а представлена временная зависимость суточных доз, которые регистрируются наименее и наиболее защищенными блоками ДБ-8 СРК МКС. Путем вычитания из полных суточных доз (рис. 5а) значений расчетных суточных доз от ГКЛ (рис. 3а), для наиме-

нее и наиболее защищенных блоков ДБ-8 соответственно, мы вычислили дозу, получаемую за сутки в области ЮАА. После этого мы сгладили полученный результат при помощи уже упомянувшегося низкочастотного симметричного цифрового фильтра [7] с интервалом усреднения в 1 месяц, и провели сравнение с временными зависимостями суточных доз от ЮАА, полученными нами в работе [2]. Результат представлен на рис. 5б.

Как и в случае с суточными дозами от ГКЛ (рис. 2а и 2б), видно, что данные, расположенные на временной зависимости между 2005 и 2009 годами, хорошо соотносятся друг с другом. Это дает основание считать, что и полученные для периодов 2001–2005 гг. и 2009–2014 гг. данные также возможно использовать для корректной и адекватной оценки суточных доз от РПЗ на станции.

Мы также сравнили результат обработки дозиметрических данных для наименее и наиболее защищенных блоков ДБ-8, показанный на рис. 5б, с высотой орбиты станции (рис 5в). Как видно из рис. 5в, зависимость временной динамики суточной дозы в ЮАА от высоты орбиты станции прослеживается для периода после 2005 года. Для периода 2001–2005 гг. достаточно четкой зависимости дозы во внутреннем РПЗ от высоты орбиты станции выявить не удастся. При этом вклад в суточную дозу от РПЗ для наименее и наиболее защищенного блоков ДБ-8 для периода 2001–2005 гг., уменьшился, в сравнении с периодом 2005–2009 гг., с 0.30 до 0.20 мГр/сут (наименее защищенный блок), и с 0.14 до 0.07 мГр/сут (наиболее защищенный блок). Для периода 2009–2014 гг. (в сравнении с 2005–2009 гг.), в свою очередь, заметно увеличение вклада в суточную дозу от РПЗ с 0.30 до 0.45 мГр/сут (наименее защищенный блок) и с 0.14 до 0.20 мГр/сут (наиболее защищенный блок), что обусловлено увеличением высоты орбиты станции.

Полученные результаты могут быть использованы для оценок вклада от ГКЛ и РПЗ в величину эквивалентной дозы и, соответственно, в уровень радиационного риска. Однако для этого необходим пересчет величин поглощенных доз к значениям эквивалентных доз в теле космонавта с использованием соответствующих значений коэффициента качества. Имеющиеся оценки коэффициентов качества для ГКЛ и РПЗ на околоземной орбите заметно различаются. Так, по данным работы [9] они составляют 1.22 для РПЗ и 3.20 для ГКЛ соответственно, по данным работы [10] — 1.83 и 2.74, по данным [11] — 1.94 и 3.24 (аппаратура “ТЕРС”) и 1.5 и 2.0 (аппаратура “Nausicaa”) соответственно. В целом это позволяет заключить, что вклады от ГКЛ и РПЗ в эквивалентную дозу являются величинами одного порядка, однако корректная их оценка — предмет отдельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

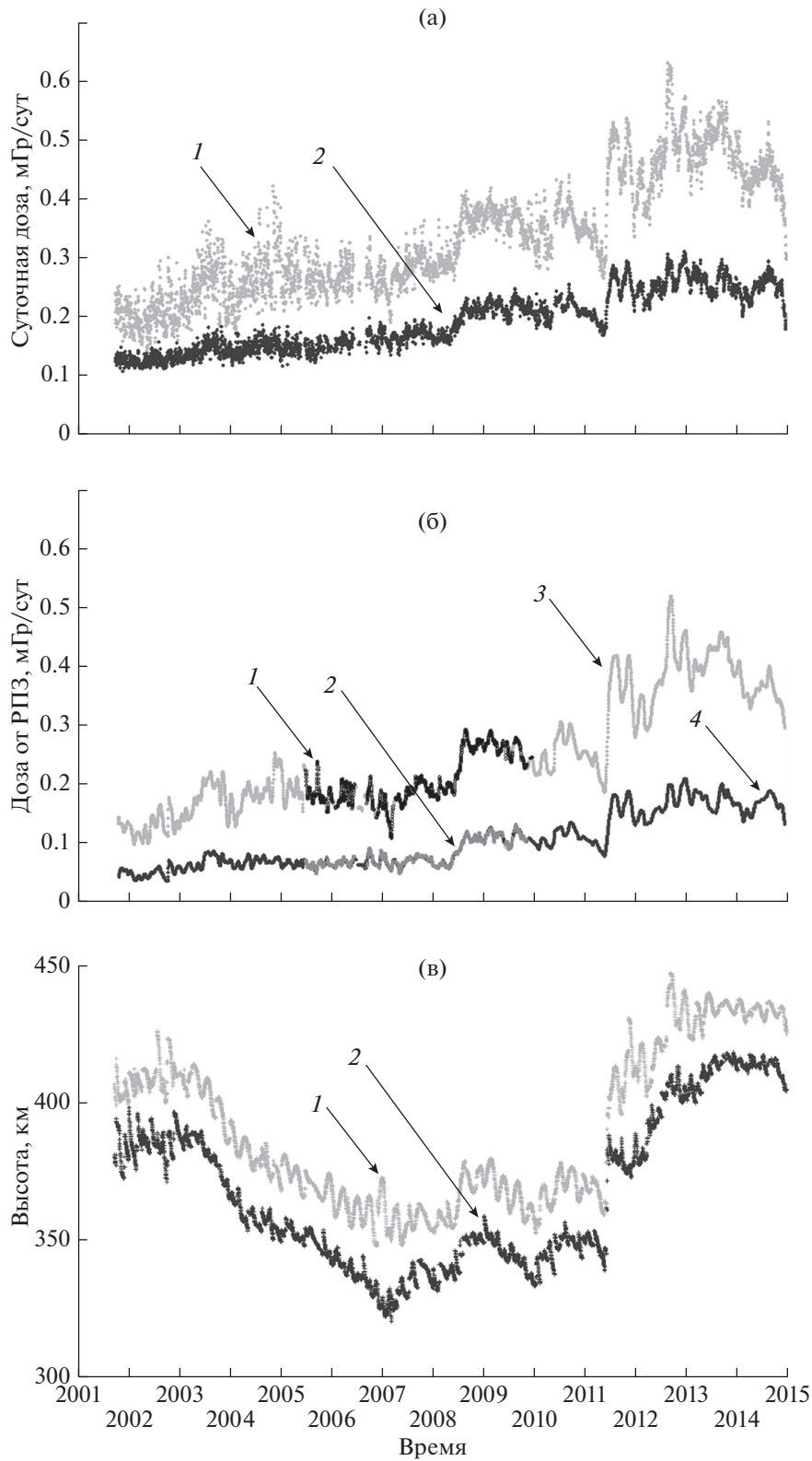


Рис. 5. Сопоставление полной суточной дозы (рис. (а), вклада в нее дозы от РПЗ (рис. (б) и высоты орбиты МКС (рис. (в). Рис. (а): кривые 1 и 2 – данные ДБ-8 №1 и ДБ-8 №4 соответственно. Рис. (б): кривые 1 и 2 – дозы от РПЗ, рассчитанные по методике [2] для ДБ-8 №1 и ДБ-8 №4; кривые 3 и 4 – результат вычитания из полных суточных доз расчетных суточных доз от ГКЛ для ДБ-8 №1 и ДБ-8 №4 соответственно. Рис. (в): кривая 1 – высота апогея, кривая 2 – высота перигея.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ данных дозиметров ДБ-8 системы радиационного контроля *МКС* за период с 2001 по 2014 годы. Для этого временного периода проведено разделение вклада в суточную мощность дозы от ГКЛ и от РПЗ по дозиметрическим данным, полученным в результате прохождений станции в областях наибольших геомагнитных широт. В результате анализа данных дозиметров ДБ-8 СРК получена временная динамика суточной дозы от ГКЛ для временного периода с Х.2001 по XII.2014. Вклад ГКЛ в среднесуточную мощность дозы на станции определялся уровнем солнечной активности и изменялся в период 2001–2005 гг. – в интервале от 0.07 до 0.08 мГр/сут, в 2005–2009 гг. – в интервале от 0.08 до 0.11 мГр/сут, и в период 2009–2014 гг. – в интервале от 0.11 до 0.08 мГр/сут, независимо от места расположения дозиметрического блока.

Наблюдается взаимосвязь изменений суточной дозы от ГКЛ с вариациями скорости счета нейтронных мониторов в г. Апатиты (Россия) и г. Оулу (Финляндия). Несмотря на достоверное наличие этой взаимосвязи, использование показаний нейтронных мониторов для оценки вклада в суточную дозу от ГКЛ на борту *МКС* возможно рекомендовать к использованию лишь в качестве метода “грубой” оценки значений суточных доз от ГКЛ и для определения тренда в изменениях этих оценок со временем, но не для точного определения значения суточной дозы от ГКЛ на борту станции.

В результате анализа данных дозиметров ДБ-8 СРК получена временная динамика суточной дозы от внутреннего РПЗ для временного периода с Х.2001 по XII.2014. Получены численные оценки вклада в суточную дозу от ГКЛ и от РПЗ для временного периода с Х.2001 по XII.2014. Вклад в суточную дозу от РПЗ за период 2001–2014 гг. для наименее защищенного блока ДБ-8 № 1 увеличился с 0.20 до 0.45 мГр/сут, а для наиболее защищенного блока ДБ-8 № 4 – увеличился с 0.07 до 0.20 мГр/сут. Увеличение суточной дозы от РПЗ обусловлено, в основном, увеличением высоты орбиты *МКС*.

Необходимо отметить, что полученные оценки вклада в суточную дозу от ГКЛ и от РПЗ относятся только к радиационной обстановке внутри российского сегмента *МКС*, и могут отличаться при другой защищенности космических аппаратов.

Использование предложенного авторами в работе [1] методического подхода к обработке данных СРК позволило расширить уже имеющийся для 2005–2009 гг. ряд данных по вкладу в суточную дозу на *МКС* от ГКЛ и от РПЗ на временной

диапазон 2001–2005 гг. и 2009–2014 гг., что позволило покрыть весь период функционирования дозиметров ДБ-8 в составе СРК *МКС*.

Работа выполнена в рамках темы ФКА “Проведение работ по медико-биологическому обеспечению летных испытаний” (шифр “Здоровье”).

Авторы благодарят Сергея Геннадьевича Дробышева, предоставившего данные расчета траектории полета *МКС* за 2001–2014 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лишневецкий А.Э., Бенгин В.В.* Разделение вклада галактических космических лучей и внутреннего радиационного пояса Земли в суточную дозу на борту Международной космической станции за период с 2005 по 2011 годы // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 2. С. 103–110. (*Cosmic Research*. P. 94–100).
2. *Лишневецкий А.Э., Панасюк М.И., Бенгин В.В. и др.* Вариации радиационной обстановки на *Международной космической станции* в 2005–2009 годах // *Космич. исслед.* 2012. Т. 50. № 4. С. 341–345. (*Cosmic Research*. P. 319–323).
3. *Panasyuk M. et al.* Description of the Space Radiation Control System for the Russian Segment of ISS ALPHA. 12 th IAA Man in Space Symposium, Washington DC, June 1997.
4. *Лягушин В.И., Волков А.Н., Александрин А.П. и др.* Предварительные результаты измерения поглощенных доз по данным системы радиационного контроля российского сегмента *Международной космической станции* // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.* 2002. Вып. 4. С. 22–25.
5. *Модель космоса.* М.: КДУ, 2007. Т. 1. С. 642–667.
6. *Космическая геофизика / Под ред. Эгеланда А., Хольтера О. и Омхольта А.* М.: Мир, 1976. С. 517–518.
7. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. С. 58–112.
8. *Burmeister S., Berger T.* The DOSIS 3D Project Onboard the International Space Station – Analysis of the Solar Particle Event in September 2017. 23rd Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, 04–06 September 2018, Tsuruga, Japan. <http://wrmiss.org/workshops/twentythird/Burmeister.pdf>
9. *Berger T. et al.* DOSIS & DOSIS 3D: radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016 // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. A8.
10. *Badhwar G.D., Braby L.A., Cucinotta F.A., Atwell W.* Dose rate, dose-equivalent rate, and quality factor in SLS-1 // *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 1992. V. 20. № 3. P. 447–451.
11. *Космическая биология и медицина.* Т. 2. М.: Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, 2002. С. 412–459.