

УДК 523.4-854524.1-52:524.6

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДОЗИМЕТРА “ТРИТЕЛЬ” В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “МАТРЕШКА-Р” НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2023 г. А. Э. Лишневский¹, *, В. А. Шуршаков¹, Д. А. Карташов¹

¹Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*ael@imbp.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 18.01.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

Представлены предварительные результаты обработки данных дозиметрической аппаратуры “ТРИТЕЛЬ”, состоящей из одного интерфейсного блока и трех блоков взаимно ортогональных телескопов кремниевых детекторов, работающих в режиме совпадений (с возможностью получения данных также и от одиночного режима функционирования).

Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” предназначался для изучения временной динамики дозовых нагрузок и анизотропии потоков заряженных частиц в различных точках Служебного модуля (СМ) российского сегмента *Международной космической станции (РС МКС)* с дополнительной возможностью измерений в других модулях РС МКС. В составе космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р” на РС МКС дозиметр “ТРИТЕЛЬ” эксплуатировался с середины октября 2017 г. до середины октября 2020 г.

В статье представлено описание методики обработки дозиметрических данных аппаратуры “ТРИТЕЛЬ” и предварительные результаты обработки данных, полученных в период с июня по октябрь 2020 г.

DOI: 10.31857/S0023420623220016, EDN: HZAOQI

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент с дозиметрической аппаратурой “ТРИТЕЛЬ” был посвящен изучению космической радиации, влияние которой на бортовую аппаратуру и человека, на данном этапе развития космонавтики, является неустраняемым фактором, существенно ограничивающим возможности изучения и использования человечеством космического пространства. К настоящему времени обычными являются экспедиции на околоземные орбитальные станции длительностью от полугода и более. Важным фактором при планировании таких длительных космических полетов является воздействие радиации на членов экипажа [1–3], причем доза радиации, получаемая космонавтом в космическом полете, обусловлена одновременным воздействием различных источников радиации. Так, дозы радиации на борту МКС могут быть обусловлены тремя источниками [2, 4, 5]: галактическими космическими лучами (ГКЛ), радиационными поясами Земли (РПЗ), и солнечными протонными событиями (СПС).

Но помимо того, что дозовое поле на борту МКС формируется различными источниками радиации, источники этой радиации еще имеют динамическую природу и/или ярко выраженную анизотропию. Для изучения как временной динамики, так и анизотропии потоков космической радиации при помощи системы дозиметров, выполненных в виде телескопов полупроводниковых детекторов, была разработана научная аппаратура “ТРИТЕЛЬ”, входившая в состав космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р”. КЭ “Матрешка-Р”, в свою очередь, является комплексным, многоэтапным космическим экспериментом, предназначенным для изучения динамики радиационной обстановки на трассе полета и в отсеках МКС, в котором принимают участие как российские, так и зарубежные научные группы. Дозиметрическая аппаратура “ТРИТЕЛЬ” разработана в рамках сотрудничества между Центром энергетических исследований Венгерской академии наук (МТА ЕК) и Государственным научным центром Российской Федерации – Институтом медико-биологических проблем Российской акаде-

мии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН). Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” предназначался для изучения динамики дозовых нагрузок и анизотропии потоков заряженных частиц в различных точках Служебного модуля (СМ) российского сегмента *Международной космической станции (РС МКС)* с дополнительной возможностью измерений в других модулях РС МКС. В составе космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р” на РС МКС дозиметр “ТРИТЕЛЬ” эксплуатировался с середины октября 2017 г. до середины октября 2020 г. Подробное описание научной аппаратуры (НА) “ТРИТЕЛЬ” представлено в работе [6].

В данной же статье представлены предварительные результаты обработки дозиметрических данных, полученных при помощи НА “ТРИТЕЛЬ”, описание методики обработки этих данных, а также обсуждаются методические аспекты, связанные с регистрацией поглощенной дозы радиации при помощи одинарных кремниевых полупроводниковых детекторов и при помощи телескопов детекторов, состоящих из двух одинарных кремниевых полупроводниковых детекторов, установленных один под другим и включенных в совпадательный режим регистрации заряженных частиц.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ТРИТЕЛЬ”

Согласно [6], НА “ТРИТЕЛЬ” предназначена для измерения динамики дозы и анизотропии потоков заряженных частиц на трассе полета орбитальной станции МКС. Аппаратура “ТРИТЕЛЬ” состоит из группы детекторных блоков, и одного интерфейсного блока. Данные, получаемые с помощью НА “ТРИТЕЛЬ”, позволяют проводить изучение динамики поглощенной дозы, изучать спектры энерговыделений и спектры ЛПЭ зарегистрированных потоков космического излучения, определять коэффициенты качества ионизирующих космических излучений, а также – изучать анизотропию потоков ионизирующих излучений на РС МКС. НА “ТРИТЕЛЬ” представляет собой три взаимно перпендикулярных телескопа по два полностью замещенных кремниевых детектора в каждом (тип – CANBERRA, толщина: ~300 мкм [6]). Регистрация частиц ионизирующего излучения в аппаратуре “ТРИТЕЛЬ” производится с использованием именно этих трех телескопов полупроводниковых кремниевых детекторов [6]. Аппаратура “ТРИТЕЛЬ” была установлена в Служебном модуле (СМ) российского сегмента МКС на панелях 221 и 222 по левому борту, между рабочим отсеком большого диаметра и рабочим

отсеком малого диаметра. Внешний вид смонтированной на этих панелях НА “ТРИТЕЛЬ” представлен на рис. 1 (интерфейсный блок и один из трех детекторных блоков, ориентированный по направлению X, показано выносками). Ориентация телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” относительно всей МКС в целом представлена на рис. 2 (приводится согласно [7]). Из рис. 2 видно, что направление Z телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” ориентировано в зенит (от Земли), в то время как направления X и Y ориентированы, учитывая расположение НА “ТРИТЕЛЬ” на левом борту СМ МКС, соответственно, по направлению вектора скорости движения МКС по ее орбите вокруг Земли, и перпендикулярно этому направлению.

Как уже упоминалось, дозиметрическая аппаратура “ТРИТЕЛЬ” позволяет получать данные о потоках космической радиации, регистрируемых этой аппаратурой, – как в виде спектров от срабатываний одиночных детекторов (спектры энерговыделений), так и в виде спектров ЛПЭ, получаемых при срабатывании двух детекторов в режиме совпадений.

Первичные дозиметрические данные НА “ТРИТЕЛЬ” представляют собой закодированные по определенному алгоритму массивы бинарных файлов с расширением *.trt. Научная аппаратура “ТРИТЕЛЬ”, на основе встроенных в ее бортовое программное математическое обеспечение (ПМО) алгоритмов, позволяет автоматически разделять вклад от РПЗ (от внутреннего РПЗ – Южно-Атлантическая Аномалия, далее в тексте ЮАА) и от ГКЛ в получаемые спектры энерговыделений и спектры ЛПЭ. А именно, исходные массивы бинарных файлов с расширением *.trt изначально являются разделенными по четырем категориям: спектры, полученные внутри ЮАА за 90 мин, спектры, полученные от ГКЛ (т.е. вне ЮАА) за 90 мин, спектры, полученные внутри ЮАА за одни сутки, и спектры, полученные от ГКЛ (т.е. вне ЮАА) за одни сутки. Для каждого телескопа детекторов в рамках каждой из четырех категорий в бинарных файлах представлены как данные по энерговыделениям, так и по спектрам ЛПЭ, полученные, соответственно, в режиме регистрации одинарным детектором и в режиме регистрации двумя детекторами телескопа, включенными в схему совпадений.

После программной дешифровки этих данных в текстовый формат представления информации становятся доступными для изучения и анализа данные о спектрах энерговыделений и спектрах ЛПЭ как внутри, так и вне ЮАА, причем с двумя вариантами временного разрешения – 90 мин и одни сутки. Для последующего ана-



Рис. 1. НА “ТРИТЕЛЬ”, установленная на панелях 221 и 222 Служебного модуля МКС.

лиза были использованы данные с временным разрешением в одни сутки, как по спектрам энерговыделений, так и по спектрам ЛПЭ, как для случая регистрации потоков космической радиации внутри ЮАА, так и вне ее (от ГКЛ). Прикладное математическое обеспечение, необходимое для извлечения этой информации из бинарных файлов данных *.trt, было разработано с использованием среды визуального программирования National Instruments LabView 2013. Пример результата дешифровки дозиметрических данных НА “ТРИТЕЛЬ” из бинарных фай-

лов данных *.trt в текстовое представление представлен на рис. 3. Структура текстового файла данных, представленного на рис. 3, состоит из заголовка, и из девяти следующих после заголовка столбцов данных. В заголовке показывается тип записанных дозиметрических данных (внутри или вне ЮАА, временное разрешение – 90 мин или одни сутки, в данном случае представлены данные с временным разрешением одни сутки), количество каналов (это значение равно 128), температура детектирующих блоков в градусах Цельсия, момент времени окончания

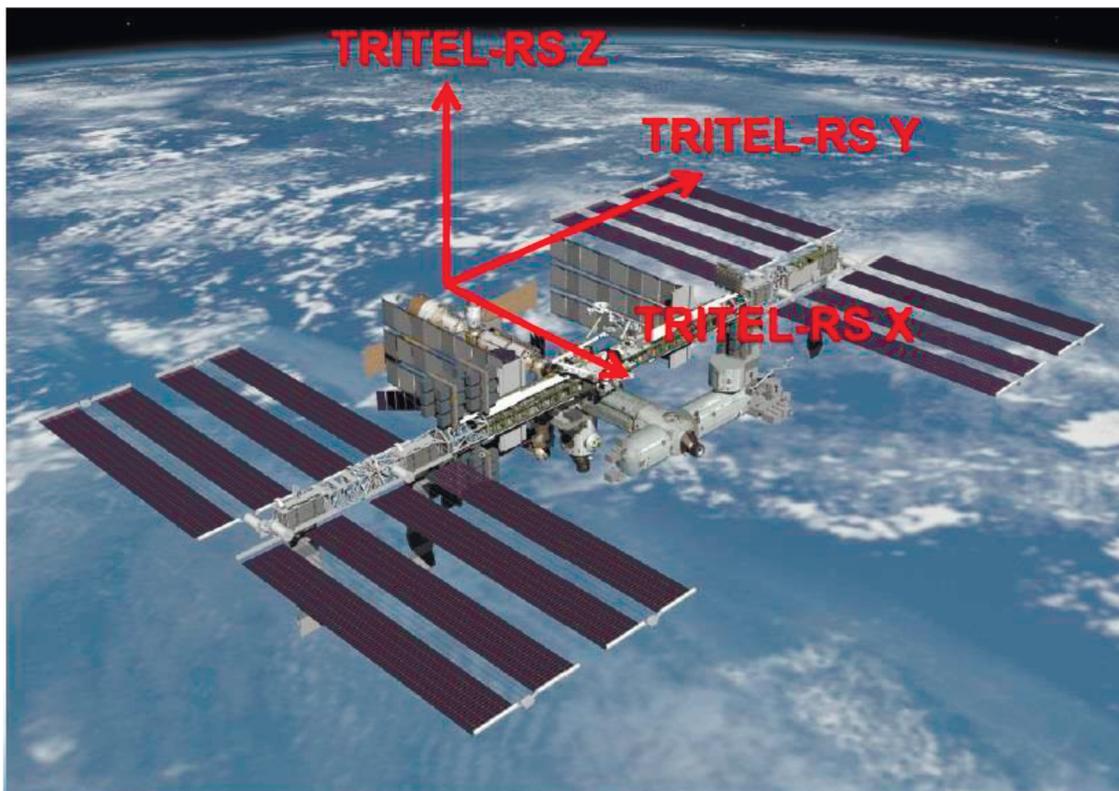


Рис. 2. Ориентация телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” относительно МКС.

регистрации данных детектором). Столбцы же, последовательно, представляют собой (слева направо):

- первый столбец — номера каналов (от 0 до 127)
- второй, третий и четвертый столбцы (детекторные блоки X , Y и Z соответственно) — количество отсчетов в каждом из каналов для режима детектирования ионизирующей радиации одинарными кремниевыми полупроводниковыми детекторами
- пятый, шестой и седьмой столбцы (детекторные блоки X , Y и Z соответственно) — количество отсчетов в каждом из каналов для режима детектирования ионизирующей радиации телескопами кремниевых полупроводниковых детекторов (режим совпадений)
- восьмой и девятый столбцы — служебная техническая информация (номер счетчика и номер интерфейсной платы детектора), для дальнейшего анализа не использовались.

Далее по полученным данным для соответствующих суток вычислялась поглощенная доза (в кремнии). Согласно [8], поглощенная доза ионизирующего излучения D равна отношению средней энергии ΔE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе Δm вещества в этом объеме: $D = \Delta E / \Delta m$.

Массу Δm “рабочего тела” детектора легко вычислить, исходя из формы детектора (цилиндр) и уточненных данных по его параметрам, которые приводит в дополнениях к документации на аппаратуру “ТРИТЕЛЬ” ее разработчик, МТА ЕК (радиус 8.4 мм, толщина 300 мкм, эффективная площадь поверхности детектора 222 мм²), а также зная плотность кремния $\rho = 2.33$ г/см³. Далее вычислялись зарегистрированные в каждом из каналов анализатора энергосчетчика количества отсчетов на значение калибровочной кривой, соответствующее номеру канала, для которого вычисляется энергосчетчик (всего каналов, как уже упоминалось, 128). Средняя энергия ΔE вычислялась как сумма всех этих произведений (энергосчетчиков, зарегистрированных в каждом из 128 каналов анализатора). Кривые калибровок детектирующих блоков дозиметра “ТРИТЕЛЬ” были предоставлены нам нашими венгерскими коллегами — разработчиками НА “ТРИТЕЛЬ” (рис. 4) для всех трех взаимно ортогональных блоков детектирования. Необходимо уточнить, что численные значения калибровок настолько близки друг к другу, что, будучи представленными на графике, эти данные практически сливаются между собой.

TRITEL Spectrum Type: s (inside SAA)
 Channels: 128
 Temp X: 30.50
 Temp Y: 29.50
 Temp Z: 29.00
 Stop time: 06.10.2020 0:00:00

Channel_number	Spectrum_X	Spectrum_Y	Spectrum_Z	Sp_COINC_X	Sp_COINC_Y	Sp_COINC_Z	Counter	IU_ID
0	0	0	0	0	0	0	0	15
1	4	1	1	4	0	0	0	15
2	1	1	1	0	0	1	0	15
3	7	2	0	7	1	0	0	15
4	18	0	2	12	0	2	0	15
5	74	1	5	39	1	2	0	15
6	150	4	31	81	3	12	0	15
7	395	21	84	209	12	35	0	15
8	559	74	170	311	33	81	0	15
9	708	169	323	360	88	160	0	15
10	624	347	451	294	181	207	0	15
11	734	732	775	316	335	359	0	15
12	385	872	637	169	394	265	0	15
13	221	567	321	80	215	106	0	15
14	155	372	232	62	116	84	0	15
15	113	195	161	27	69	49	0	15
16	108	178	133	32	49	31	0	15
17	68	126	113	27	31	33	0	15
18	52	85	67	20	26	17	0	15
19	53	71	63	16	17	19	0	15
20	51	64	63	15	24	20	0	15
21	43	55	69	13	12	11	0	15
22	32	53	48	9	10	11	0	15
23	40	56	44	15	15	6	0	15
24	44	66	29	12	25	5	0	15
25	42	31	59	15	7	17	0	15
26	41	42	28	13	12	8	0	15
27	28	48	47	7	14	12	0	15
28	37	41	42	10	11	13	0	15
29	36	30	40	12	10	11	0	15
30	37	30	30	14	10	9	0	15
~~~~~								
122	1	0	0	1	0	0	0	15
123	0	0	0	0	0	0	0	15
124	0	0	0	0	0	0	0	15
125	0	0	0	0	0	0	0	15
126	0	0	0	0	0	0	0	15
127	0	0	1	0	0	1	0	15

Рис. 3. Пример дешифровки дозиметрических данных НА “ТРИТЕЛЬ” из файлов данных *.trt.

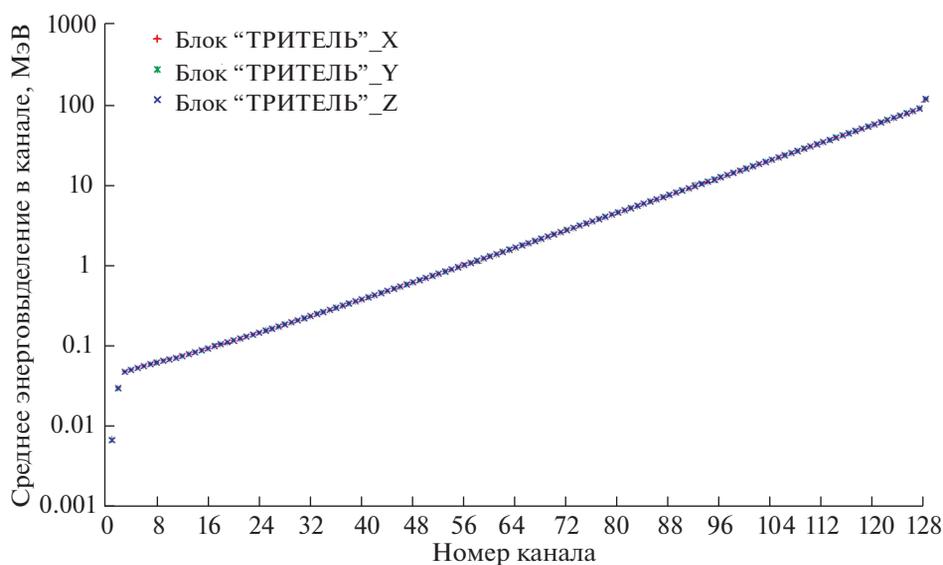


Рис. 4. Калибровочные кривые (по энерговыделениям) трех взаимно перпендикулярных блоков детектирования дозиметрической аппаратуры “ТРИТЕЛЬ”.

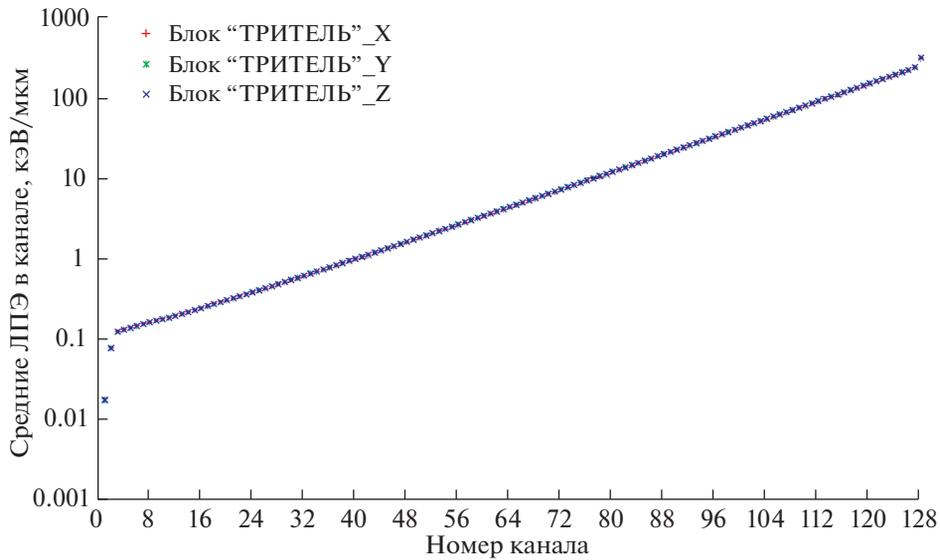


Рис. 5. Калибровочные кривые (по ЛПЭ) трех взаимно перпендикулярных блоков детектирования дозиметрической аппаратуры "ТРИТЕЛЬ".

Таким образом, поглощенная доза в единицах измерения мГр, которую зарегистрировал одиночный детектор каждого из трех дозиметрических блоков НА "ТРИТЕЛЬ", может быть получена как отношение уже вычисленной нами средней энергии  $\Delta E$  к также уже известной нам массе детектора  $\Delta m$ , и домноженное на численный коэффициент, позволяющий преобразовать мегаэлектрон-вольты в джоули (для получения итогового значения поглощенной дозы в мГр этот коэффициент будет равен  $1.6 \cdot 10^{-10}$ ). Для того, чтобы получить окончательный результат в виде временной зависимости суточной мощности дозы, по вышеописанному алгоритму по спектрам энерговыделений отдельно рассчитывались дозы внутри и вне ЮАА, а затем они суммировались, давая в итоге полную суточную мощность дозы.

Также была вычислена поглощенная доза с использованием полученных с телескопов полупроводниковых кремниевых детекторов данных по спектрам ЛПЭ. Согласно методике, представленной в работе [9], поглощенная доза в этом случае может быть вычислена по формуле (1):

$$D = 4\pi \times 1.6 \cdot 10^{-6} \times \frac{1}{\rho} \times \frac{1}{G} \times \int_{l_0}^{l_{\max}} (F(l) \times l) dl, \quad (1)$$

где  $D$  – поглощенная доза в кремнии;  $\rho$  – плотность кремния ( $2.33 \text{ г/см}^3$ );  $G$  – геометрический фактор телескопа детекторов (по уточненным данным, которые приводит в дополнениях к документации на НА "ТРИТЕЛЬ" ее разработчик, МТА ЕК, он равен  $5.1 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ );  $F(l)$  – количество

отсчетов счета в соответствующем канале;  $l$  – средние ЛПЭ для соответствующего канала по данным калибровочных кривых;  $l_0, l_{\max}$  – минимальный и максимальный канал анализатора (1 и 128 канал соответственно).

Именно эта формула и была использована для расчета поглощенной дозы по спектрам ЛПЭ, полученным телескопами детекторов НА "ТРИТЕЛЬ". Как и в случае с расчетом поглощенной дозы по данным одинарных детекторов, расчеты поглощенной дозы по двум детекторам, включенным в совпадательный режим (телескопы), велись по спектрам ЛПЭ, полученным по отдельности внутри и вне ЮАА, а после этого результаты суммировались, образуя полную суточную мощность дозы. После этого была построена временная зависимость полной суточной мощности дозы, полученной по данным телескопов детекторов НА "ТРИТЕЛЬ".

Кривые ЛПЭ – калибровок (рис. 5) детектирующих блоков дозиметра "ТРИТЕЛЬ", необходимые для этих расчетов, были получены из предоставленных нам нашими венгерскими коллегами – разработчиками НА "ТРИТЕЛЬ" данных по значениям энерговыделений в каналах и из определения ЛПЭ как физической величины согласно [7], путем учета толщины детектора (300 мкм) в качестве единицы длины пути заряженной частицы в веществе детектора и поправочного коэффициента, позволяющего учесть в итоговом численном значении ЛПЭ регистрацию детектором т.н. косых прохождений (т.е. заряженных частиц, налетающих под острым углом к плоскости поверхности детектора, и при этом

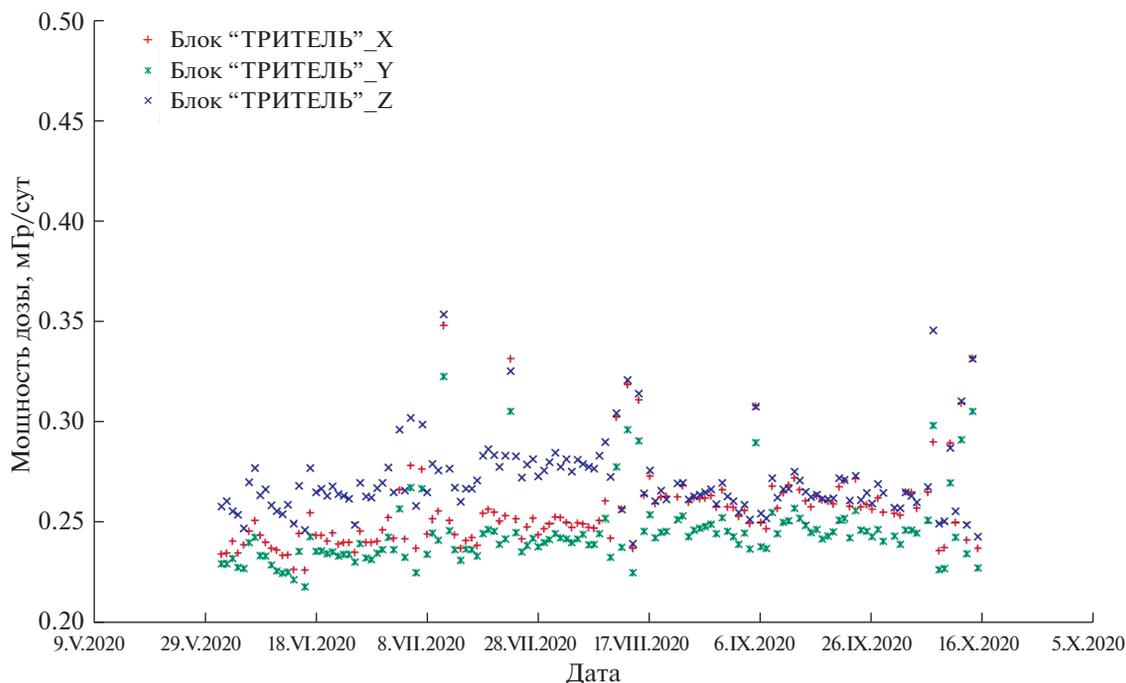


Рис. 6. Временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным одиночных детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”.

проходящих через оба детектора телескопа). Значение этого поправочного коэффициента для радиуса детекторов 8.4 мм и расстояния между ними 8.9 мм (уточненное значение расстояния между детекторами телескопа получено от разработчиков НА “ТРИТЕЛЬ”) составляет 1.198. При этом, как и для случая с калибровками по энерговыделениям, необходимо уточнить, что численные значения ЛПЭ – калибровок на рис. 5 настолько близки друг к другу, что, будучи представленными на графике, эти данные практически сливаются между собой.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ТРИТЕЛЬ” И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлена временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным одиночных детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”. Были использованы полученные в результате обработки по представленной выше методике дозиметрические данные для временного интервала с 1.VI.2020 по 15.X.2020. На рис. 7 представлена аналогичная зависимость, полученная в результате обработки данных телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”, для того же самого временного интервала (с 1.VI.2020 по 15.X.2020). На рис. 8 приведена временная зависимость высоты орбиты МКС (высота апогея и высота перигея орбиты). На рис. 9 в качестве примера приве-

дены спектры ЛПЭ, полученные телескопами детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” вне ЮАА (панель (а) рис. 9) и внутри ЮАА (панель (б) рис. 9) за одни сутки с 00:00, 6 октября 2020 г. по 00:00, 7 октября 2020 г.

Из рис. 7 становится отчетливо видимой анизотропия дозового поля в области, в которой смонтированы на РС МКС детекторные блоки НА “ТРИТЕЛЬ”: дозовая нагрузка с направления  $Y$  примерно на 30–35% выше, чем аналогичная нагрузка с направлений  $X$  и  $Z$ . Аналогичные расхождения в дозиметрических данных, полученных в результате обработки показаний одиночных детекторов, существенно меньше, и они укладываются в погрешность определения дозы детекторами НА “ТРИТЕЛЬ” (согласно [6], это значение равно 20%). Тем не менее, следует отметить, что из сравнения рис. 6 и рис. 7 видно, что более высокие значения мощности доз на рис. 6 демонстрирует направление  $Z$ , в то время как из рис. 7 следует, что более высокие дозовые нагрузки регистрируются с направления  $Y$ . Аналогичным образом, наименьшие потоки космической радиации также фиксируются с различных направлений: по данным с одиночных детекторов (рис. 6), это направление  $Y$ , а по данным с телескопов детекторов (рис. 7) – это направление  $X$ .

Подобная “странность” в проявлении эффектов анизотропии становится более понятной, ес-

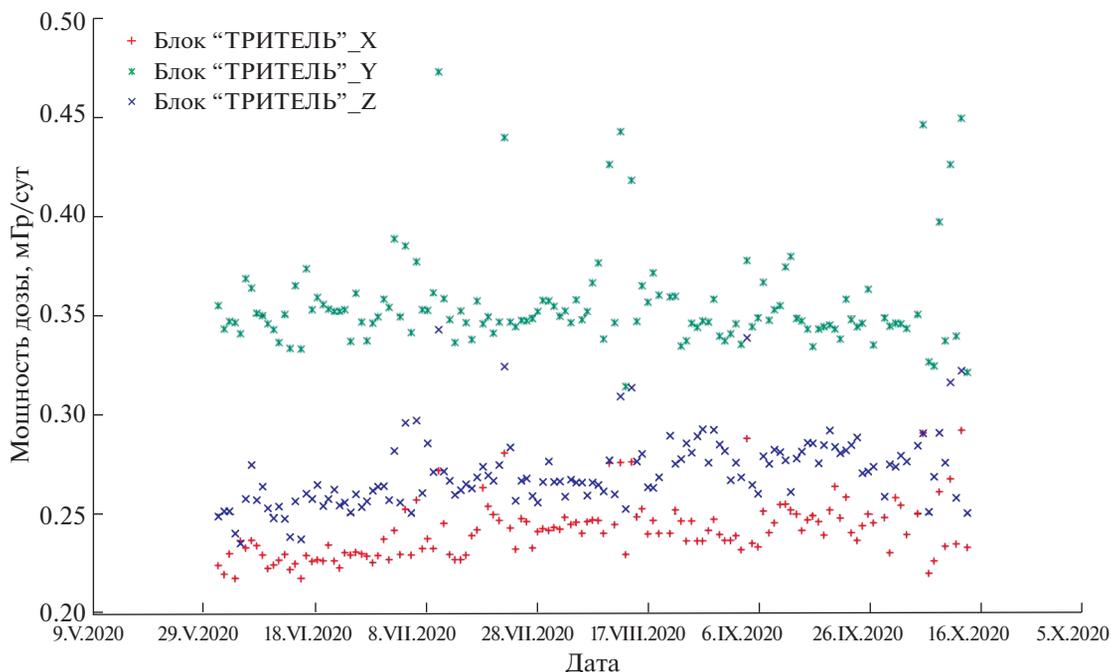


Рис. 7. Временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”.

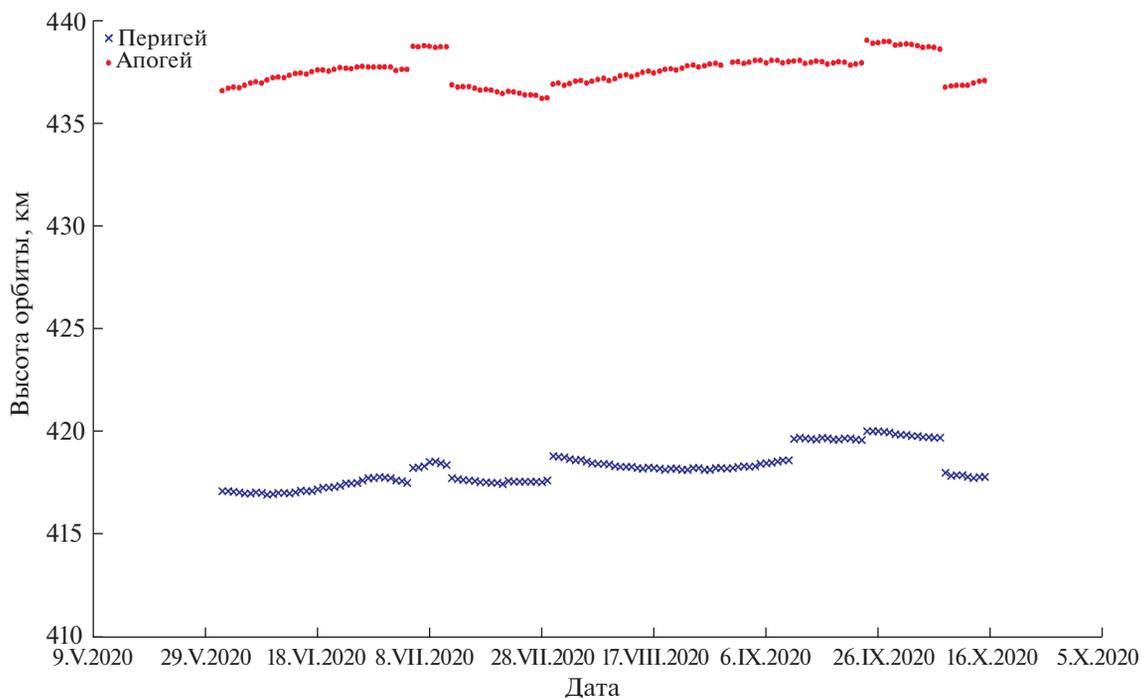
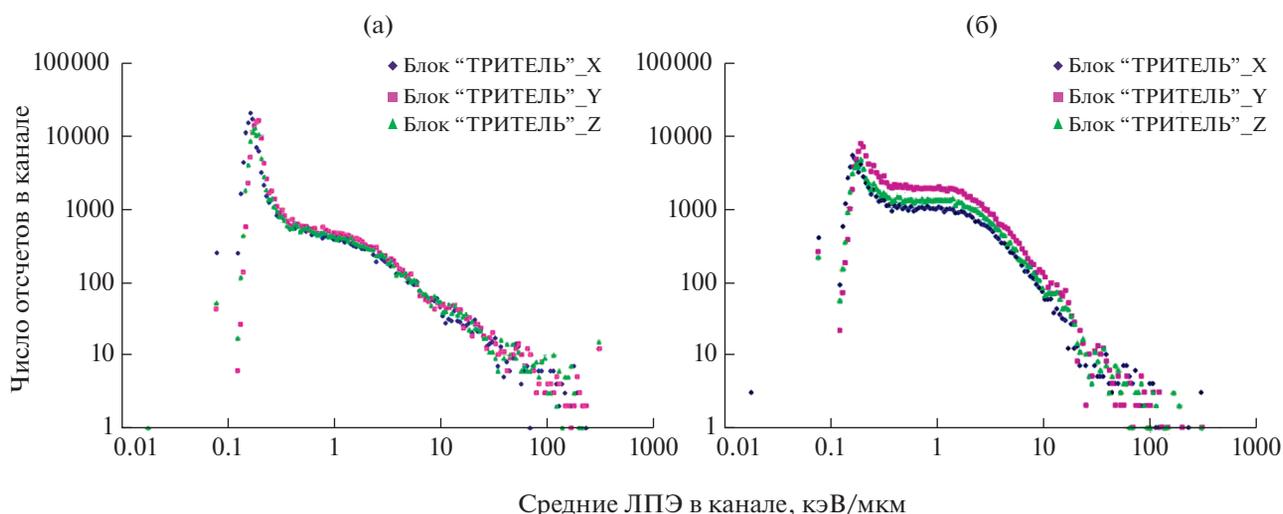


Рис. 8. Временная зависимость высоты орбиты МКС (апогей и перигей).

ли от ориентации телескопов детекторов ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) перейти к их защищенности с учетом их ориентации в пространстве. Как уже упоминалось, из рис. 2 видно, что направление  $Z$  телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” ориентировано в зенит

(от Земли) и, таким образом, этот телескоп детекторов защищен практически только одним лишь потолком СМ МКС и оборудованием, смонтированным на потолке в районе панелей 221 и 222. Направление  $X$  ориентировано вдоль оси станции



**Рис. 9.** Примеры спектров ЛПЭ, зарегистрированных НА “ТРИТЕЛЬ” (панель (а) — вне области ЮАА, панель (б) — внутри этой области).

по направлению вектора скорости движения МКС и из рис. 2 следует, что телескоп детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” с этого направления защищает практически вся станция МКС и все оборудование, расположенное в отсеках станции, смонтированных спереди от Служебного модуля МКС. Направление же  $Y$ , — следует из рис. 2, — ориентировано перпендикулярно направлению вектора скорости движения МКС по ее орбите вокруг Земли, а учитывая, что НА “ТРИТЕЛЬ” смонтирована на левом борту СМ МКС, оказывается, что с этого направления телескоп детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” защищает лишь обшивка Служебного модуля МКС, запанельное оборудование и материал панелей, на которых смонтирована НА “ТРИТЕЛЬ” внутри этого модуля.

Таким образом, максимальные значения мощности дозы с направления  $Y$ , видимые на рис. 7, могут объясняться минимальной из всех трех взаимно ортогональных вариантов ориентации телескопов детекторов ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) защищенностью детектора окружающим оборудованием станции. Минимальные же значения мощности дозы, зарегистрированные с направления  $X$  и видимые на рис. 7, объясняются тем, что на этом направлении защищенность детектора является максимальной (как уже упоминалось, с этого направления детектор защищает практически вся станция МКС). Зарегистрированные же одиночными детекторами (рис. 6) значения мощности дозы оказываются очень близкими, что обуславливается практически изотропной чувствительностью одиночных детекторов к поглощенной дозе для различных направлений регистрации налетающих частиц. Видимые на рис. 6 наиболее высокие значения мощности

доз, зарегистрированные с направления  $Z$ , учитывая аспект ориентации детектора и его защищенности с этого направления, хотя и очевидным образом связаны с потоками космической радиации с направления на зенит (от Земли), но вполне при этом укладываются в 20%-ю погрешность определения дозы детекторами НА “ТРИТЕЛЬ”.

Переход от анализа суточных временных зависимостей к анализу спектров ЛПЭ, один из которых, как уже упоминалось, в качестве примера представлен на рис. 9, позволяет прийти к примерно аналогичным выводам: спектры, регистрируемые аппаратурой вне области ЮАА, панель (а), со всех трех взаимно ортогональных направлений расположения детекторов практически не отличаются друг от друга. Это вполне объяснимо, поскольку вне области ЮАА основную роль играют потоки частиц ГКЛ с энергиями, значительно превышающими энергии заряженных частиц, захваченных во внутренний РПЗ; поэтому для частиц ГКЛ степень защищенности детекторов не играет существенной роли. Возможная анизотропия потоков ГКЛ, обусловленная условиями их проникновения в геомагнитное поле Земли, также не оказывает на зарегистрированные спектры существенного влияния вследствие усреднения регистрируемых показаний за время их регистрации детекторами (поскольку время набора анализируемых спектров ЛПЭ для каждого из трех телескопов детекторов составляет одни сутки). Напротив, спектры, зарегистрированные во внутреннем РПЗ с тем же самым временным разрешением в одни сутки, панель (б), демонстрируют явно видимую анизотропию дозового поля: детекторы, “смотрящие” в направлении левого борта СМ

МКС, с этого направления регистрируют значительно большее количество частиц, чем детекторы, регистрирующие потоки заряженных частиц с двух других направлений. Объясняется это может как регистрацией реальной анизотропии потоков космической радиации внутри области ЮАА, так и особенностями условий защищенности телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” окружающим оборудованием и конструкциями станции в точках, где эти детекторы смонтированы внутри СМ МКС. Чтобы прояснить этот вопрос, необходим анализ диаграмм защищенности детекторов. Следует отметить, что расчет и изучение диаграмм защищенности детекторов выходит за рамки данной статьи, и планируется для дальнейших работ по данной тематике. В целом же можно заключить, что метод изучения анизотропии потоков ионизирующей космической радиации с помощью телескопов детекторов показал большую эффективность в сравнении с регистрацией космической радиации одиночными детекторами.

На рис. 6 и рис. 7 также обращают на себя внимание относительно резкие увеличения мощности дозы на общем фоне зарегистрированных НА “ТРИТЕЛЬ” данных. Чтобы определить возможные причины этого, нами было проведено сравнение зарегистрированных детекторами НА “ТРИТЕЛЬ” показаний с гелиогеофизическими параметрами космической погоды: с данными нейтронного монитора (г. Апатиты, Россия), а также с данными по потокам протонов с энергией больше 10, 50 и 100 МэВ, зарегистрированных спутниками серии *GOES* на геостационарной орбите. К сожалению, это сравнение не позволило сделать сколь — либо однозначных выводов о причинах этих увеличений. По некоторым литературным данным [10, 11] известно, что подобные увеличения мощности дозы могут быть связаны с регистрацией высыпаний заряженных частиц из внешнего радиационного пояса Земли. Но детальное изучение этого аспекта применительно к дозиметрической информации, полученной НА “ТРИТЕЛЬ”, выходит за рамки этой статьи, и эти изыскания предполагается провести уже в следующих работах, посвященных данной тематике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предварительные результаты обработки дозиметрических данных прибора “ТРИТЕЛЬ” показывают, что НА “ТРИТЕЛЬ” позволила получить достаточно корректные данные по анизотропии потоков ионизирующей космической радиации в Служебном моду-

ле российского сегмента *Международной космической станции*. Использование методики телескопов детекторов для оценки неравномерности вкладов в поглощенную дозу потоков радиации, приходящих с различных направлений, демонстрирует большую эффективность в сравнении с регистрацией потоков космической радиации одиночными детекторами. Также результаты обработки данных прибора “ТРИТЕЛЬ” показывают, что, возможно, благодаря чувствительности этого прибора удалось зарегистрировать мощности дозы, связанные с высыпаниями заряженных частиц из внешнего радиационного пояса Земли. Полученные предварительные результаты обработки данных НА “ТРИТЕЛЬ” позволяют рассчитывать на успешную обработку всего массива дозиметрических данных НА “ТРИТЕЛЬ” за все то время, в течение которого проводился этот эксперимент на борту *РС МКС*. Полученные результаты создают большие перспективы для дальнейшего изучения различных аспектов проявления космической радиации на борту Служебного модуля российского сегмента *Международной космической станции*.

Авторы благодарят Виктора Владимировича Бенгина за продуктивное совместное обсуждение результатов исследования.

Настоящая работа выполнена в рамках базовой НИР РАН № 65.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25645.203-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. М.: Госстандарт, 1984.
2. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985. 148 с.
3. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. 1991. V. 21.
4. Плазменная гелиогеофизика: в 2 т. / Под ред. Л.М. Зеленого; И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 193–202.
5. *Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Спб.: Гидрометеоиздат, 1994.
6. *Лишневский А.Э., Иванова О.А., Hirn A. и др.* Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” в составе космического эксперимента “Матрешка-Р”: новые возможности для контроля радиационных условий на борту российского сегмента Международной космической станции // Приборы. 2020. № 12. С. 14–21.
7. *Hirn A., Apáthy I., Bodnár L. et al.* TRITEL measurements in the Russian Service Module (April–July 2013). 20th Workshop on Radiation Monitoring for the

- International Space Station, 8–10 September 2015, Cologne, Germany [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn_TRITEL.pdf](https://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn_TRITEL.pdf) (дата обращения: 18.01.2023).
8. Физические величины: справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 21.
  9. *Palfalvi J.K.* Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints // *Radiation Measurements*. 2009. V. 44. P. 724–728.
  10. *Dachev T.P., Tomov B., Matviichuk Y. et al.* Relativistic electrons high doses at International Space Station and Foton M2/M3 satellites // *Adv. Sp. Res.* 2009. V. 44. I. 12. P. 1433–1440.
  11. *Antonyuk G.I., Benghin V.V., Dachev T.P. et al.* Dose Rate Bursts Onboard the ISS and the “Lomonosov” Satellite in the Earth’s Outer Radiation Belt // *Problems of Geocosmos - 2020. Part of the Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences book series (SPEES)*. 2022. P. 351–363.