Всплески мощности дозы на МКС и спутнике «Ломоносов» в области внешнего радиационного пояса Земли

Г. И. Антонюк(1), В. В. Бенгин(1,2), Ц. П. Дачев(3), О. Ю. Нечаев(1), И. А. Золотарев(1), А. М. Амелюшкин(1), В. Л. Петров(1), М. И. Панасюк(1), И. В. Яшин(1)

(1) - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова («МГУ»), 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: antonjuk.gi15@physics.msu.ru;
(2) - Государственный научный центр Российской федерации институт медико-биологических проблем Российской академии наук («ГНЦ РФ-ИМБП РАН»), 123007, Россия, г. Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А, e-mail: v_benghin@mail.ru;
(3) - Институт космических исследований и технологии Болгарской академии наук («ИКИТ БАН»), 1113, Болгария, г. София, ул. «Акад. Георги Бончев», д. 1, e-mail: office@space.bas.bg

Аннотация

На борту МКС был проведен эксперимент по измерениям доз радиации за малой толщиной защиты. Эксперимент проводился на платформе Европейского Космического Агентства EXPOSE-R2 модуля Звезда с помощью прибора R3DR2.
Результаты данного эксперимента, находящиеся в свободном доступе, были использованы для анализа вариаций радиационной обстановки в области внешнего радиационного пояса Земли.
На спутнике «Ломоносов», запущенном НИИЯФ МГУ, был установлен прибор DEPRON, в состав которого входил полупроводниковый детектор, схожий конструктивно с детектором в приборе R3DR2.
Анализ показал наличие значительных возрастаний мощности дозы. Данные возрастания приводили к возрастанию вклада в среднесуточные значения мощности дозы в 5 и более раз. Мощность дозы подобных возрастаний достигала уровня в 28,8 мГр/ч по данным R3DR2 и 106,5 мГр/ч по данным DEPRON, однако суммарная доза отдельных возрастаний не превышала 0,8 мГр по данным R3DR2 и 1,6 мГр по данным DEPRON. Сопоставление с данными геомагнитной обстановки показало, что подобные возрастания наблюдаются в основном в периоды возмущения геомагнитной обстановки.
Полученная информация может быть полезна при оценке уровня радиационного воздействия в области околоземного пространства вблизи внешнего радиационного пояса Земли.

Ключевые слова:

Дозы радиации, МКС, спутник «Ломоносов», внешний радиационный пояс Земли

Введение

Излучение РПЗ создает значительную радиационную нагрузку при полётах на низких околоземных орбитах, в частности на борту Международной космической станции (МКС) [1]. Протоны внутреннего РПЗ создают повышенный радиационный фон в области Южно-атлантической аномалии (ЮАА), а электроны внешнего РПЗ в высокоширотных зонах магнитосферы Земли. Известно [2], что потоки электронов внешнего РПЗ испытывают значительные вариации, которые могут вызывать нарушения функционирования аппаратуры космических аппаратов, находящихся в области внешнего РПЗ.

Значительные всплески потоков электронов внешнего РПЗ наблюдались на высоте полёта МКС [3], при этом регистрировались высокие значения мощности поглощенной дозы радиации. Актуальной является задача оценить, насколько существенен вклад электронов внешнего РПЗ в дозу

облучения космонавтов на МКС. Установлено, что эти вариации потоков электронов могут быть обусловлены вариациями геомагнитного поля – буревой и суббуревой активностью [4]. Более подробное исследование этой связи может помочь в предупреждении значительной опасности для бортовых систем и экипажей КА на орбите.

Ставшие недавно доступными экспериментальные данные, полученные с помощью дозиметрической аппаратуры R3DR2, работавшей на борту МКС [5], позволяют оценить характер и масштаб радиационного воздействия электронов внешнего РПЗ. Сопоставление результатов оценок с данными близкого по дозиметрическим параметрам прибора DEPRON [6], летавшего на КА «Ломоносов», позволяет заметно уточнить картину дозиметрических характеристик всплесков потоков высокоэнергичных электронов в области полярного овала.

Аппаратура

В ходе проведенных дозиметрических исследований на внешней поверхности МКС были обнаружены большие возрастания мощности поглощенной дозы на высокоширотных участках траектории полёта [3]. Это поставило вопрос о том, насколько существенным может быть вклад таких возрастаний в дозу облучения космонавтов на МКС. В упомянутой работе [3] анализировалось, в основном, значение максимальной мощности дозы, в то время как для оценки радиационного воздействия более важна величина поглощенной дозы за время возрастания, чему и посвящена данная работа.

Прибор R3DR2, созданный в Институте космических исследований и технологии Болгарской академии наук – один из многих в семействе дозиметров с кремниевым полупроводниковым детектором излучения [7–9], однако, среди дозиметров, работавших на низких околоземных орбитах, его отличает малая толщина вещества, расположенного между падающим излучением и чувствительной областью детектора. Подробное описание прибора R3DR2 представлено в работе [3]. Эксперимент проводился на внешней поверхности модуля Звезда на платформе EXPOSE-R2 Европейского Космического Агентства. Был получен массив измерений, который включает в себя информацию с 23 октября 2014 года по 10 января 2016 года.

Другим дозиметром с похожей характеристикой является прибор DEPRON [6], разработанный в отделе космических наук НИИЯФ МГУ [10]. Детекторы прибора – два кремниевых полупроводниковых детектора и два газоразрядных гелиевых счетчика тепловых нейтронов. Полупроводниковые детекторы работали в амплитудно-импульсном режиме, который позволяет регистрировать поток и мощность дозы заряженных частиц космического излучения. Характеристики прибора DEPRON представлены на сайте [11]. Прибор DEPRON работал на КА «Ломоносов» в период с 5 мая 2016 года по 10 января 2017 года. Сопоставление параметров приборов R3DR2 и DEPRON, а также условий проведения измерений представлено в Таблице.

Таблица. Параметры приборов R3DR2 и DEPRON, и условия проведения измерений.

Параметр	Прибор R3DR2	Прибор DEPRON
Характеристики приборов		
Детектор излучения	Кремниевый PIN-диод	Полупроводниковый детектор
Толщина экранировки, г/см^2	0,3	0,54 у 1 детектора 0,81 у 2 детектора
Толщина п/п датчиков, мм	0,3	0,3
Пороговая энергия регистрации протонов, МэВ	19,5	20 у 1 детектора 25 у 2 детектора
Пороговая энергия регистрации электронов, МэВ	0,835	1,25 у 1 детектора 1,75 у 2 детектора
Временное разрешение, сек	10	1
Период проведения эксперимента	С 23 октября 2014 г До 11 января 2016 г	С 5 мая 2016 г До 10 января 2017 г
Характеристики космического аппарата		
Наименование КА	Модуль «Звезда» МКС	«Ломоносов»
Высота полета, км	420	500
Период обращения, мин	92	93
Наклонение орбиты, град	52	97

Методика обработки данных

Данные по прибору EXPOSE-R2 R3DR2 были скачаны из единой сетевой базы данных по инструментам типа «Liulin» [5]. Архив измерений включает в себя информацию с 23 октября 2014 года по 10 января 2016 года, разбитый на отдельные текстовые файлы по 10 дней. Он содержит данные о времени измерения, координатах МКС в географической и геомагнитной системах координат, значениях потока и мощности поглощенной дозы с 10-ти секундным разрешением.

Данные по прибору DEPRON содержит время измерения, координаты космического аппарата в двух системах отсчета – геомагнитной и географической, а также данные измерения дозы для каждого из двух полупроводниковых детекторов и счета по всем четырем детекторам за интервал времени измерения, равный одной секунде. В данной работе данные нейтронных детекторов не использовались.

Для обработки информации был использован язык программирования «R» [12] и оболочка Rstudio [13]. При этом основными используемыми библиотеками стали библиотека ggplot2 [14],

предназначенная для визуализации данных, и библиотека dplyr [15], предназначенная для работы с таблицами данных.

Были обработаны два массива данных, соответствующие данным приборов R3DR2 эксперимента EXPOSE-R2 и DEPRON со спутника «Ломоносов». Для каждого из них были составлены архивы, содержащие графики возрастаний потоков электронов внешнего радиационного пояса, а также их характеристики. Пример представления данных о возрастании представлен на рисунке 1.

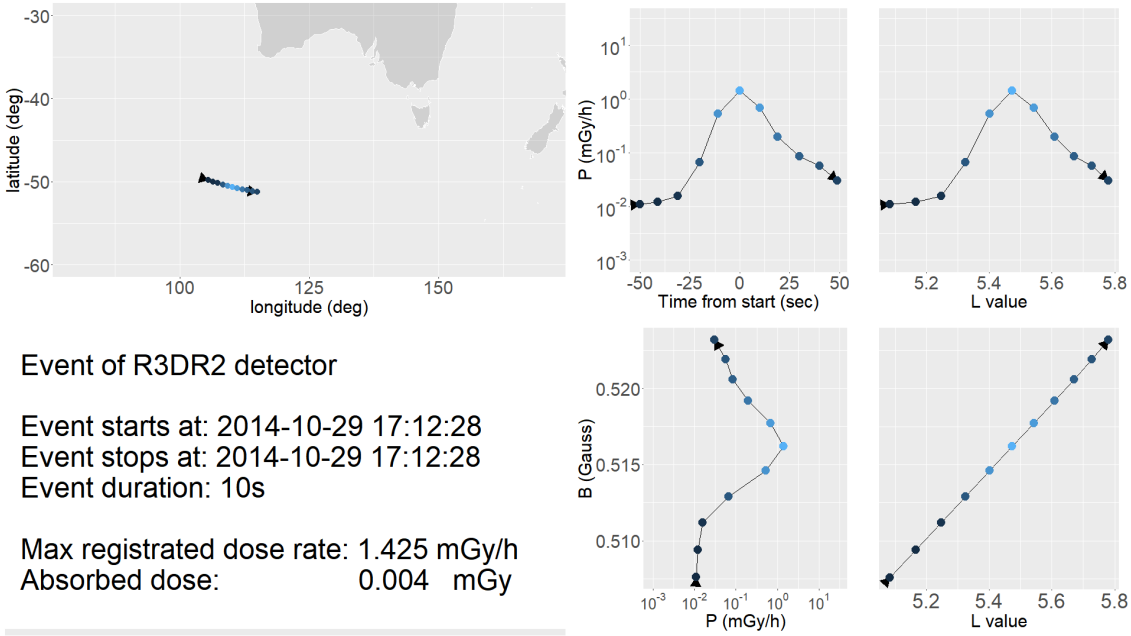

Рис. 1. – Набор данных о возрастании мощности дозы 29 октября 2014 года.

Изображение возрастания скомпоновано из нескольких графиков и характеристик данного события. В левом верхнем углу показан участок траектории МКС, соответствующий промежутку времени регистрации возрастания в географической системе координат. Под этой картой описаны название прибора, на котором было зарегистрировано событие, и основные характеристики события: дата и время первой и последней регистрации повышенного потока электронов, рассчитанная по ним длительность возрастания, максимальная мощность дозы, зарегистрированная в течение этого времени, а также доза, поглощенная веществом детектора за этот интервал времени. В правой части изображения находятся 4 графика. Левый верхний из этих 4-х графиков – зависимость мощности дозы от времени. По вертикальной оси - мощность дозы P в логарифмическом масштабе, по горизонтальной оси отложено время в секундах относительно начала возрастания. По диагонали от этого графика, в правой нижней части рисунка отображен рассматриваемый участок траектории МКС в L-B координатах. Точки графика соединены линией, на концах которой расположены стрелочки, обозначающие начало и конец возрастания. Над этим графиком, в правой верхней части рисунка, Представлена зависимость мощности дозы от L координаты, По диагонали – в правой нижней части,

приведен график зависимости мощности дозы от B координаты. Этот график как бы «положен на бок» - по горизонтальной оси отложена мощность дозы, а по вертикальной - B координата.

Выбранная форма представления данных позволяет анализировать возрастания мощности дозы и более сложной формы. На рисунке 2 представлены данные для события 26 декабря 2015 года в 16:12:45. Географическая широта события равна примерно 50° ю.ш, а долгота от 110° до 150° в.д., что соответствует области южнее Австралии. График зависимости мощности дозы от времени события показывает три пика в значении мощности дозы. В начале мощность дозы примерно за 30 секунд возрастает на 2,5 порядка со значения около 0,01 мГр/ч примерно до 3 мГр/ч. Далее мощность дозы относительно медленно спадает, однако в отметке 80 секунд от начала события опять испытывает резкий рост до пикового значения равного 4,7 мГр/ч. После данного возрастания наблюдается резкий спад и еще один резкий подъем перед возвращением к исходному значению мощности дозы. Данное событие длилось 220 секунд, при этом поглощенная доза, зарегистрированная прибором, равна 0,08 мГр.

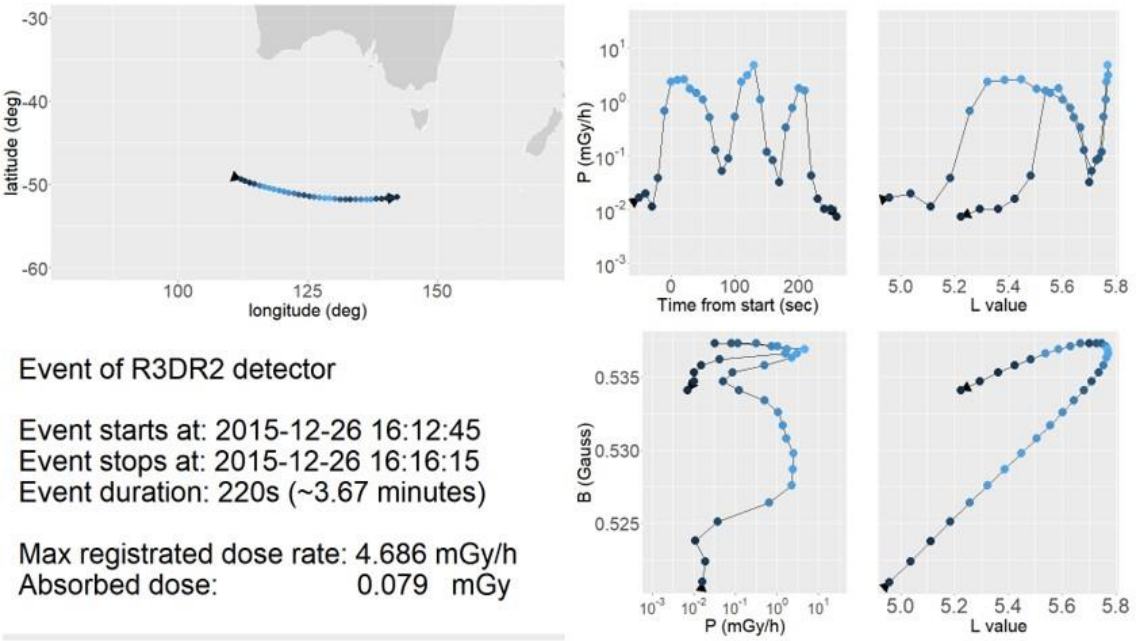

Рис. 2. – Возрастание мощности дозы 26 декабря 2015 года в 16:12:45.

Событие, имеющее целых три пика, является большой редкостью. На траектории МКС в LB координатах, которая изображена на правом нижнем графике, хорошо видно расположение максимумов мощности дозы, которое отражено более светлым цветом точек. Можно заметить, что 1 и 3 пики располагаются примерно на одной L-оболочке со значением параметра 5,5, в то время как 2 пик соответствует другой L-оболочке со значением 5,75. Можно предположить, что в момент пролета МКС в данной области пространства наблюдался дополнительный нестационарный поток электронов.

Данные, полученные на КА «Ломоносов», позволяют получить более широкую картину радиационного воздействия электронов внешнего радиационного пояса, поскольку, в отличие от МКС, спутник в области высоких широт проходил через все L-оболочки на каждом витке. Также данный прибор имеет в 10 раз более высокое временное разрешение, чем прибор R3DR2. Данная особенность позволяет тщательнее исследовать более быстрые процессы. Однако более высокое временное разрешение приводит к тому, что в области малой мощности дозы статистика получается недостаточной для построения плавных картин, и графики оказываются сильно «изрезаны».

На рисунке 3 представлены типичные графики, характеризующие прохождение КА через зону внешнего пояса.

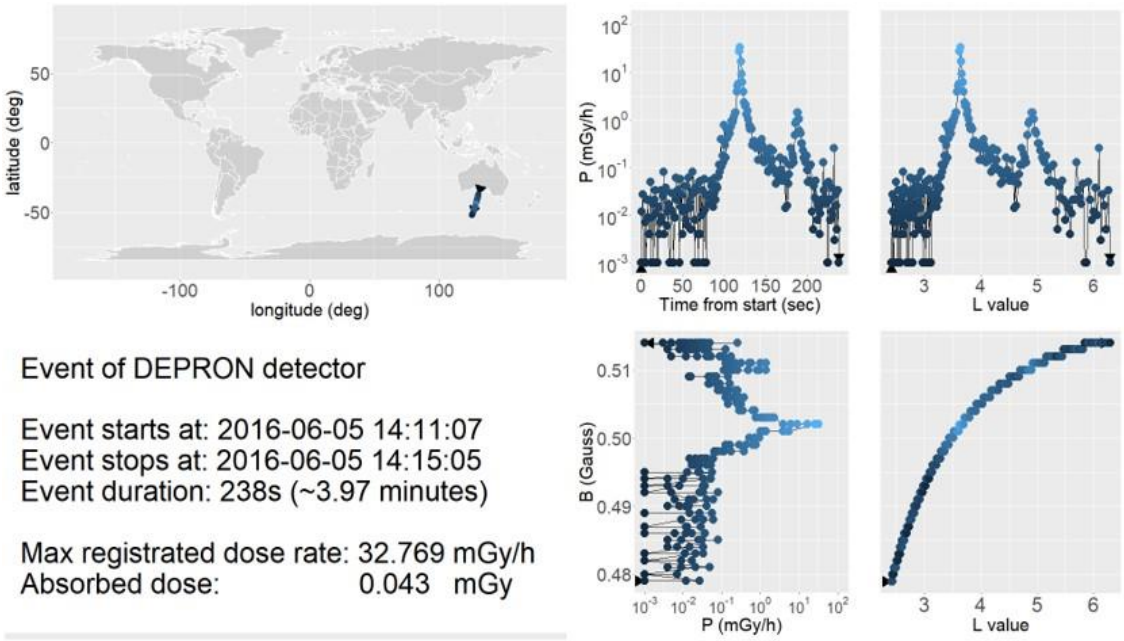

Рис. 3. – Прохождение КА «Ломоносов» через зону внешнего РПЗ 5 июня 2016 года.

На рисунке 3 показано типичное событие, зарегистрированное прибором DEPRON 5 июня 2016 года в 14:11:07. Географическая карта показывает, что данное событие произошло южнее Австралии. При этом наблюдается два пика мощности дозы, которые были зафиксированы на широтах 45° и 50° ю.ш. Графики в правой части изображения показывают, что значение мощность дозы резко выросла примерно на 3 порядка с 0,01 мГр/ч до 32,8 мГр/ч, затем плавно снизилась до значения около 0,1 мГр/ч и снова увеличилась на порядок перед возвращением к исходным значениям. Полная длительность события при этом составила 238 секунд, однако сами пики мощности дозы значительно уже и имеют длительность около 20-30 секунд каждый. Поглощенная доза за данное возрастание составила 0,4 мГр.

Общие картины возрастаний

В качестве полученных результатов данной работы представлены графики зависимости максимальной мощности дозы от времени, а также поглощенной дозы от времени. Было выявлено 63

возрастания мощности дозы при пересечении зоны внешнего радиационного пояса Земли в данных прибора DEPRON и 777 возрастаний в данных прибора R3DR2. На рисунке 4 синим цветом показаны максимальные мощности дозы, регистрируемые прибором R3DR2. Данный прибор имеет защиту 0,3 г/см^2, что меньше, чем у детекторов прибора DEPRON. В данном эксперименте регистрируется заметно большее число возрастаний потока, которые в основном имеют меньшие максимальные мощности дозы, чем схожие события, регистрируемые прибором DEPRON. Данный детектор зарегистрировал максимальную мощность дозы 9 ноября 2015 года в 15:11:38. В это время наблюдалось значение равное 28,8 мГр/ч.

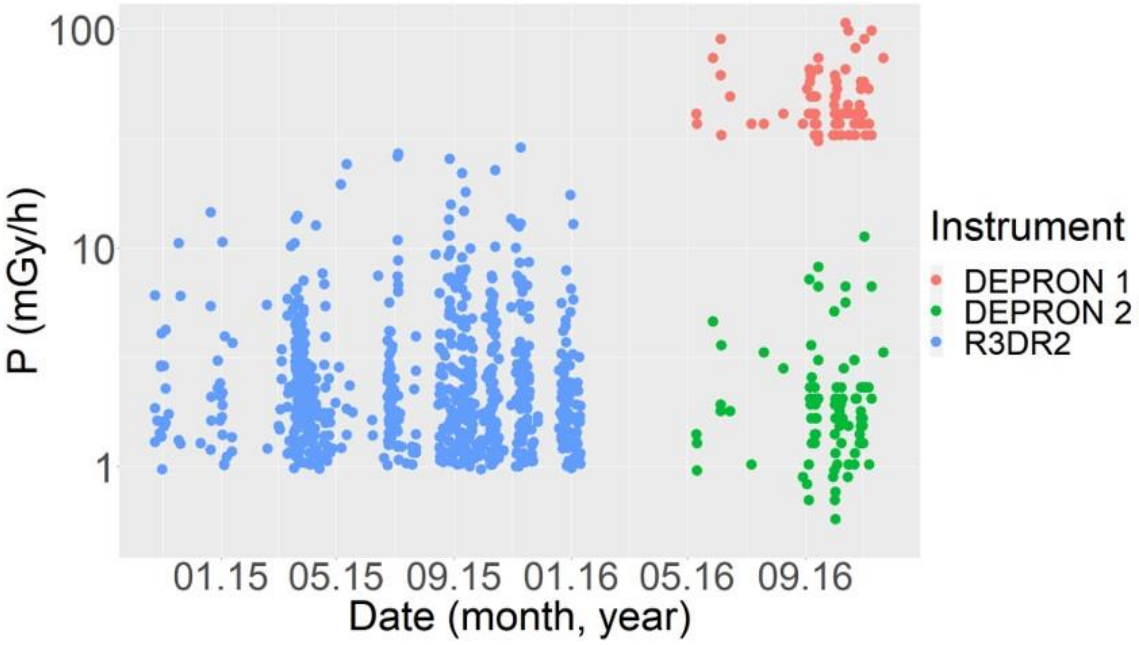

Рис. 4. – Зависимость максимальной мощности дозы от времени.

На рисунке 4 красным и зеленым цветом показаны максимальные значения мощности дозы, зарегистрированные двумя детекторами прибора DEPRON в течение возрастаний. Первый детектор, имеющий защиту 0,54 г/см2, регистрирует максимальную мощность дозы равную 106,5 мГр/ч. Данное значение регистрируется 13 октября 2016 года в период с 04:56:39 до 05:00:41.

На рисунке 5 синим цветом показаны полные дозы, поглощенные детектором прибора R3DR2 во время возрастаний потока электронов.

Событие, в течение которого прибор регистрировал наибольшую мощность дозы не совпадает с событием с наибольшей поглощенной дозой. Во время данного возрастания имелось лишь кратковременное повышение мощности дозы, которое не дало большого вклада в общее значение поглощенной дозы, которая составила 0,18 мГр. Максимальное значение дозы, поглощенной детектором, было зафиксировано 4 июля 2015 года в период с 18:57:25 до 19:05:35. В течение данного длительного возрастания потока электронов прибор зафиксировал значение поглощенной дозы равное 0,77 мГр, а максимальное значение мощности дозы составило 27 мГр/ч.

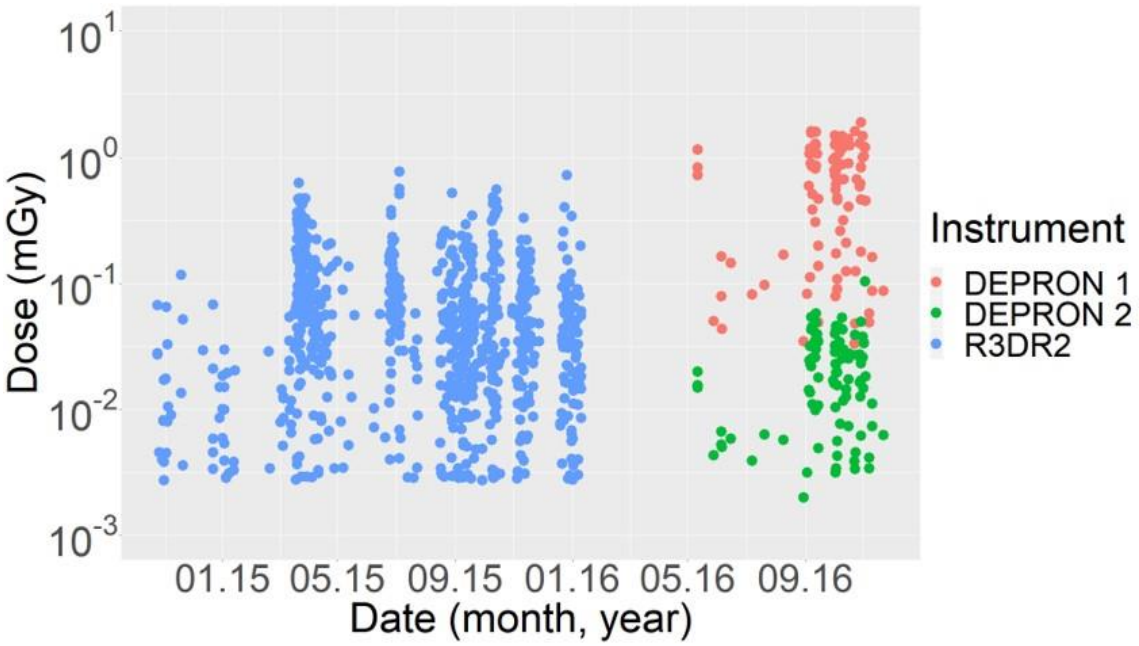

Рис. 5. – Отображение поглощенной дозы за каждое возрастание.

Также рисунок 5 показывает красным и зеленым цветом полные дозы, зарегистрированные двумя детекторами прибора DEPRON в течение возрастаний. Событие 13 октября 2016 года, во время которого наблюдалось самое большое значение максимальной мощности дозы, имеет суммарную поглощенную первым детектором дозу равную 0,2 мГр. Это свидетельствует о том, что данное возрастание было достаточно кратковременным. Второй детектор в это время зарегистрировал поглощенную дозу лишь около 0,01 мГр. Данные дозы являются достаточно малыми, чтобы нанести серьезный вред. Максимальная доза, полученная в течение возрастания, оказалась равна 1,6 мГр, что также было зарегистрировано 1 детектором, но 11 сентября 2016 года в период с 22:24:06 до 22:29:16.

Данные возрастаний были сопоставлены с широко используемыми Dst и AE индексами геомагнитной активности [16]. Результаты представлены на рисунке 6.

На верхнем графике отмечены события возрастаний мощности дозы в зоне внешнего радиационного пояса Земли. На нижних – величины Dst-индекса и AE-индекса.

Можно заметить, что основное количество возрастаний происходят после сильных падений величины Dst-индекса и возрастаний величины AE-индекса, отмеченных пунктирной линией. Более детальное сопоставление показало, что регистрация большого числа возрастаний мощности дозы в области внешнего РПЗ происходит примерно через 1-2 суток после начала фазы восстановления геомагнитной бури или других возмущений геомагнитной обстановки.

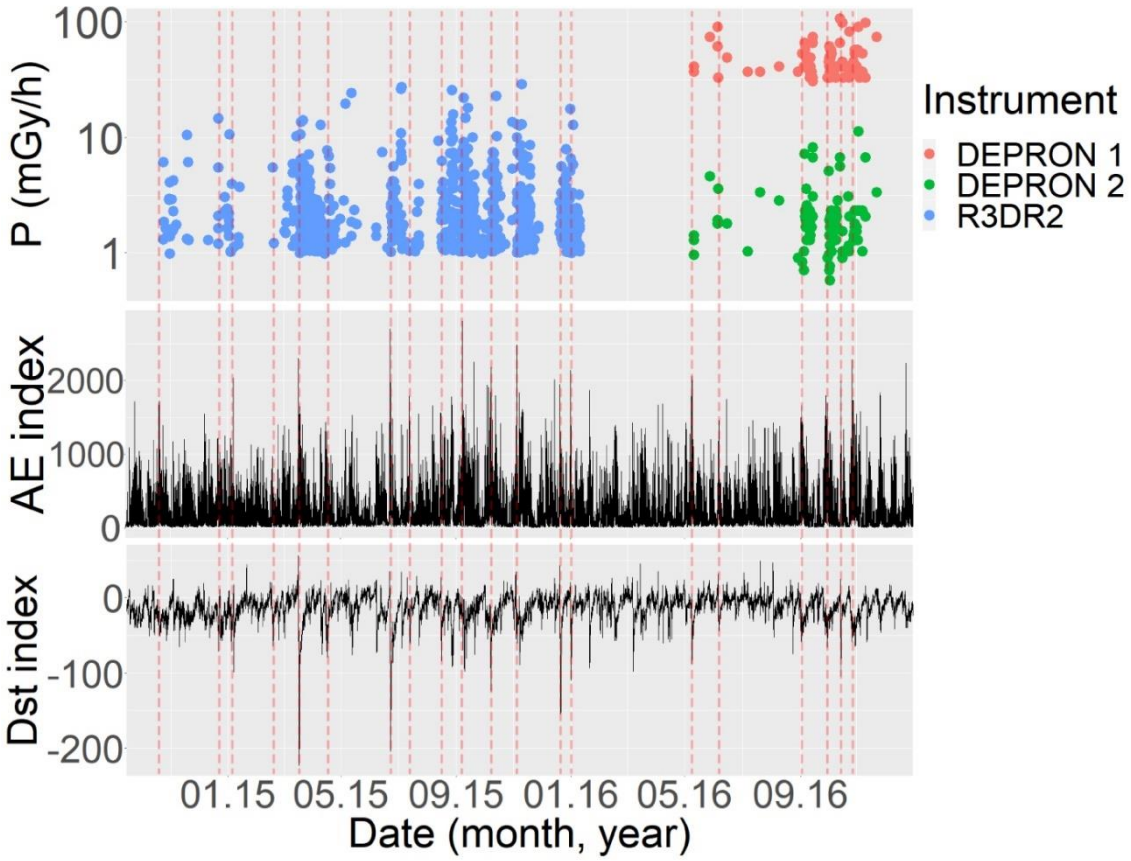

Рис. 6. – Сопоставление всплесков мощности дозы в зоне внешнего радиационного пояса Земли с индексами геомагнитной активности.

Заключение

Проведен анализ дозиметрических характеристик возрастаний мощности дозы за малой толщиной защиты при пересечении зоны внешнего радиационного пояса Земли с целью оценки степени их радиационной опасности на основе данных прибора R3DR2, полученных в ходе эксперимента EXPOSE-R2 на борту МКС, и данных прибора DEPRON, работавшего на спутнике «Ломоносов».

Было выявлено 63 возрастания мощности дозы при пересечении зоны внешнего радиационного пояса Земли в данных прибора DEPRON и 777 возрастаний в данных прибора R3DR2.

Сопоставление частоты обнаружения возрастаний с данными о геомагнитной обстановке в виде Dst и AE вариаций свидетельствует о существенном увеличении числа возрастаний примерно через сутки после периодов возмущенной геомагнитной обстановки.

Подтверждено, что мощность дозы, регистрируемая на низкоорбитальном КА за малой толщиной защиты при пересечении области внешнего радиационного пояса, может достигать высоких значений. На МКС регистрировалась величина 28,8 мГр/ч, а на КА «Ломоносов» – 106,5 мГр/ч.

Однако эти возрастания носят кратковременный характер. В процессе обработки не было обнаружено возрастаний, которые могли бы представлять опасность для экипажей пилотируемых космических аппаратов. Максимальное значение дозы за одно возрастание составило 0,77 мГр по прибору R3DR2 и 1,6 мГр по прибору DEPRON.

Список литературы

1. Петров В. Н. и др. Радиационная дозиметрия в космическом полете // Модель космоса. М.: Изд-во «КДУ». – 2007. – Т. 1. – С. 642-667. ISBN:978-5-98227-419-9.
2. Кузнецов С. Н., Тверская Л. В. Радиационные пояса Земли //Модель космоса. М.: Изд-во «КДУ». – 2007. – Т. 1. – С. 518-546. ISBN:978-5-98227-419-9.
3. Dachev T. P. et al. Overview of the ISS Radiation Environment Observed during the ESA EXPOSE-R2 Mission in 2014–2016 //Space Weather. – 2017. – Т. 15. – №. 11. – С. 1475-1489. doi:10.1002/2016SW001580.
4. Antonova E. E., Stepanova M. V. The problem of the acceleration of electrons of the outer radiation belt and magnetospheric substorms //Earth, Planets and Space. – 2015. – Т. 67. – №. 1. – С. 1-8. doi:10.1186/s40623-015-0319-7.
5. Dachev T. P. et al. Unified web-based database with Liulin type instruments' cosmic radiation data. http://esa-pro.space.bas.bg/database.
6. Benghin V. V. et al. An Experiment in Radiation Measurement Using the Depron Instrument //Space Science Reviews. – 2018. – Т. 214. – №. 1. – С. 1-9. doi:10.1007/s11214-017-0445-6.
7. Dachev T. et al. Analysis of the pre-flight and post-flight calibration procedures performed on the Liulin space radiation dosimeter //Acta astronautica. – 1998. – Т. 42. – №. 1-8. – С. 375-387. doi:10.1016/S0094-5765(98)00132-5.
8. Panasyuk M. et al. Description of the Space Radiation Contol System for the Russian Segment of ISS ALPHA //12th IAA Man in Space Symposium, Washington, DC, June 1997. – 1997. doi:10.1134/S0010952510030020.
9. Reitz G. et al. Space radiation measurements on-board ISS—the DOSMAP experiment //Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – Т. 116. – №. 1-4. – С. 374-379. doi:10.1093/rpd/nci262.
10. Отдел космических наук НИИЯФ МГУ. http://sinp.msu.ru/ru/strukted/114.
11. Научная аппаратура DEPRON космического аппарата «Михайло Ломоносов». http://lomonosov.sinp.msu.ru/scientific-equipment-2/depron.
12. The R Project for Statistical Computing. https://www.r-project.org/.
13. RStudio - an integrated development environment (IDE) for R. https://www.rstudio.com/products/rstudio/.
14. Wickham H. et al. ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics. https://ggplot2.tidyverse.org/.
15. Wickham H. et al. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. https://dplyr.tidyverse.org/.
16. Мировой Центр Данных по Солнечно-Земной Физике. http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html.