

УДК 629.786.2:614.876

## РАДИАЦИОННЫЙ АСПЕКТ ДВУХ ВАРИАНТОВ НАКЛОНЕНИЯ ОРБИТЫ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СЛУЖЕБНОЙ СТАНЦИИ

© 2023 г. В. Г. Митрикас\*

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

\*vg\_mit@imbp.ru

Поступила в редакцию 06.04.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 15.06.2022 г.

Рассмотрен вклад в эффективную дозу от космических излучений радиационных поясов Земли, галактических космических лучей и протонов солнечных протонных событий для космонавтов, находящихся в рабочем отсеке большого диаметра служебного модуля *МКС*. Показано, что для квазистационарных источников космических излучений изменение наклона орбиты в  $51.6^\circ$  на  $97.0^\circ$  не приводит к существенным изменениям среднесуточной мощности эффективной дозы. При рассмотрении вклада в эффективную дозу от протонов солнечных вспышек дозовая нагрузка на космонавтов может увеличиваться в десять и более раз.

DOI: 10.31857/S0023420622700030, EDN: LUNCOZ

## ВВЕДЕНИЕ

Среди профессионалов космической отрасли обсуждаются перспективы создания *Российской орбитальной служебной станции (РОСС)*. При этом рассматриваются два варианта наклона орбиты:  $51.6^\circ$  и  $97.0^\circ$ . По поводу второго варианта в интервью журналу “Русский космос” Д.О. Рогозин заявил: “Конечно, такая орбита подразумевает более высокий уровень радиации, и это повлияет на длительность полета экспедиций” (<https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2022-01-single.pdf>).

Проверим насколько справедливо это утверждение.

## МЕТОДИКА

Самая большая среднесуточная мощность эффективной дозы для *МКС* зарегистрирована в августе–сентябре 2020 г. Средняя высота орбиты *МКС* в это время равнялась  $H_{cp} = 424.0 \pm 1.6$  км, среднее значение  $A_p$ -индекса —  $10.1 \pm 6.7$ . Для этого периода были выполнены расчеты дозовых нагрузок на космонавтов при их нахождении в рабочем отсеке большого диаметра (РОБД) служебного модуля (СМ) *МКС* при полете станции по орбите с наклоном  $51.6^\circ$  и  $97.0^\circ$ .

Согласно действующим нормативам обеспечения радиационной безопасности (РБ) [1] для контроля уровней радиационного воздействия на космонавтов необходимо использовать величину

эффективной дозы, которая согласно наземным нормам РБ [2] определяется как:

$$E = \sum_T W_T H_T, \quad (1)$$

где  $H_T$  — эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ ,

$$H_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(r_i); \quad (2)$$

$N$  — количество точек в органе, для которого проводится расчет;  $W_T$  — взвешивающий коэффициент для органа или ткани  $T$  (табл. 1).

Согласно [3] поглощенная доза в точке  $r_i$  органа  $T$  вычисляется по формуле:

$$D_T(r_i) = \int_0^\infty D(\xi) \omega_T(\xi, r_i) d\xi, \quad (3)$$

где  $D(\xi)$  — удельная доза на глубине  $\xi$ ;  $\omega_T(\xi, r_i)$  — функция экранированности точки  $r_i$  в органе  $T$ :

$$\omega_T(\xi, r_i) = \frac{1}{4\pi\Delta\xi} \int_{4\pi} \eta(r_i, \Omega) d\Omega, \quad (4)$$

где  $\eta(r_i, \Omega)$  — единичная функция на отрезке от  $\xi$  до  $\xi + \Delta\xi$ .

Под функцией экранированности выбранной точки внутри рассматриваемого объекта понимается функция плотности вероятности встретить в любом направлении из рассматриваемой точки толщину защиты в интервале от  $X$  до  $X + dX$ . Расчет функций экранированности проводится в со-

**Таблица 1.** Количество точек в органах и тканях ( $N$ ) и взвешивающие коэффициенты ( $W_T$ ) для определения эффективной дозы

| №  | Орган                       | $W_T$ | $N$ |
|----|-----------------------------|-------|-----|
| 1  | Гонады                      | 0.20  | 11  |
| 2  | Костный мозг (красный)      | 0.12  | 14  |
| 3  | Толстый кишечник            | 0.12  | 10  |
| 4  | Легкие                      | 0.12  | 36  |
| 5  | Желудок                     | 0.12  | 15  |
| 6  | Мочевой пузырь              | 0.05  | 7   |
| 7  | Грудная железа              | 0.05  | 2   |
| 8  | Печень                      | 0.05  | 19  |
| 9  | Пищевод                     | 0.05  | 3   |
| 10 | Щитовая железа              | 0.05  | 3   |
| 11 | Кожа                        | 0.01  | 2   |
| 12 | Клетки костных поверхностей | 0.01  | 34  |
| 13 | Хрусталик глаза             | 0.007 | 2   |
| 14 | Центральная нервная система | 0.007 | 3   |
| 15 | Сердце                      | 0.007 | 7   |
| 16 | Левая почка                 | 0.007 | 7   |
| 17 | Правая почка                | 0.007 | 7   |
| 18 | Селезенка                   | 0.007 | 6   |
| 19 | Прямая кишка                | 0.007 | 7   |

ответствии с государственным стандартом [4]. В качестве модели тела человека (фантома) используются результаты работы [5, 6], а в качестве модели *МКС* результаты работы [7]. Входящая в равенство (1) эквивалентная доза  $H$  связана с поглощенной дозой  $D$  в выражении (2) простым соотношением:

$$H = D \cdot QF, \quad (5)$$

где  $QF$  — фактор качества.

В настоящей работе использована следующая зависимость коэффициента качества от линейной передачи энергии заряженных частиц в веществе  $S(E)$  в МэВ см<sup>-1</sup>:

$$\left. \begin{aligned} &1.0, & S(E) \leq 35, \\ &0.02858S(E), & 35 \leq S(E) \leq 70, \\ &7.31 \cdot 10^{-2}S(E), & 70 \leq S(E) \leq 230, \\ &QT = 4.9 \cdot 10^{-2}S(E)^{0.848}, & 230 \leq S(E) \leq 530, \\ &-42.53 + 19.28 \ln S(E), & 530 \leq S(E) \leq 1750, \\ &20.0, & 1750 \leq S(E). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Подставим выражения (3) и (5) в равенство (1) и, используя линейность выражения (1), поменя-

ем порядок интегрирования и суммирования. В итоге выразим эффективную дозу как:

$$E = \int_0^\infty H_{\text{эф}}(\xi) \omega_{\text{эф}}(\xi, r_i) d\xi, \quad (7)$$

где  $\omega_{\text{эф}}(\xi, r_i)$  — функция экранированности для расчета эффективной дозы.

$$\omega_{\text{эф}}(\xi, r_i) = \sum_T W_T \omega_T(\xi, r_i). \quad (8)$$

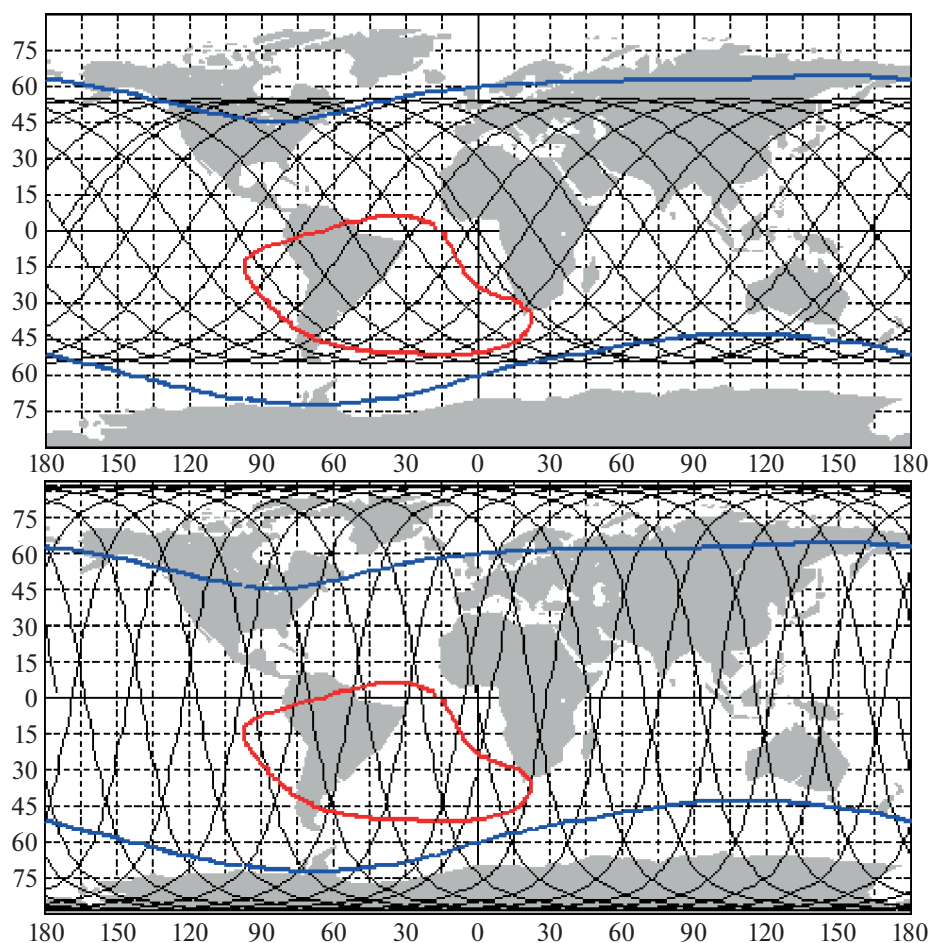
При таком подходе теряется определенность конкретной точки, но исключается необходимость расчета радиационного воздействия на каждый орган. Проведены расчеты функций экранированности различных органов для четырех пространственных ориентаций фантома: вперед—назад—влево—вправо. Для каждой пространственной ориентации использовано различное количество точек в соответствии с табл. 1. При этом в расчетах функций экранированности красного костного мозга учитывалось его процентное содержание в различных точках.

Определялись парциальные вклады в эффективную дозу от электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗе и РПЗр) [4, 8] и от галактических космических лучей (ГКЛ) [9]. Солнечных протонных событий (СПС) в рассматриваемый период времени не зафиксировано. В качестве моделей потоков частиц РПЗ использованы результаты работы [10], в которой проведена модификация стандартов [11, 12]. В качестве модельного описания спектральных распределений заряженных частиц ГКЛ используется представление для отдельных групп ГКЛ из работы [13]. При этом потоки протонов с энергиями выше 100 МэВ нормировались на экспериментальные значения, полученный на спутниках *GOES* (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite, геостационарный эксплуатационный спутник наблюдения за окружающей средой) [<http://www.swpc.noaa.gov/>]. Учет геомагнитных возмущений проводился по данным [[http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/)].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов поглощенной и эффективной доз представлены в табл. 2.

Из анализа результатов табл. 2 следует, что мощность эффективной дозы в мезагиверт в сутки мало меняется при переходе от наклонения в 51.6° к наклонению орбиты в 97.0°, всего на 1–2%. При этом мощность поглощенной дозы в микрогрей в сутки меняется на 15–17%. Объяснение такому различию можно получить, рассматривая на рис. 1 трассы полета *МКС* для обоих вариантов наклонения орбиты.



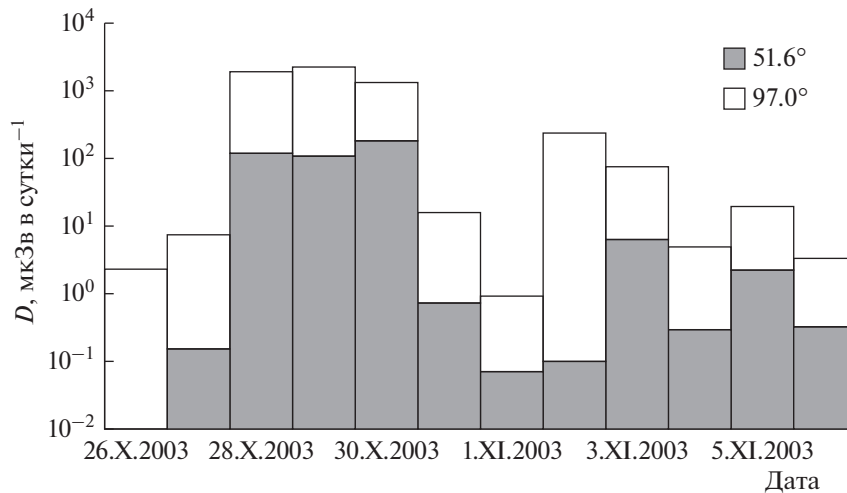
**Рис. 1.** Трассы полета СМ МКС для наклона орбиты  $51.6^\circ$  (сверху) и для наклона орбиты  $97.0^\circ$  (снизу). Кривая в центре рисунков обозначает изолинию постоянной магнитной напряженности  $B = 0.24$  Гс, которая примерно соответствует границам ЮАА внутреннего РПЗ. Кривые в верхней и нижней части рисунков обозначают изолинии  $L = 3.0$ , которые примерно соответствуют границам внешнего электронного РПЗ.

Из рассмотрения рис. 1 следует, что при наклонении орбиты в  $51.6^\circ$  суммарное время нахождения СМ МКС в зоне Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) составляет примерно 150 мин/сут, а при наклонении орбиты в  $97.0^\circ$  около 100 мин/сут.

В зоне ЮАА формируется вклад от протонов РПЗ, который практически пропорционален времени нахождения в ней. Вклад в эффективную дозу от ГКЛ формируется, в основном, в области полярных шапок. Этот вклад для мощности по-

**Таблица 2.** Парциальные вклады в дозу, полученную космонавтами при их нахождении в РОБД СМ МКС

|          | Наклонение орбиты 51.6°                  |       |       |       | Наклонение орбиты 97.0° |       |       |       |
|----------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
|          | Поглощенная доза, мкГр сут <sup>-1</sup> |       |       |       |                         |       |       |       |
| 2020 г.  | РПЗе                                     | РПЗр  | ГКЛ   | Σ     | РПЗе                    | РПЗр  | ГКЛ   | Σ     |
| Август   | 0.6                                      | 193.2 | 107.5 | 301.4 | 1.0                     | 130.0 | 126.7 | 257.8 |
| Сентябрь | 0.7                                      | 187.0 | 107.6 | 295.3 | 1.1                     | 128.8 | 127.3 | 257.2 |
|          | Эффективная доза, мкЗв сут <sup>-1</sup> |       |       |       |                         |       |       |       |
| 2020 г.  | РПЗе                                     | РПЗр  | ГКЛ   | Σ     | РПЗе                    | РПЗр  | ГКЛ   | Σ     |
| Август   | 0.6                                      | 237.5 | 503.8 | 742.0 | 1.0                     | 159.9 | 563.9 | 724.8 |
| Сентябрь | 0.7                                      | 229.3 | 503.2 | 733.1 | 1.1                     | 158.0 | 564.6 | 723.6 |



**Рис. 2.** Динамика эффективной дозы для космонавта в РОБД СМ МКС. Затемненная гистограмма для наклонения орбиты  $51.6^\circ$ , прозрачная гистограмм для наклонения орбиты  $97.0^\circ$ .

глощенной дозы в микрогрей в сутки возрастает на  $\sim 12\%$ , но этого возрастания недостаточно для компенсации снижения вклада в поглощенную дозу от протонов РПЗ. Это же увеличение почти полностью компенсирует снижение вклада протонов РПЗ в мощность эффективной дозы в мезиверт в сутки. Противоположная картина наблюдается для электронов. Для орбиты с наклонением в  $97.0^\circ$  становится более существенным вклад от электронов внешнего электронного РПЗ, но по абсолютной величине он остается очень малым.

**Таблица 3.** Динамика вкладов в эффективную дозу (в мкЗв сут $^{-1}$ ) космонавтов при их нахождении в РОБД СМ МКС от серии СПС в период 26.X–6.XI.2003

|          | Наклонение орбиты $51.6^\circ$ | Наклонение орбиты $97.0^\circ$ |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|
| 26.X     | —                              | 2.2                            |
| 27.X     | 0.2                            | 7.6                            |
| 28.X     | 115.5                          | 1904.5                         |
| 29.X     | 103.7                          | 2213.6                         |
| 30.X     | 177.8                          | 1273.9                         |
| 31.X     | 0.7                            | 15.9                           |
| 1.XI     | 0.1                            | 0.9                            |
| 2.XI     | 0.1                            | 243.9                          |
| 3.XI     | 6.4                            | 74.8                           |
| 4.XI     | 0.3                            | 4.9                            |
| 5.XI     | 2.4                            | 18.6                           |
| 6.XI     | 0.3                            | 3.3                            |
| $\Sigma$ | 407.5                          | 5761.7                         |

Как отмечено в работе [14] “*в настоящее время не существует единой аналитической модели для описания поведения электронов внешнего радиационного пояса Земли, поэтому для конкретного события на основе предлагаемых механизмов ускорения и транспортировки невозможно предсказать ожидаемую динамику потоков электронов*”. Возможно, что использование модели электронов согласно документу [12] не всегда корректно, особенно при возмущениях геомагнитной обстановки. Однако, как отмечено выше, в рассматриваемый период времени геомагнитная обстановка была достаточно спокойной, значение  $A_p$ -индекса равнялось  $10.1 \pm 6.7$ .

Иная картина складывается для СПС. Самое большое СПС за весь период эксплуатации МКС произошло 28.X.2003 в серии всплеск за период 26.X–6.XI.2003. Поток протонов с энергиями больше 30 МэВ за все событие от 28.X.2003 составил  $3.1 \cdot 10^9$  протон см $^{-2}$ .

Эффективная доза для космонавта, находящегося в РОБД от всех протонных всплесков рассматриваемого периода при наклонении орбиты в  $51.6^\circ$  составила 407.5 мкЗв. Для наклонения орбиты в  $97.0^\circ$  эффективная доза выросла примерно в 14 раз и составила 5761.7 мкЗв. Необходимо отметить, что даже для СПС от 4.XI.2003 (поток протонов с энергиями больше 30 МэВ составил  $3.1 \cdot 10^7$  протон см $^{-2}$ ) для орбиты  $51.6^\circ$  эффективная доза составила всего 3 мкЗв, но для орбиты  $97.0^\circ$  такая доза возрастает до 27 мкЗв. Динамика эффективной дозы для обоих вариантов наклонения орбиты представлена на рис. 2.

Конкретные значения эффективной дозы представлены в табл. 2. Из рассмотрения результатов табл. 3 следует, что даже для крупных СПС

**Таблица 4.** Парциальные вклады в эквивалентную дозу в мкЗв на кожу космонавтов при осуществлении ВКД из *МКС* на орбите с наклонением  $51.6^\circ$  и с наклонением  $97.0^\circ$

|          | Наклонение орбиты $51.6^\circ$ | Наклонение орбиты $97.0^\circ$ |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|
| РПЗе     | 103.2                          | 131.1                          |
| РПЗр     | 190.9                          | 158.5                          |
| ГКЛ      | 27.2                           | 164.1                          |
| $\Sigma$ | 321.3                          | 453.7                          |

установленные нормативы обеспечения радиационной безопасности [1] не будут превышены.

При этом необходимо отметить, что в малых модулях *МКС* толщина защиты близка к  $1 \text{ г см}^{-2}$ . Это означает, что эффективная доза для космонавтов, находящихся в малых модулях, будет существенно больше, чем для космонавтов, находящихся в РОБД. В работе [15] отмечается, что за толщиной защиты  $1 \text{ г см}^{-2}$  алюминия дополнительный радиационный риск составляет 55% от демографического риска. При увеличении толщины защиты до  $20 \text{ г см}^{-2}$  радиационный риск снижается до 14%. Из этого следует, что на *РОСС* необходимо предусматривать радиационное убежище с толщиной защиты  $\sim 20 \text{ г см}^{-2}$ .

Отдельного рассмотрения требует оценка радиационной нагрузки на космонавтов при осуществлении выходов в открытый космос и выполнении внекорабельной деятельности (ВКД). В качестве примера был рассмотрен один из выходов за 2014 г. Во время этого выхода средняя высота орбиты составляла 424.7 км, значение  $A_p$ -индекса равнялось 5. При осуществлении ВКД основное внимание от эффективной дозы переходит в оценке эквивалентной дозы на кожу (КЖ) [1]. Эффективная доза практически совпадает с дозой на кроветворную систему, средняя глубина залегания которой составляет 5 см. Для такой глубины практически незначителен вклад в дозу от электронов. В табл. 4 представлены результаты расчетов парциальных вкладов в эквивалентную дозу на кожу от источников космических излучений при проведении ВКД из *МКС* на орбите с наклонением  $51.6^\circ$  и с наклонением  $97.0^\circ$ .

Из рассмотрения результатов табл. 4 следует, что доза от излучений ГКЛ при наклонении орбиты  $97.0^\circ$  возрастает на 27% доза от протонов РПЗ уменьшается на 17%, доза от электронов РПЗ возрастает почти в шесть раз. Особое внимание при проведении ВКД необходимо обращать на состояние магнитосферы. После магнитных бурь могут происходить высыпания электронов внешнего РПЗ, что может приводить к существенному возрастанию дозовой нагрузки на космонавтов. Так,

в работе [16] Ц. Дачев (*англ.* Dachev Т.Р.) отмечает, что даже на орбите *МКС* при наклонении орбиты в  $51.6^\circ$  средняя мощность поглощенной дозы за защитой  $0.3 \text{ г см}^{-2}$  от электронов при спокойной магнитосфере составляет  $80\text{--}90 \text{ мкГр сут}^{-1}$ . В периоды магнитных возмущений, как например 20–22 марта 2015 г. средняя мощность поглощенной дозы достигала значений  $2700 \text{ мкГр сут}^{-1}$ .

## ВЫВОДЫ

В периоды минимума солнечной активности, когда на Солнце нет пятен и, соответственно, нет СПС, радиационная обстановка на *РОСС* будет практически такой же, как на *МКС*.

В периоды максимума солнечной активности необходимо предусматривать в составе *РОСС* хорошо защищенный отсек, который должен служить космонавтам радиационным убежищем.

При обеспечении радиационной безопасности космонавтов на *РОСС* существенно возрастает роль прогноза как вспышечной активности Солнца, так и магнитосферных возмущений.

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН по теме № 65.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ООКОКП-2021). Методические рекомендации МР ФМБА 17.01-2021 / ГК “Роскосмос”. М.: Науч. кн., 2021. 44 с.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утв. гл. санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко 07.07.2009.
3. Методические указания. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета поглощенной и эквивалентной доз от протонов космических лучей за защитой. М.: Изд. стандартов, 1986. С. 8 РД-50 25645.208.
4. ГОСТ 25645.204. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета экранированности точек внутри фантома. М.: Изд. стандартов, 1984. 30 с.
5. ГОСТ 25645.203. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. М.: 1984. 21 с.
6. Бондаренко В.А., Митрикас В.Г. Модель геометрического фантома человека для расчета тканевых доз в служебном модуле Международной космической станции // Авиакосм. и эколог. медицина. 2007. Т. 39. № 1. С. 34–39.
7. Митрикас В.Г. Модель защищенности обитаемых отсеков служебного модуля международной космической станции для оценки радиационной опасности // Авиакосм. и эколог. медицина. 2006. Т. 38. № 3. С. 41–47.

8. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчета распределения поглощенной и эквивалентной доз космических излучений по толщине материалов на внешней поверхности космического аппарата на орбитах, проходящих через ЕРПЗ. М.: 1991. С. 9 РД 50-25645.216.
9. Методические указания. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета поглощенной и эквивалентной дозы от многозарядных ионов космических лучей. М.: 1986. С. 9 РД-50 25645.208.
10. Митрикас В.Г. Модель радиационных поясов Земли для оценки радиационной опасности на орбите ОПС "Мир" // Косм. исслед. 1999. Т. 37. № 5. С. 1–5.
11. ГОСТ 25645.138. Пояса Земли радиационные естественные. Пространственно-энергетические характеристики потоков протонов. М.: Изд. стандартов. 1986. С. 50
12. ГОСТ 25645.139. Пояса Земли радиационные естественные. Пространственно-энергетические характеристики потока электронов. М.: Изд. стандартов. 1986. С. 163
13. Ковалев Е.Е., Коломенский А.В., Муратова И.А., Петров В.М. Модельные описания дифференциальных спектров галактических космических лучей // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1978. Т. 42. № 5. С. 923–926.
14. Морозова Е.И., Безродных И.П., Семенов В.Т. Радиационные факторы риска для космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 112. С. 35–40.
15. Шафиркин А.В. Изменение парадигмы опасности космических излучений при осуществлении дальних замагнитосферных полетов к Луне и Марсу // Авиакосм. и эколог. медицина. 2020. Т. 54. № 1. С. 5–15.
16. Dachev T.P. Relativistic electron precipitation bands in the outside radiation environment of the international space station // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2017. P. 177. P. 247–256.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.008>