

Проектирование радиационной защиты комплекса научной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли

© Т.Ш. Комбаев¹, М.Е. Артемов², И.В. Зефиоров²

¹Филиал АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»,
г. Калуга, 248000, Россия

²АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»,
г. Химки, 141402, Московская область, Россия

Космические аппараты (КА) в процессе эксплуатации подвергаются воздействию ионизирующих излучений космического пространства. При создании бортовой радиоэлектронной аппаратуры универсальных космических платформ применяемая электронная компонентная база (ЭКБ) по ряду технических и/или экономических причин не всегда соответствует внешним условиям функционирования в части радиационной стойкости для некоторых орбит КА. Одним из методов повышения радиационной стойкости бортовой аппаратуры является установка дополнительной массовой защиты в виде экранов на аппаратуру в целом или локальных экранов на отдельные критичные электрорадиоизделия из ее состава. В статье рассмотрено проектирование дополнительной радиационной защиты комплекса научной аппаратуры геостационарного КА для адаптации к радиационным условиям функционирования на орбитах типа «Молния». Решение поставленной задачи подразумевает несколько предварительных этапов, а именно: определение радиационных условий функционирования КА на целевой орбите, оценка локальных поглощенных доз в местах расположения бортовой аппаратуры, оценка поглощенных доз непосредственно в ЭКБ аппаратуры и анализ радиационной стойкости. При проектировании радиационного комплекса научной аппаратуры, руководствовались значениями радиационной стойкости аппаратуры и ее составных частей, а также расчетными величинами локальных поглощенных доз в ней.

Ключевые слова: радиационная стойкость, радиационная защита, универсальная космическая платформа, ионизирующие излучения, радиационные пояса, солнечные космические лучи, галактические космические лучи, дистанционное зондирование Земли

Введение. Одним из актуальных направлений в области создания автоматических КА является проектирование унифицированных, многофункциональных космических платформ на основе отработанных проектно-конструкторских и технологических решений. Как правило, такие универсальные космические платформы должны функционировать в широком диапазоне внешних радиационных условий, характерных для геостационарных, высокоэллиптических, геосинхронных орбит, а также точек либрации системы Земля—Солнце [1, 2]. Это накладывает жесткие требования к применяемой

ЭКБ по дозовым и одиночным эффектам в части радиационной стойкости. В то же время, согласно государственной программе по импортозамещению, все большее значение приобретает разработка бортовых устройств и приборов КА с использованием отечественной ЭКБ. Однако данная ЭКБ зачастую не соответствует условиям эксплуатации в части радиационной стойкости, что приводит к определенным трудностям при создании универсальных космических платформ. Одним из методов решения этой проблемы является установка массовой защиты в виде дополнительных экранов на бортовую аппаратуру или отдельные электрорадиоизделия из ее состава. Цель данной работы — адаптация комплекса научной аппаратуры геостационарного КА к радиационным условиям функционирования на орбитах типа «Молния».

Постановка задачи. Для достижения поставленной выше цели необходимо решить задачу проектирования дополнительной радиационной защиты комплекса научной аппаратуры.

Начальными условиями задачи являются следующие данные:

- орбитальные параметры полета КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- конструкторская модель, а именно трехмерная модель КА, предназначенная для выпуска рабочей конструкторской документации;
- значения радиационной стойкости электрорадиоизделий из состава комплекса научной аппаратуры.

Для решения необходима декомпозиция исходной задачи на следующие этапы:

- расчет параметров радиационных условий на орбитах КА ДЗЗ типа «Молния»;
- создание расчетной трехмерной модели КА ДЗЗ из конструкторской модели;
- расчет локальных поглощенных доз в местах расположения ЭКБ комплекса научной аппаратуры с использованием расчетной трехмерной модели КА ДЗЗ;
- анализ радиационной стойкости ЭКБ комплекса научной аппаратуры КА на предмет соответствия требуемым дозовым коэффициентам запаса (в соответствии с ОСТ 134-1034–2012);
- проектирование радиационной защиты с использованием метода последовательных итераций и алгоритма визуализации с помощью лучей, наиболее критичных с точки зрения массовой защиты направлений.

Методы, применяемые при проектировании радиационной защиты. За время полета бортовая аппаратура и конструкция КА на основе унифицированных космических платформ подвергаются воздействию следующих источников ионизирующих излучений космического пространства:

протонов и ионов солнечных космических лучей (СКЛ);
протонов и тяжелых ядер галактических космических лучей (ГКЛ);
протонов и электронов радиационных поясов Земли (РПЗ).

Особое влияние на внешние условия функционирования КА в части ионизирующих излучений оказывает расположение орбиты относительно РПЗ. Орбита геостационарных КА располагается во внешнем радиационном поясе, где преобладают электроны РПЗ, представляющие собой области захваченной радиации, которые простираются до высот ~50 000 км. Орбита высокоэллиптических КА ДЗЗ пересекает как внутренний радиационный пояс, характеризующийся наличием протонов высоких энергий, максимум потоков которых приходится на высоты от 1500 до 8000 км, так и внешний электронный пояс, что увеличивает дозовую нагрузку на применяемую ЭКБ. Например, комплекс научной аппаратуры, созданный для работы в составе КА на геостационарной орбите, не всегда будет удовлетворять требованиям по радиационной стойкости при функционировании на высокоэллиптических орбитах и, возможно, придется применять дополнительные меры по защите от космической радиации.

Расчеты параметров внешних радиационных условий функционирования КА проводились с помощью общепринятых в мировой практике моделей АЕ-8 и АР-8 [3] для электронов и протонов РПЗ, динамической модели ГКЛ [4] и вероятностной модели СКЛ [5], также был применен разработанный в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» программный комплекс «FD_ORBIT2» [6].

Расчет поглощенных доз (в Si) за защитами различной толщины, энергетических спектров и спектров линейной передачи энергии потоков заряженных частиц РПЗ, СКЛ и ГКЛ проводился для КА ДЗЗ, совершающего полет по орбите типа «Молния» со сроком активного существования, равным семи лет. Параметры орбиты данного КА приведены ниже:

Параметры орбиты КА ДЗЗ

Высота апогея, км	38868
Высота перигея, км	600–3000
Высота перигея номинальной орбиты, км	1500
Наклонение, град	63
Аргумент перигея, град	267–273

Результаты расчета поглощенных доз представлены в табл. 1: рассчитана зависимость поглощенных доз от электронов и протонов РПЗ, протонов СКЛ и ГКЛ от массовой толщины защиты из алюминия. Поскольку модель СКЛ носит вероятностный характер, то при расчете вклада в поглощенную дозу от заряженных частиц СКЛ

**Поглощенные дозы за сферическими защитными экранами из алюминия
за семь лет срока активного существования КА ДЗЗ**

Толщина защиты, г/см ²	РПЗ, Гр		СКЛ, Гр	ГКЛ, Гр	Суммарная доза, Гр
	электроны	протоны			
0,0100	$5,02 \cdot 10^5$	$2,10 \cdot 10^6$	$1,51 \cdot 10^3$	1,810	$2,60 \cdot 10^6$
0,0316	$2,49 \cdot 10^5$	$3,78 \cdot 10^5$	$7,81 \cdot 10^2$	1,060	$6,28 \cdot 10^5$
0,100	$6,62 \cdot 10^4$	$5,09 \cdot 10^4$	$3,53 \cdot 10^2$	0,807	$1,17 \cdot 10^5$
0,316	$9,84 \cdot 10^3$	$4,70 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^2$	0,722	$1,47 \cdot 10^4$
1,0	$5,70 \cdot 10^2$	$3,58 \cdot 10^2$	29,70	0,723	$9,58 \cdot 10^2$
3,0	8,060	51,50	6,390	0,701	66,70
10,0	3,480	9,30	1,090	0,662	14,50
31,6	0,828	1,16	0,159	0,532	2,68
100	$9,78 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	0,488	0,63

(в соответствии с ОСТ 134-1044–2007-изм. 1) рассматривается случай с вероятностью 0,1. Это означает, что превышение потоков и поглощенных доз за время полета возможно лишь в 10 % случаев.

Для расчета локальных поглощенных доз непосредственно в электрорадиоизделиях бортовой аппаратуры КА применялось программно-математическое обеспечение «LocalDose&SEE» [7]. Этот комплекс программ позволяет рассчитывать локальные поглощенные дозы в местах расположения бортового оборудования и устройств рассматриваемых изделий методом секторирования по компьютерной расчетной трехмерной модели КА. Метод секторирования заключается в том, что пространство вокруг выбранной точки разделяется на конечное число секторов. Сектора представляют собой телесные углы с определенной толщиной защиты, которой соответствует определенное значение поглощенной дозы. Затем проводится суммирование доз по всем заданным секторам. Расчет локальной поглощенной дозы ЛПД от данного вида излучения в точке с координатами (X, Y, Z) осуществляется по формуле

$$\text{ЛПД}(X, Y, Z) = 1/4\pi \sum_i^N D(x_i) \Delta\Omega_i,$$

где суммирование выполняется по всем N направлениям (количество точек на сфере интегрирования, окружающей выбранную точку на изделии); $D(x_i)$ — значение поглощенной дозы за сферическим защитным экраном толщиной x_i ; x_i — суммарная толщина защиты всех элементов конструкции изделия в i -м направлении, г/см²; $\Delta\Omega_i$ — величина телесного угла в i -м направлении (зависит от точности вычислений, т. е. от числа точек на сфере интегрирования).

В работе использовались два варианта трехмерных моделей, существенно отличающихся степенью детализации КА:

- 1) конструкторская трехмерная модель КА — модель КА, предназначенная для выпуска рабочей конструкторской документации на КА;
- 2) расчетная трехмерная модель КА — модель КА, создаваемая на основе конструкторской трехмерной модели КА путем исключения или модификации элементов, узлов и агрегатов, несущественных с точки зрения расчетов радиационных характеристик.

Общий вид расчетной трехмерной модели КА ДЗЗ приведен на рис. 1.

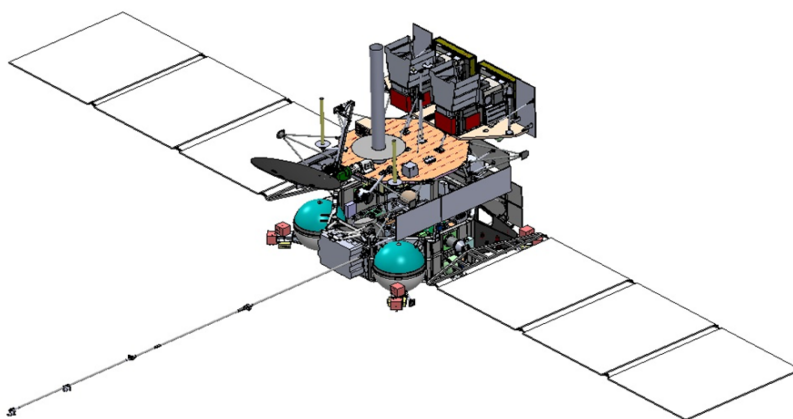


Рис. 1. Общий вид расчетной трехмерной модели КА ДЗЗ

Проектирование радиационной защиты выполнено с помощью программно-математического обеспечения «LocalDose&SEE» методом последовательных итераций.

В составе «LocalDose&SEE» использовался алгоритм, позволяющий визуализировать критичные направления с помощью лучей с заданным диапазоном отображения массовой защиты [8, 9]. Основное внимание при проектировании расположения защитных экранов было уделено наименее защищенным направлениям, выявленным по результатам анализа распределения лучей.

Результаты расчетов и проектирования радиационной защиты.

Локальные поглощенные дозы в заданных критичных точках реального КНА были вычислены с помощью разработанной расчетной трехмерной модели и соответствующего программно-математического обеспечения [10].

После проведения расчета локальных поглощенных доз и анализа радиационной стойкости ЭКБ комплекса научной аппаратуры КА ДЗЗ на предмет соответствия требуемым дозовым коэффициентам

запаса были выявлены отдельные электрорадиоизделия с коэффициентами запаса меньше требуемого. Следовательно, для применения данного комплекса научной аппаратуры на высокоэллиптическом КА ДЗЗ необходима замена критичных электрорадиоизделий на аналоги с большей радиационной стойкостью или установка дополнительной радиационной защиты. Замена критичных электрорадиоизделий предполагает изменение схемотехники уже разработанных приборов, увеличение сроков и стоимости разработки комплекса научной аппаратуры. Исходя из этого было принято решение установить локальную радиационную защиту на часть блоков из состава комплекса научной аппаратуры с целью довести дозовый коэффициент запаса критичных электрорадиоизделий до требуемых значений.

Проектирование радиационной защиты выполнялось методом последовательных приближений. Результат работы алгоритма визуализации направлений расчета толщин защиты представлен на рис. 2.

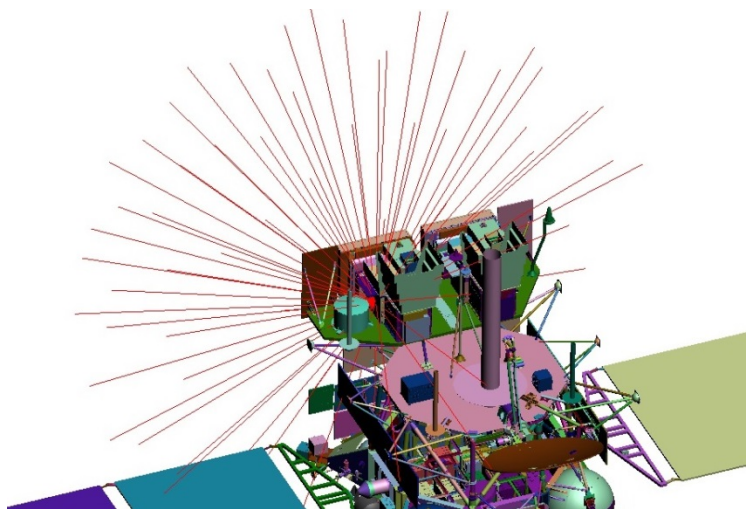


Рис. 2. Визуализация направлений расчета толщин защиты

Для первой итерации в наименее защищенных направлениях помещался защитный экран минимальной толщины. После этого рассчитывались локальные поглощенные дозы и оценивались дозовые коэффициенты запаса в электрорадиоизделиях. Если они не удовлетворяли требуемым значениям, то толщина защитного экрана увеличивалась и процедура повторялась до тех пор, пока дозовые коэффициенты запаса критичных электрорадиоизделий не достигали необходимых значений.

Визуализация наиболее критичных направлений на расчетной модели позволила существенно сократить время на проектирование экранов радиационной защиты с учетом компоновки КА.

Результаты проектирования дополнительной радиационной защиты комплекса научной аппаратуры КА представлены на рис. 3, где экраны радиационной защиты условно показаны красным цветом.

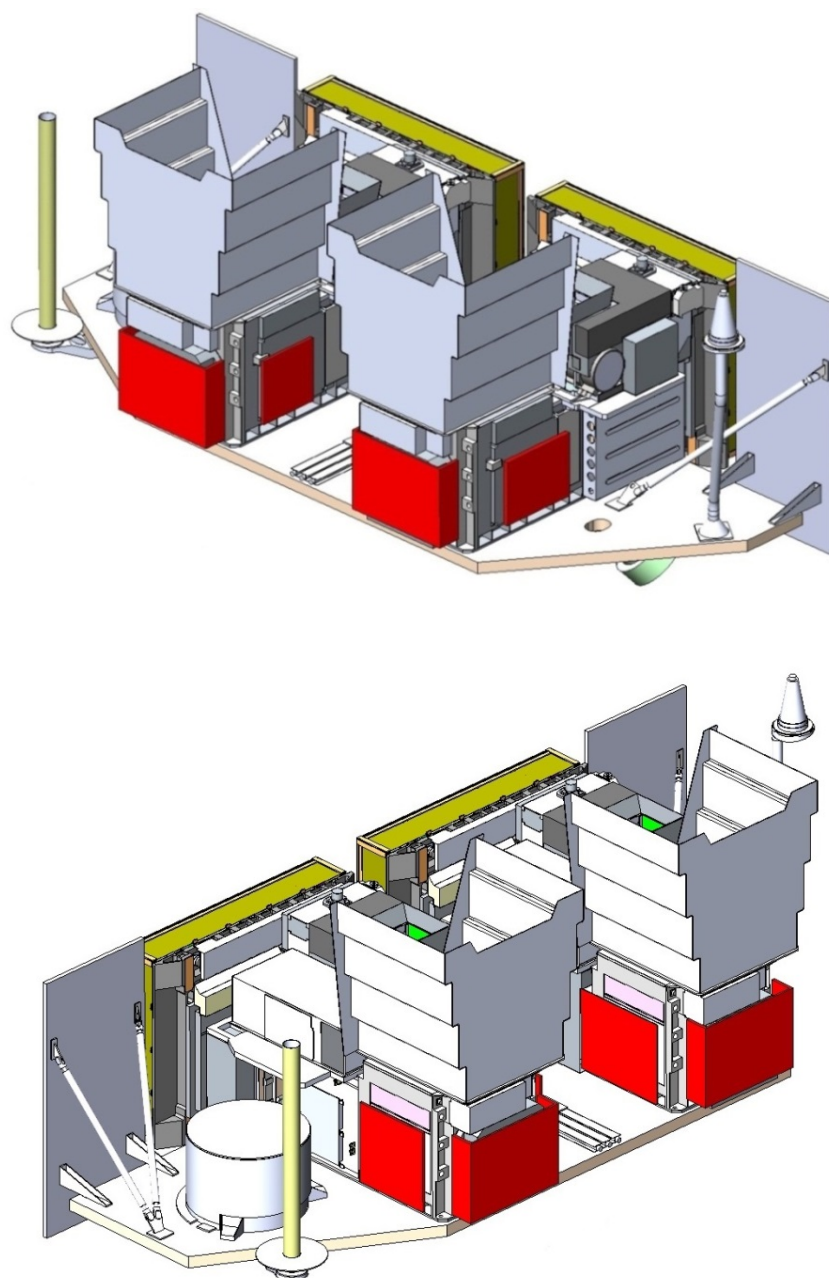


Рис. 3. Размещение дополнительной радиационной защиты на комплексе научной аппаратуры КА

Масса защитных экранов, толщина которых удовлетворяет требуемым значениям дозовых коэффициентов запаса, составила 31 кг. Путем более детального анализа наиболее защищенных направлений и снижения толщины экранов в этих направлениях удалось снизить массу экранов до 11 кг, что составляет 1,5 % массы комплекса научной аппаратуры. Радиационная защита представляет собой алюминиевые листы толщиной от 2 до 3,5 мм вокруг защищаемых блоков научной аппаратуры.

Заключение. Рассмотренный подход позволил успешно сформировать облик дополнительной радиационной защиты. Таким образом, комплекс научной аппаратуры, созданный для геостационарного КА, был успешно адаптирован к радиационным условиям функционирования на эллиптических орбитах типа «Молния» без изменения схемотехники уже разработанных приборов и увеличения сроков и стоимости их разработки.

Масса дополнительной радиационной защиты не превышает 1,5 % массы комплекса научной аппаратуры и составляет 11 кг. Указанная защита представляет собой алюминиевые листы толщиной от 2 до 3,5 мм вокруг блоков комплекса научной аппаратуры.

Следует также отметить, что использование метода итераций существенно увеличивает трудоемкость работы и время проектирования. Такой недостаток может быть компенсирован созданием более эффективного подхода путем решения обратной задачи радиационных расчетов. Эта задача заключается в нахождении пространственной конфигурации внешней радиационной защиты с минимальной массой по значениям радиационной стойкости бортовой аппаратуры или ее составных частей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефанов В.В., составитель. *Многофункциональная космическая платформа «Навигатор»*. С.А. Лемешевский, ред. Химки, Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, 2017, 360 с.
- [2] Ковтун В.С., Королев Б.В., Синявский В.В., Смирнов И.В. Космические системы связи разработки ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва. *Космическая техника и технология*, 2015, № 2 (9), с. 3–24.
- [3] Vette J. *The AE-8 Trapped Electron Model Environment. Report 91–24*. Greenbelt, Maryland, National Space Science Data Center, 1991.
- [4] Kuznetsov N.V., Popova H., Panasyuk M.I. Empirical Model of Long-Time Variations of Galactic Cosmic Ray Particle Fluxes. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2017, vol. 122, issue 2, pp. 1463–1472.
- [5] Nymmik R.A. Probabilistic Model for Fluences and Peak Fluxes of Solar Particles. *Radiation Measurements*, 1999, vol. 30, pp. 287–296.
- [6] Артемов М.Е. *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012618517 «FD_ORBIT2»*, 19.09.2012 г.

- [7] Хамидуллина Н.М., Зефиров И.В. *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2008613789 «LocalDose&SEE»*, 08.08.2008 г.
- [8] Зефиров И.В. Специфика программного комплекса для расчета радиационных характеристик аппаратуры космического аппарата с использованием 3D-моделирования. *Космонавтика и ракетостроение*, 2009, № 4, с. 78–87.
- [9] Зефиров И.В., Комбаев Т.Ш., Черников П.С., Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., Артемов М.Е. Применение технологии САПР для модификации программного комплекса по расчету радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов. *XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 428–429.
- [10] Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефиров И.В. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата. *Космические исследования*, 2006, т. 44, № 2, с. 179–182.

Статья поступила в редакцию 11.02.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комбаев Т.Ш., Артемов М.Е., Зефиров И.В. Проектирование радиационной защиты комплекса научной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 5.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1878>

Комбаев Тимур Шикурович — ведущий конструктор сектора проектирования космических аппаратов филиала АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» г. Калуга. Область деятельности и научные интересы: проектирование космических аппаратов, защита от внешних воздействующих факторов космического пространства. e-mail: kombaew@ya.ru

Артемов Михаил Евгеньевич — канд. техн. наук, ведущий специалист отдела исследования внешних воздействующих факторов и проектирования защиты от них АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». Область деятельности и научные интересы: исследование радиационных условий полета космических аппаратов, моделирование естественных радиационных полей в космическом пространстве. e-mail: mike.artiomov@mail.ru

Зефиров Игорь Владимович — канд. техн. наук, начальник сектора отдела наземного программного обеспечения и аппаратных средств АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». Область деятельности и научные интересы: программирование трехмерной графики, системы оперативной обработки информации. e-mail: zefirov@laspace.ru

Designing radiation protection for the scientific equipment complex of the Earth's remote sensing spacecraft

© T.Sh. Kombaev¹, M.E. Artemov², I.V. Zefirov²

¹Lavochkin Science and Production Association, Kaluga Branch,
Moscow Region, Kaluga town, 248000, Russia

²Lavochkin Science and Production Association, Moscow Region,
Khimki town, 141402, Russia

In the course of operation spacecrafts are exposed to ionizing radiation from outer space. The electronic component base (ECB) used in creating onboard radio-electronic equipment of universal space platforms does not always correspond to the external operating conditions in terms of radiation resistance for some spacecraft orbits due to a number of technical and/or economic reasons. One method to increase the radiation resistance of onboard equipment is to install additional mass protection in the form of screens on the whole equipment or local screens on individual critical radio and electronic components. The article describes the design of additional radiation protection of the geostationary spacecraft scientific equipment complex for adaptation to the radiation conditions of operation in orbits of the "Molniya" type. The solution of the problem involves several preliminary steps, namely: determining the radiation conditions for the spacecraft operation in the target orbit, estimating the local absorbed doses at the locations of the onboard equipment, estimating absorbed doses directly in the electronic component base of the equipment and analyzing the radiation resistance. Designing the radiation complex of scientific equipment was based on the values of the radiation resistance of the equipment and its components, as well as the calculated values of the local absorbed doses in the components.

Keywords: radiation resistance, radiation protection, universal space platform, ionizing radiation, radiation belts, solar cosmic rays, galactic cosmic rays, Earth's remote sensing

REFERENCES

- [1] Efanov V.V. *Mnogofunktsionalnaya kosmicheskaya platforma "Navigator"* [Multifunctional space platform "Navigator"]. Lemeshevsky S.A., ed. Khimki, "NPO S.A. Lavochkin" Publ., 2017, 360 p.
- [2] Kovtun V.S., Korolev B.V., Sinyavsky V.V., Smirnov I.V. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space technique and technologies*, 2015, no. 2 (9), pp. 3–24.
- [3] Vette J. *The AE-8 Trapped Electron Model Environment. Report 91-24*. Greenbelt, Maryland, National Space Science Data Center, 1991.
- [4] Kuznetsov N.V., Popova H., Panasyuk M.I. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2017, vol. 122, no. 2, pp. 1463–1472.
- [5] Nymmik R.A. *Radiation Measurements*, 1999, vol. 30, pp. 287–296.
- [6] Artemov M.E. *FD_ORBIT2*. Certificate of state registration of computer programs No. 2012618517, 19.09.2012. Register of computer programs Publ., 20.12.2012, no. 4.
- [7] Khamidullina N.M., Zefirov I.V. *LocalDose&SEE*. Certificate of state registration of computer programs No. 2008613789, 08.08.2008. Register of computer programs Publ., 20.12.2008, no. 4.
- [8] Zefirov I.V. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2009, no. 4, pp. 78–87.

- [9] Zefirov I.V., Kombaev T.Sh., Chernikov P.S., Vlasenkov E.V., Khamidullina N.M., Artemov M.E. Primenenie tekhnologii SAPR dlya modifikatsii programmno kompleksa po raschetu radiatsionnoy stoykosti apparatury kosmicheskikh apparatov [Using CAD technology to modify the software system for calculating the radiation resistance of spacecraft equipment]. *XLI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyachshennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydaushchikhsya otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov* [Academic readings in cosmonautics dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent domestic scientists — pioneers of space exploration. Abstracts]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, pp. 428–429.
- [10] Pichkhadze K.M., Khamidullina N.M., Zefirov I.V. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2006, vol. 44, no. 2, pp. 179–182.

Kombaev T.Sh., Leading Designer, Spacecraft Design Sector, Lavochkin Science and Production Association, Kaluga Branch. Research interests: spacecraft design, protection from outer space externally acting factors. e-mail: kombaew@ya.ru

Artemov M.E., Cand. Sc. (Eng.), Leading Specialist, Department of Research of Externally Acting Factors and Designing Protection against them, Lavochkin Science and Production Association. Research interests: study of the radiation conditions of spacecraft flights, simulation of natural radiation fields in outer space. e-mail: mike.artimov@mail.ru

Zefirov I.V., Cand. Sc. (Eng.), Head of Sector, Department of Ground Software and Hardware, Lavochkin Science and Production Association. Research interests: programming of three-dimensional graphics, systems of on-line information processing. e-mail: zefirov@laspace.ru