

## РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТЕ КА «ИОНОСФЕРА»

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович  
(ИКИ РАН)С.Г. Казанцев, И.В. Кочетов, В.Т. Семёнов  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Проведена оценка ожидаемых радиационных условий на орбите и внутри КА «Ионосфера». Показано, что поглощённая доза радиации внутри КА «Ионосфера» за 8 лет активного существования аппарата не будет превышать 4 крад.*

*Приведены результаты математического моделирования прохождения протона с энергией  $10^6$  ГэВ и ядра железа с энергией 26 ГэВ через алюминиевую пластину.*

*Из анализа линейной передачи энергии частиц галактических космических лучей и солнечных космических лучей веществу сделан вывод, что одиночные ядра химических элементов от водорода до железа с энергией от нескольких сотен МэВ до нескольких ГэВ на нуклон не представляют существенной угрозы для нормальной работы электронной аппаратуры КА. Из анализа результатов экспериментальных исследований зависимости интенсивности потоков частиц внешнего и внутреннего радиационного пояса Земли от солнечной активности сделан вывод, что наибольшую интенсивность потоков частиц, захваченных в геомагнитном поле, и наибольшую поглощённую дозу радиации от них следует ожидать не в максимуме вспышечной активности Солнца, а на спаде и вблизи минимума вспышечной активности, когда наиболее вероятны мощные рекуррентные высокоскоростные потоки плазмы солнечного ветра.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, космические лучи, радиационные пояса, радиационные условия на орбите.

**Введение**

КА «Ионосфера» разрабатывается в ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Предполагаемый срок активного существования (САС) КА «Ионосфера» 8 лет.

Для расчёта радиационных условий использовались следующие параметры орбиты: высота на экваторе – 820 км; наклонение – 98,68 град; угол восходящего узла – 135 град.

Нижняя граница радиационного пояса Земли (РПЗ) в области геомагнитного экватора начинается на высоте около 1000 км [1]. Большая часть орбиты КА «Ионосфера» находится под радиационным поясом, т. е. в области с низким уровнем радиации. КА попадает в зону повышенной радиации от частиц РПЗ при пролёте аврорального овала и Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии, где наблюдается смещение нижней границы радиационного пояса на более низкие высоты. Основной вклад в поглощённую дозу радиации будут давать высокоэнергичные частицы (электроны, позитроны, протоны, антипротоны и тяжёлые ядра химических элементов) РПЗ в области Южно-Атлантической магнитной аномалии и частицы солнечных космических лучей (СКЛ) в высоких широтах. В отсутствие мощных солнечных вспышек наибольшая частота сбоев электронной аппаратуры и наибольшая вероятность отказа её работы ожидаются при пролёте КА области Южно-Атлантической аномалии. При солнечных вспышках, которые сопровождаются потоками высокоэнергичных частиц СКЛ, увеличение частоты сбоев и вероятности отказов работы электронной аппаратуры ожидаются также и при пролёте КА области высоких широт.

Поглощённая доза радиации определялась по количеству энергии частиц космических лучей, поглощённой в единице массы вещества. Значение дозы рассчитывалось в единицах рад. Единицы измерения дозы: 1 рад = 100 эрг/г; 1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад. Единицы измерения энергии: 1 эВ =  $1,6021 \cdot 10^{-12}$  эрг – это энергия, которую электрон приобретает, пройдя разность потенциалов в 1 В. Соответственно энергия в 1 ГэВ =  $10^3$  МэВ =  $10^6$  кэВ =  $10^9$  эВ.

При прогнозе поглощённых доз радиации учитывались только потоки частицы РПЗ и СКЛ. При определении интенсивности потоков ионизирующих излучений использовались модели пространственного и энергетического распределения частиц радиационных поясов АЕ8 и AP8.

Большая часть САС КА «Ионосфера» приходится на 24-й цикл активности Солнца.

Началом 24-го цикла солнечной активности (СА) считают начало 2009 г., когда было отмечено стабильное нарастание процесса образования пятен на поверхности Солнца. Максимум 24-го цикла СА ожидается в начале 2013 г.

Исходя из опыта наблюдения за предыдущими циклами СА, можно ожидать, что в 2015 – 2019 гг. на спаде СА уменьшится количество солнечных вспышек, но мощность отдельных вспышек может существенно возрасти. Более того, в эти годы ожидается образование большого числа корональных дыр на Солнце, которые являются мощными источниками рекуррентных высокоскоростных потоков солнечной плазмы, способных вызывать геомагнитные бури и

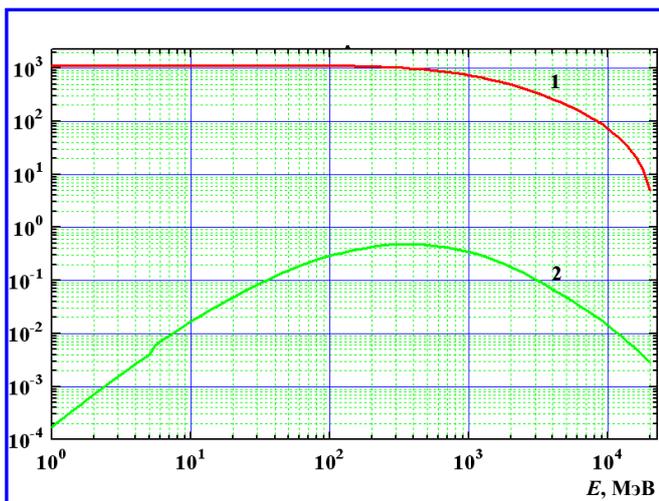


Рис. 1. Интегральный и дифференциальный спектр частиц ГКЛ на орбите КА «Ионосфера»: 1 –  $J$  (частиц/( $m^2 \cdot \text{стер} \cdot e$ )); 2 –  $J$  (частиц/( $m^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{МэВ} \cdot e$ ))

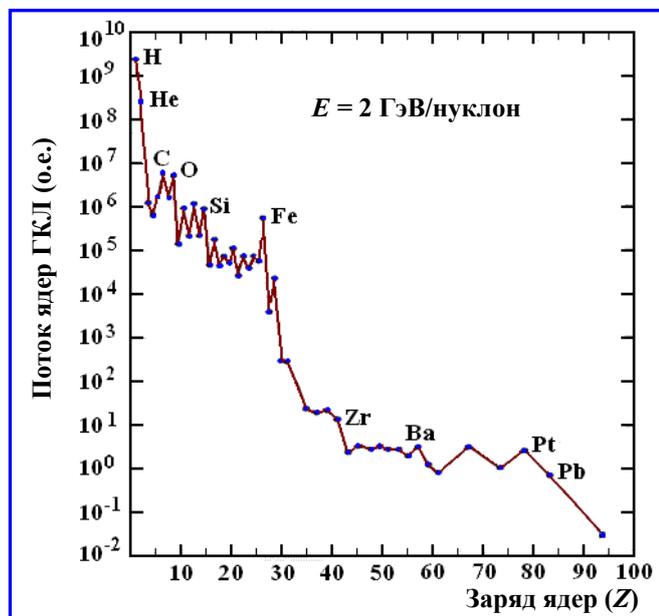


Рис. 2. Химический состав частиц ГКЛ с энергией 2 ГэВ/нуклон

изменять радиационные условия на орбитах КА [2, 3]. Корональные дыры на Солнце – предвестники нового зарождающегося цикла СА, и по ним можно судить о мощности следующего цикла (в нашем случае 25-го).

Предположительно в 2020 г. завершится 24-й цикл, и начнётся 25-й цикл активности Солнца.

#### Галактические космические лучи

Потоки частиц галактических космических лучей (ГКЛ) обычно не учитываются при оценке поглощённых доз радиации для КА на околоземных орбитах, поскольку дозовый эффект от частиц СКЛ и

РПЗ на несколько порядков больше, чем от ГКЛ. Но при оценке вероятности одиночных эффектов (сбоев и отказов электронных устройств) учитывать потоки частиц ГКЛ необходимо, поскольку в состав частиц ГКЛ входят частицы с большой линейной передачей энергии (ЛПЭ) веществу. Описание энергетических спектров ГКЛ дано, например, в [4]. Особенностью ГКЛ является то, что в их состав входят не только лёгкие, но и тяжёлые ядра химических элементов, которые имеют большие значения ЛПЭ и, соответственно, представляют угрозу нормальной работе отдельных электронных компонент аппаратуры КА.

Ещё одна особенность ГКЛ состоит в том, что отдельные частицы ГКЛ могут иметь энергию порядка  $10^{20}$  эВ и более. Источниками таких частиц (если эти частицы протоны, а не ядра тяжёлых химических элементов), вероятно, являются области за пределами нашей Галактики [6]. Радиационной защиты от ионизирующего воздействия потоков таких частиц в космосе не существует. Интенсивность потока частиц ГКЛ сверхвысоких энергий очень мала, но всегда есть небольшая вероятность, которую можно оценить исходя из потоков ГКЛ, что такая частица «столкнётся» с КА и внутри аппарата (если КА достаточно массивный) создаст ливень релятивистских частиц высокой плотности в малом телесном угле с большой суммарной ЛПЭ, и по этой причине может вызвать сбой или отказ работы отдельных электронных компонент аппаратуры КА.

На рис. 1 приведены энергетические спектры частиц ГКЛ для относительно небольших энергий на орбите КА «Ионосфера». Интенсивность потоков таких частиц ГКЛ зависит от СА. При возрастании СА возрастает количество межпланетных ударных волн [5], образование которых связано с выбросами с поверхности Солнца миллионов тонн плазмы с вмороженным в неё магнитным полем. Межпланетные ударные волны действуют как магнитный поршень, частично выталкивая из солнечной системы газы, истекающие из планет и комет, мелкие частицы метеорной пыли и частицы ГКЛ (Форбуш-эффект) относительно небольших энергий.

Энергетические спектры частиц ГКЛ при больших энергиях ранее были приведены в [4].

#### Химический состав и ЛПЭ частиц ГКЛ

На рис. 2 показан в относительных единицах химический состав частиц ГКЛ, имеющих кинетическую энергию 2 ГэВ на нуклон [5]. Кроме

ядер водорода в составе частиц ГКЛ присутствуют стабильные ядра практически всех химических элементов, но в количественном отношении существенно преобладают ядра гелия, углерода, кислорода, неона, магния, кремния и железа.

На рис. 3 приведены расчётные данные линейных потерь энергии частиц ГКЛ в зависимости от их энергии и химического состава этих частиц. Для электронной аппаратуры, несомненно, представляют угрозу частицы с большими значениями ЛПЭ.

Используя данные по спектрам частиц ГКЛ и химическому составу, можно показать, что на 1 м<sup>2</sup> КА «Ионосфера» за 8 лет попадёт около 70 тыс. протонов ГКЛ с энергией более 10<sup>5</sup> ГэВ и около 250 млн. ядер железа с энергией более 26 ГэВ (около 464 МэВ/нуклон). Последствия взаимодействия таких частиц с веществом можно промоделировать, используя соответствующее программное обеспечение.

#### Пакет компьютерных программ, используемый для математического моделирования

Математическое моделирование взаимодействия частиц с веществом пластины из алюминия проводилось с использованием метода Монте-Карло. Для этого использовался пакет компьютерных программ «Mulassis», разработанный на базе библиотеки «GEANT4».

Функциональные возможности пакета «Mulassis» позволяют проводить анализ взаимодействия высокоэнергичных частиц с материалом для двух случаев: многослойной геометрии типа «пластина» и многослойной геометрии типа «сфера».

Для анализа доступны следующие данные:

- поглощённая в конкретном слое ионизационная доза;
- поглощённая в конкретном слое энергия неионизационных взаимодействий;
- потоки первичных и вторичных частиц на границе раздела слоёв как функция энергии или угла.

Программный пакет «Mulassis» выполнен в виде консольного приложения с возможностью ручного ввода команд, либо инициализации файла с записанными командами (в виде ASCII текста).

Через интерфейс программы доступны следующие категории команд:

«/geometry/» – определение геометрии мишени (определяется тип геометрии (сфера, пластина), количество, материал, толщина и цвет слоёв);

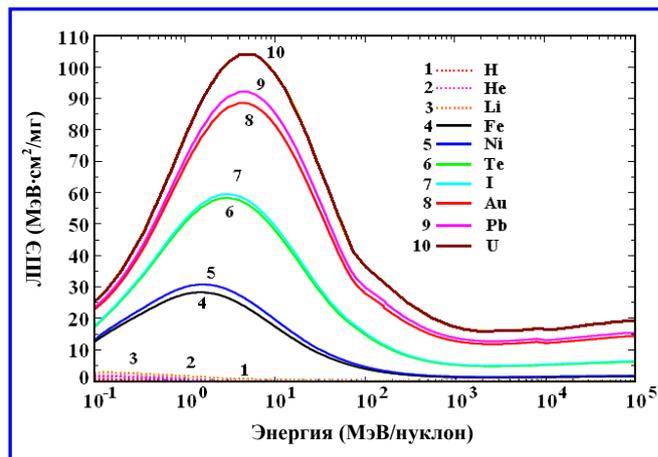


Рис. 3. Линейные потери энергии частиц ГКЛ в зависимости от их энергии и химического состава (автор J. Barth, 1997, IEEE NSREC SHORT COURSE, Colorado)

«/gps/» – настройка параметров источника частиц (определяется геометрия источника, расположение источника, тип испускаемых частиц и их энергетические характеристики);

«/phys/» – определение моделей взаимодействий частиц (доступно несколько сценариев с разными комбинациями подключённых процессов);

«/analysis/» – настройка типов анализа и выходных данных (определяются необходимые виды анализа, параметры анализа, имя и расположение файлов для вывода). Вывод производится в файл формата CSV (выводятся подробные данные по проведённым вычислениям) и в файл формата RPT (краткое описание проведённых вычислений);

«/control/execute/.mag выполнить» – управление работой программы;

«/event/» – настройка вывода текстовых сообщений на экран;

«/vis/» – настройка графического вывода информации. Возможен вывод геометрии мишени и треков частиц в реальном времени с помощью одного из указанных рендеров (OpenGL, DAWN), либо вывод изображения в графический файл (PostScript, JPEG, GIF, VRML).

#### Результаты моделирования прохождения протона ГКЛ через алюминиевую пластину

Результаты моделирования прохождения через алюминиевую пластину ( $d = 34$  мм) одного протона ГКЛ показаны на рис. 4. Протон (линия синего цвета) с энергией 10<sup>5</sup> ГэВ пересекает пластину слева направо. Спектр вторичных частиц, образованных при взаимодействии протона с пластиной, показан на рис. 5. Для оптимизации расчётов трёхмерное виртуальное пространство, в котором проводилась процедура математического моделирования, было ограничено кубом.

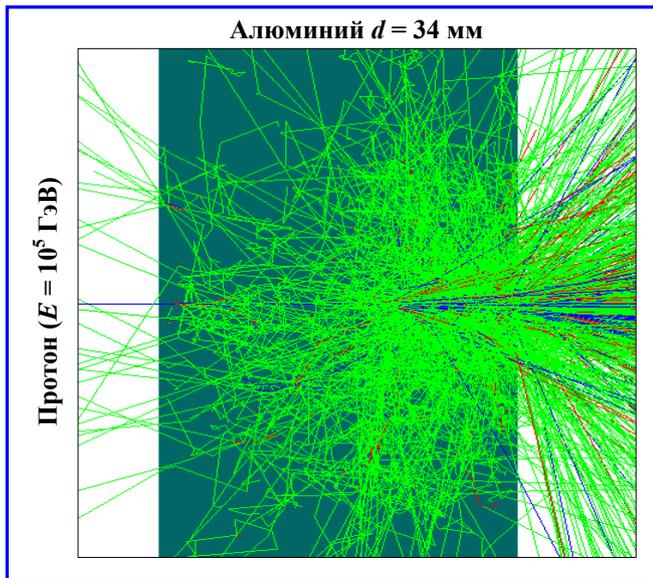


Рис. 4. Результаты моделирования прохождения одного протона ГКЛ с энергией  $10^5$  ГэВ через алюминиевую пластину толщиной 34 мм (синий цвет – первичный и вторичные протоны; зелёный – кванты тормозного излучения; красный – вторичные электроны)

В этом виртуальном пространстве, внутри куба, помещалась мишень в виде пластины, на которую падала частица ГКЛ. Все траектории и взаимодействие частиц рассчитывались только в том случае, если они находились в пределе куба. За пределами куба траектории частиц обрывались. Для представления результатов расчёта куб со всеми траекториями частиц проецировался на плоскость. По этой причине мы видим на рис. 4 события, в которых траектории частиц за пределами пластины (в вакууме) внезапно обрываются.

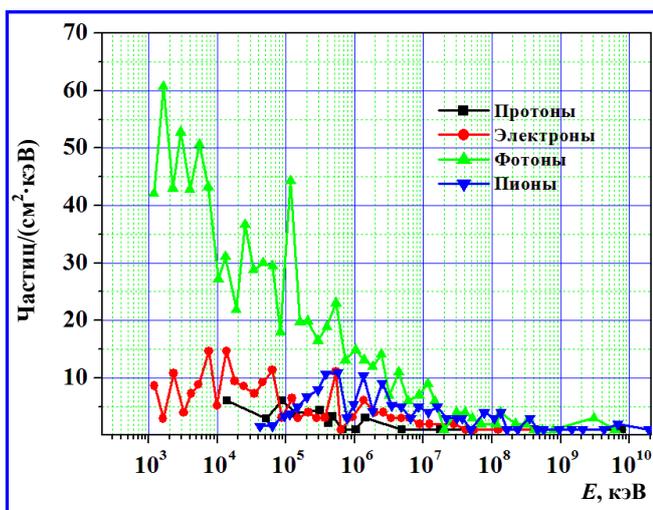


Рис. 5. Дифференциальные энергетические спектры вторичных частиц, образованных при прохождении одного протона ГКЛ ( $E = 10^5$  ГэВ) через алюминиевую пластину

Это является следствием выхода частиц через боковые стенки куба (за пределы области, для которой проводились расчёты).

На рис. 4 показано, что протон ГКЛ около 20 мм двигался через пластину почти без существенных потерь энергии, затем он столкнулся с ядром атома алюминия. Обратим внимание на то, что этот процесс статистический, и столкновение могло произойти в любой точке траектории протона.

В результате ядерной реакции образовался поток вторичных протонов и  $\pi$ -мезонов, а также многих других частиц, которые мы не учитывали. Распады  $\pi$ -мезонов дали начало ливню частиц из электронов, позитронов и фотонов.

#### Результаты моделирования прохождения ядра железа ГКЛ через алюминиевую пластину

Результаты моделирования прохождения через алюминиевую пластину одного ядра железа ГКЛ показаны на рис. 6. Ядро железа так же, как и протон, пересекает пластину слева направо. Начальная энергия ядра 26 ГэВ, из пластины ядро вылетело с энергией менее 23 ГэВ. При движении через пластину в начале пути среднее значение ЛПЭ ядра составляло величину около  $1,52 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ , в конце пластины, из-за уменьшения скорости ядра, величина ЛПЭ увеличилась до  $1,6 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ .

#### Обсуждение результатов моделирования прохождения протона ГКЛ через вещество

В 1960-х гг. академик Д.И. Блохинцев утверждал, что для рождения Вселенной достаточно столкновения всего лишь двух любых элементарных частиц с соответствующей кинетической энергией. В нашем случае будут рассматриваться частицы ГКЛ существенно меньших энергий. При взаимодействии частиц ГКЛ с энергией  $10^5$  ГэВ и более вновь рождённых частиц и античастиц может быть достаточно много, чтобы создать в веществе высокую суммарную плотность ионизации. При энергиях частиц ГКЛ более  $10^5$  ГэВ могут рождаться фотоны (бозоны), шесть различных видов лептонов (электроны, тяжёлые электроны (мюоны, более чем в 200 раз тяжелее электрона), очень тяжёлые электроны ( $\tau$ -лептоны, более чем в 3500 раз тяжелее электрона), три типа нейтрино) и им соответствующие античастицы. Кроме фотонов и лептонов в актах взаимодействия могут образоваться несколько сотен различных видов сильновзаимодействующих частиц – адронов (барионы + мезоны) и им соответствующие античастицы. Три самых лёгких мезона обычно называют пионами ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ -мезоны). Два самых лёгких бариона (протон,

нейтрон) и их античастицы называют нуклонами. В конечных продуктах распада заряженных мезонов всегда имеются заряженные лептоны. Распады тяжёлых лептонов (мюонов,  $\tau$ -лептонов) и их античастиц всегда заканчиваются образованием электронов и позитронов.

Необходимо обратить внимание на большую проникающую способность заряженных тяжёлых лептонов. Заряженная частица для увеличения скорости потери своей кинетической энергии должна обладать хотя бы одним из двух дополнительных свойств: она должна иметь небольшую массу, например такую как у электрона, для того чтобы эффективно отдавать свою энергию на генерацию тормозного излучения [8], или она должна обладать способностью участвовать в ядерных взаимодействиях, например как адроны, и эффективно терять свою энергию при взаимодействии с частицами ядер атомов вещества. Отсутствие этих двух свойств у тяжёлых лептонов объясняет их большую проникающую способность. Проникающая способность, например, мюонов высоких энергий в тысячи раз больше, чем электронов. Мюоны высоких энергий способны преодолевать радиационную защиту из стали толщиной в сотню метров и при этом ионизировать вещество по всей траектории своего движения. Ионизационные потери у электрона и мюона почти одинаковы, но в отличие от электрона у мюона из-за большой массы подавлено тормозное излучение [8].

При распространении барионов через вещество может сформироваться ливень из радиоактивных частиц (адронов), и вследствие распада мезонов сформироваться электронно-фотонный ливень частиц [4]. Зарождение этих ливней на глубине более 20 мм алюминия мы и наблюдаем на рис. 4. При моделировании прохождения протона с энергией  $10^5$  ГэВ через алюминиевую пластину из всего многообразия вторичных частиц отслеживались только протоны, электроны, фотоны и пионы, энергетические спектры которых приведены на рис. 5. С увеличением энергии первичной частицы нарастает и число вторичных частиц. Например при энергии первичной частицы ГКЛ более  $10^{10}$  ГэВ суммарное число образованных вторичных частиц и античастиц в ливне может быть уже более нескольких миллиардов. При столкновении даже одного протона ГКЛ высоких и сверхвысоких энергий с ядром атома кремния (или атома любого другого вещества) может произойти разрушительное событие, нечто вроде микровзрыва, последствие которого для отдельного электронного компонента прибора, в котором произошло это событие, может быть не предсказуемо. Важно отметить, что эти события могут произойти даже в очень хорошо защи-

щённом от радиации блоке аппаратуры. Рождённые в ливне античастицы, например позитроны, при дальнейшем распространении участвуют в ионизации вещества и генерации тормозного излучения. При взаимодействии с электронами позитроны вместе с электронами могут аннигилировать («превращаться»), например, в пары адронов или в пары тяжёлых лептонов, если кинетическая энергия позитронов не велика, то в пары фотонов.

#### Обсуждение результатов моделирования прохождения ядра железа ГКЛ через вещество

Из результатов моделирования прохождения ядра железа с энергией 26 ГэВ через алюминиевую пластину толщиной 8 мм, следует, что оно легко преодолевает эту радиационную защиту. С уменьшением энергии ядра плотность ионизации по его следу нарастает, и при энергиях около нескольких десятков МэВ линейные потери энергии ядра в веществе достигнут значений, которые будут представлять угрозу для нормальной работы электронных компонент аппаратуры, через которые пройдёт это ядро.

Ядро железа, двигаясь через вещество, создаёт высокие плотности ионизации только тогда, когда его энергия достаточно мала (от нескольких сотен кэВ до нескольких десятков МэВ, см. рис. 2), или когда его энергия очень велика (более нескольких сотен миллионов МэВ), т. е. тогда, когда оно способно создать в веществе ливень с большим количеством вторичных заряженных частиц, распространяющихся в малом телесном угле.

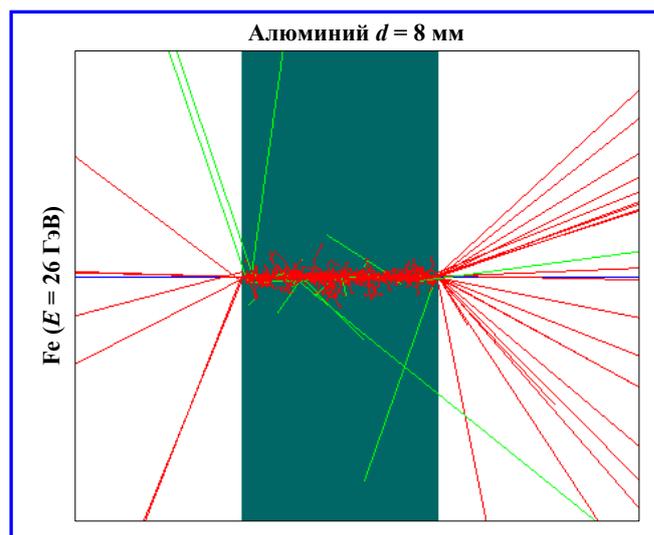
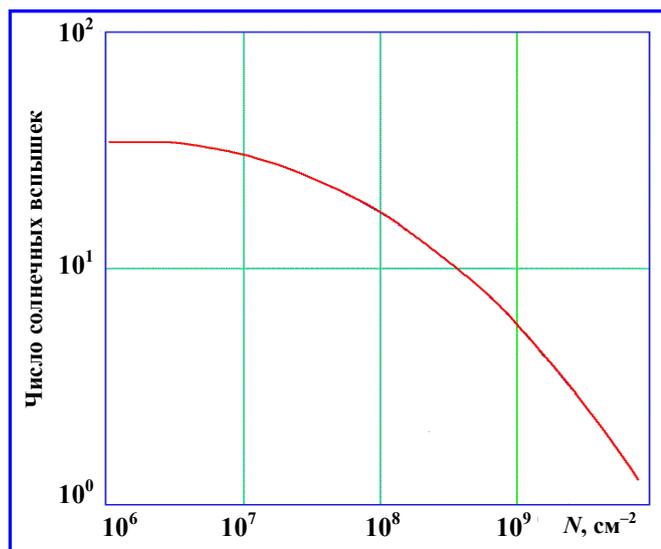


Рис. 6. Результаты моделирования прохождения одного ядра железа ГКЛ с энергией 26 ГэВ через алюминиевую пластину толщиной 8 мм (синий цвет – ядро железа и вторичные протоны; зелёный – кванты тормозного излучения; красный – вторичные электроны)



**Рис. 7. Верхняя оценка величины зависимости числа солнечных вспышек в 24-м цикле СА от количества протонов СКЛ с  $E > 30$  МэВ вблизи орбиты Земли**

Более тяжёлые ядра ГКЛ, например, золота, свинца, урана, из-за очень больших значений ЛПЭ представляют более серьёзную угрозу для нормальной работы электронных элементов аппаратуры КА, чем ядро железа.

Обычно сбои и отказы в электронной аппаратуре КА связаны с выделением энергии частиц космических лучей в чувствительных объёмах электронной компонентной базы. Энергия, которая выделяется в полупроводниковом материале  $\Delta E$ , зависит от ЛПЭ и длины пробега  $\Delta X$  частицы в чувствительном объёме полупроводника:

$$\Delta E = \text{ЛПЭ} \cdot \Delta X.$$

Чем больше значения ЛПЭ, тем больше энергии выделяется в полупроводниковом элементе и тем больше вероятность сбоя или отказа в процессе его работы.

При ЛПЭ около  $1,5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ , как и у ядра железа с энергией 26 ГэВ, уже могут наблюдаться сбои в работах некоторых микропроцессоров, но отказы (неустраняемые сбои) возможны лишь при ЛПЭ, значения которых существенно больше  $3,0 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ . При ЛПЭ больше  $10 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$  возможны сбои и отказы в работе интегральных схем логики, элементов формирователей команд, шифраторов, дешифраторов, триггеров и т. д.

#### Солнечные космические лучи

Если между интенсивностью потоков частиц ГКЛ и СА наблюдается антикорреляция,

то между потоками частиц СКЛ и СА – корреляция. Количество солнечных вспышек за цикл СА составляет величину порядка нескольких десятков тысяч. В максимуме СА вспышки могут происходить с интервалом менее двух часов [9]. В области вспышки температура плазмы может достигать миллиарда градусов Кельвина. Как и в предыдущих циклах, в 24-м цикле СА большинство солнечных вспышек будут сопровождаться потоками частиц СКЛ с энергиями менее 1 МэВ. В максимуме активности Солнца (в конце 2012 и в начале 2013 гг.) в среднем ожидается одна вспышка в неделю с потоками частиц СКЛ, максимальная энергия которых для ядер химических элементов может достигать 10 МэВ/нуклон и для электронов – 1 МэВ. Однако один раз в месяц могут быть вспышки, максимальная энергия частиц СКЛ в которых может достигать 100 МэВ/нуклон для ядер и около нескольких МэВ для электронов. Один раз в год, возможно, будут вспышки, максимальные энергии частиц СКЛ в которых могут достигать 1 ГэВ/нуклон для ядер и несколько десятков МэВ для электронов. За весь 11-летний цикл СА число сверхмощных солнечных вспышек, в которых максимальная энергия частиц СКЛ может достигать 10 ГэВ/нуклон для ядер и 100 МэВ для электронов, не должно быть более трёх. Внутри сферы из алюминия толщиной около 4 мм на орбите КА «Ионосфера» поглощённая доза радиации от одной такой вспышки может составить величину около нескольких сот рад. Прогноз СА обычно делается по результатам анализа данных наблюдений за СА в предыдущие циклы [10]. Анализ результатов экспериментальных исследований количества солнечных вспышек с энергиями протонов более 30 МэВ для 19-го и 20-го цикла выполнен в [11]. Есть основания предполагать, что из-за запаздывания начала 24-го цикла СА, в нём не следует ожидать слишком большого числа солнечных вспышек. Число солнечных вспышек в этом цикле, вероятно, не превысит числа вспышек, наблюдаемых в 19-м цикле активности Солнца. Исходя из этого предположения и данных, представленных в [11], можно предположить, что число солнечных вспышек в 24-м цикле СА с определённым количеством протонов СКЛ с  $E > 30$  МэВ во вспышке вблизи орбиты Земли не превысит значений, приведённых на рис. 7.

Анализ экспериментальных исследований потоков СКЛ в магнитосфере Земли на спаде 23-го цикла СА был выполнен в [12]. Используя результаты этого анализа, можно оценить область геомагнитных широт, до которых могут проникать протоны СКЛ.

На рис. 8 видно, что на широте более 50 град протоны СКЛ с энергией около 100 МэВ на ночной стороне магнитосферы почти беспрепятственно могут достигать орбиты КА «Ионосфера».

### Ожидаемые интегральные и дифференциальные спектры частиц СКЛ

На рис. 9 показаны ожидаемые энергетические спектры частиц СКЛ в солнечном ветре и на орбите КА «Ионосфера».

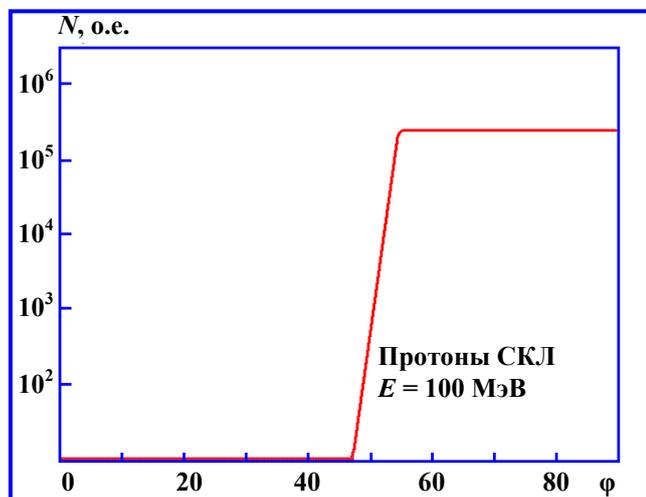


Рис. 8. Ожидаемая зависимость интенсивности потока протонов СКЛ от геомагнитной широты на высоте около 820 км на ночной стороне магнитосферы

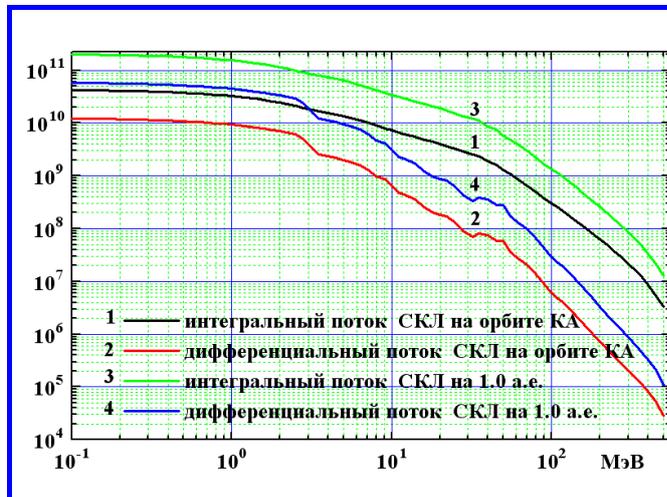


Рис. 9. Ожидаемые интегральные и дифференциальные потоки частиц СКЛ на орбите КА «Ионосфера» и в межпланетной среде за 8 лет: 1, 3 –  $J$  (частиц/см<sup>2</sup>); 2, 4 –  $J$  (частиц/(см<sup>2</sup>·МэВ))

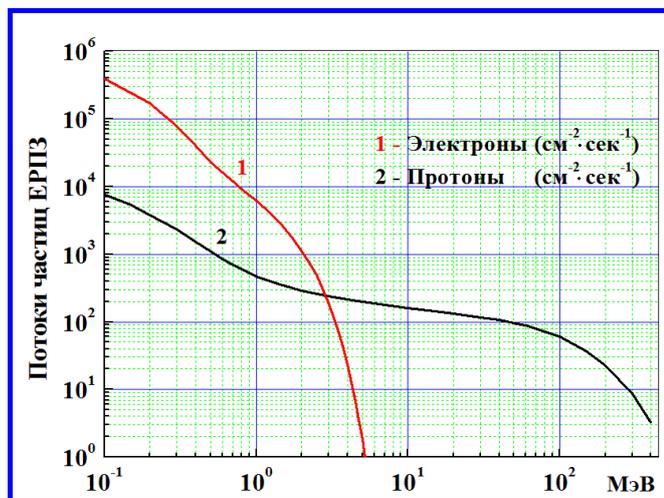


Рис. 10. Ожидаемая интенсивность интегрального потока частиц РПЗ на орбите КА «Ионосфера»

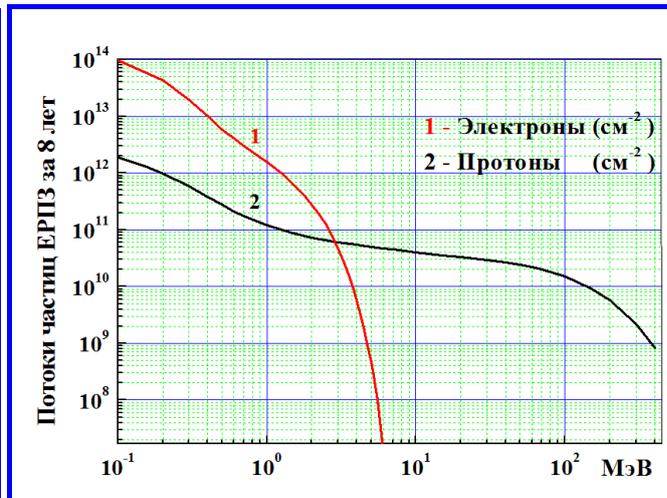


Рис. 11. Ожидаемый суммарный поток частиц РПЗ на орбите КА «Ионосфера» за 8 лет

Следовательно, наименьшие значения мощности дозы радиации от частиц внешнего РПЗ следует ожидать в период максимума СА, и, напротив, в период спада СА (при наличии рекуррентных потоков скорости солнечного ветра) следует ожидать максимальных значений мощности радиационной дозы от частиц РПЗ. Данные экспериментальные резуль-

таты дают основание предполагать, что зависимость потоков протонов во внутреннем РПЗ от СА будет такая же, как и для релятивистских электронов внешнего РПЗ. В максимуме СА потоков протонов во внутреннем РПЗ, например в области Южно-Атлантической аномалии, может быть существенно меньше, чем в минимуме СА [15].

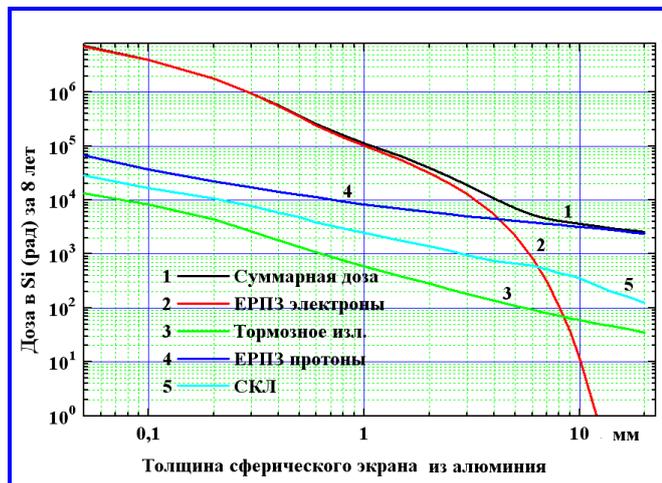


Рис. 12. Ожидаемое значение поглощённой дозы радиации за 8 лет на орбите КА «Ионосфера» в центре сферы, толщина сферического экрана дана в логарифмическом масштабе

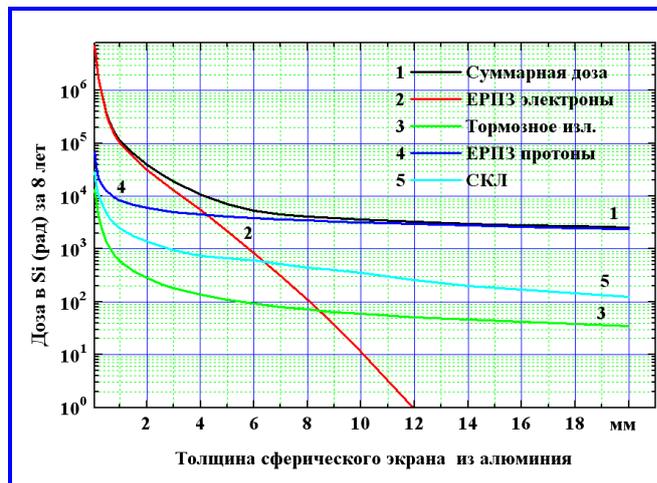


Рис. 13. Ожидаемое значение поглощённой дозы радиации за 8 лет на орбите КА «Ионосфера» в центре сферы, толщина сферического экрана дана в линейном масштабе

**Поглощённые дозы радиации на орбите КА «Ионосфера» за 8 лет внутри сферы из алюминия\***

Al, толщина сферы (мм)	Al, толщина сферы (г/см <sup>2</sup> )	Суммарная доза (рад)	Электроны РПЗ	Тормозное излучение	Протоны	
					РПЗ	СКЛ
0,050	0,014	7,225E+06	7,115E+06	1,359E+04	6,780E+04	2,866E+04
0,100	0,027	4,033E+06	3,971E+06	8,251E+03	3,720E+04	1,684E+04
0,200	0,054	1,817E+06	1,780E+06	4,332E+03	2,191E+04	1,076E+04
0,300	0,081	9,641E+05	9,367E+05	2,674E+03	1,699E+04	7,710E+03
0,400	0,108	5,723E+05	5,504E+05	1,827E+03	1,425E+04	5,828E+03
0,500	0,135	3,708E+05	3,522E+05	1,354E+03	1,250E+04	4,761E+03
0,600	0,162	2,612E+05	2,449E+05	1,067E+03	1,123E+04	3,914E+03
0,800	0,216	1,602E+05	1,470E+05	7,487E+02	9,439E+03	2,999E+03
1,000	0,270	1,141E+05	1,027E+05	5,815E+02	8,322E+03	2,502E+03
1,500	0,405	6,250E+04	5,356E+04	3,787E+02	6,829E+03	1,742E+03
2,000	0,540	3,987E+04	3,221E+04	2,805E+02	5,985E+03	1,395E+03
2,500	0,675	2,710E+04	2,027E+04	2,217E+02	5,436E+03	1,166E+03
3,000	0,810	1,913E+04	1,294E+04	1,835E+02	5,040E+03	9,716E+02
4,000	1,080	1,081E+04	5,432E+03	1,373E+02	4,495E+03	7,452E+02
5,000	1,350	7,106E+03	2,210E+03	1,101E+02	4,123E+03	6,629E+02
6,000	1,620	5,421E+03	8,450E+02	9,254E+01	3,873E+03	6,106E+02
7,000	1,890	4,571E+03	3,115E+02	8,031E+01	3,655E+03	5,244E+02
8,000	2,160	4,104E+03	1,097E+02	7,132E+01	3,475E+03	4,481E+02
9,000	2,430	3,838E+03	3,670E+01	6,457E+01	3,335E+03	4,019E+02
10,000	2,700	3,618E+03	1,165E+01	5,929E+01	3,191E+03	3,557E+02
12,000	3,240	3,287E+03	9,189E-01	5,146E+01	2,974E+03	2,608E+02
14,000	3,780	3,030E+03	2,446E-02	4,593E+01	2,782E+03	2,019E+02
16,000	4,320	2,841E+03	1,876E-04	4,172E+01	2,628E+03	1,715E+02
18,000	4,860	2,689E+03	2,067E-06	3,820E+01	2,503E+03	1,474E+02
20,000	5,400	2,532E+03	0,000E+00	3,524E+01	2,372E+03	1,241E+02

\* Поглощающее вещество – кремний

### Ожидаемые радиационные условия на орбите КА «Ионосфера»

На рис. 10, 11 приведены результаты расчётов ожидаемых энергетических спектров электронов и протонов на орбите КА «Ионосфера».

На рис. 12 и 13 приведены в графическом виде результаты оценки поглощённых доз радиации на орбите КА «Ионосфера» за 8 лет в центре сферы из алюминия, поглощающее вещество кремний.

В таблице приведены рассчитанные поглощённые дозы радиации в единицах радиан за весь срок активного существования КА.

### Выводы

Учитывая, что стенки корпуса КА «Ионосфера» имеют толщины от 8 мм и более, можно утверждать, что суммарная поглощённая доза радиации для аппаратуры внутри КА «Ионосфера» за весь срок активного существования КА не будет превышать 4 крад.

Из анализа значений ЛПЭ частиц ГКЛ и СКЛ следует, что одиночные ядра химических элементов от водорода до железа с энергией от тысячи МэВ до нескольких ГэВ на нуклон не представляют существенной угрозы для нормальной работы электронной аппаратуры КА.

Из данных по энергетическому спектру частиц ГКЛ с энергией около  $10^5$  ГэВ на нуклон и результатов математического моделирования прохождения таких частиц через вещество следует, что на  $1 \text{ м}^2$  КА за 1 год будет попадать около нескольких тысяч частиц ГКЛ, способных при взаимодействии с веществом КА создать внутри КА ливни вторичных заряженных частиц с высоким суммарным значением ЛПЭ, при этом пробег в веществе некоторых вторичных заряженных частиц (тяжёлых лептонов) может быть настолько большим, что создать радиационную защиту от них практически невозможно.

Из результатов расчёта поглощённой дозы радиации на орбите КА «Ионосфера» определено, что полная доза радиации складывается из поглощённой дозы от частиц РПЗ при пролёте КА «Ионосфера» через область Южно-Атлантической магнитной аномалии (с географическими координатами от 0 до 50 град южной широты и от 0 до 100 град западной долготы) и в периоды мощных солнечных вспышек из поглощённой дозы от частиц СКЛ при движении КА на широтах более 50 град.

Из анализа результатов экспериментальных исследований зависимости интенсивности потоков частиц внешнего и внутреннего РПЗ от СА,

сделан вывод, что наибольшую интенсивность потоков частиц, захваченных в геомагнитном поле, и наибольшую поглощённую дозу радиации от них, следует ожидать не в максимуме вспышечной активности Солнца, а на спаде и вблизи минимума вспышечной активности, когда наиболее вероятны мощные рекуррентные высокоскоростные потоки плазмы солнечного ветра.

### Литература

1. Радиационные пояса Земли / С. Н. Кузнецов, Л. В. Тверская // Модель космоса. – М. : Книжный дом университета, 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546.
2. Радиационные условия на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 33 – 42.
3. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности / И. П. Безродных, С. Г. Казанцев, В. Т. Семёнов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 116. – № 3. – С. 23 – 26.
4. Ливни релятивистских частиц внутри космических аппаратов типа «Метеор» / И. П. Безродных, В. Т. Семёнов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 27 – 32.
5. Medwadt R. A. Elemental Composition and Energy Spectra of Galactic Rays / R. A. Medwadt // Proc. From Conference on Interplanetary Particle Environment, JPL Publication 88 – 28. – Pasadena, 1988. – P. 121 – 132.
6. Безродных И. П. Оценка верхней границы энергии частицы, ускоренной вблизи вращающейся нейтронной звезды / И. П. Безродных // Высокоэнергичные частицы в космосе. – Новосибирск : Наука, 1981. – С. 67 – 69.
7. Структура и динамика межпланетных ударных волн и их влияние на радиационные условия на орбитах космических аппаратов / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, С. Г. Казанцев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119. – № 6. – С. 15 – 24.
8. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 37 – 44.
9. Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике Коронас-Ф / под ред. В. Д. Кузнецова. – М. : Физматлит, 2009. – 488 с.
10. Оль А. И. Прогноз солнечной активности и геомагнитной активности в цикле № 21 / А. И. Оль // Солнечные данные. – Л. : Пулковская обсерватория, 1977. – № 12. – С. 87 – 89.

11. Сладкова А. И. Изучение радиационной обстановки в космическом пространстве на спутниках серии «Прогноз» : дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. И. Сладкова. – М., 1978.
12. Верификация моделей магнитного поля по измерениям протонов СКЛ в магнитосфере / Л. Л. Лазутин, Е. А. Муравьева, К. Кудела [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2011. – Т. 51. – № 2. – С. 202 – 213.
13. О связи долгопериодических вариаций электронов во внешнем радиационном поясе Земли с параметрами солнечного ветра / И. П. Безродных, Ю. Г. Шафер // Космические исследования. – 1982. – Т. 20. – Вып. 4. – С. 639 – 641.
14. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью / И. П. Безродных, Ю. Г. Шафер // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1983. – Т. 47. – № 9. – С. 1684 – 1686.
15. Космическая физика в НИИЯФ МГУ / М. И. Панасюк // В кн. Энциклопедия Московского университета; Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына. – М.: Библион – Русская книга, 2006. – 352 с.

Поступила в редакцию 28.09.2011

**Иннокентий Петрович Безродных**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,  
т. (495) 333-20-00, (495) 366-38-38.

**Евгения Ивановна Морозова**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 333-20-00.

**Анатолий Алексеевич Петрукович**, д-р физ.-мат. наук, завотделом, т. (495) 333-32-67.

**Сергей Геннадьевич Казанцев**, д-р техн. наук, заместитель генерального директора –  
генерального конструктора, т. (495) 366-12-01.

**Илья Владимирович Кочетов**, инженер, т. (495) 366-38-38.

**Владимир Тимофеевич Семёнов**, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38.

E-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru)