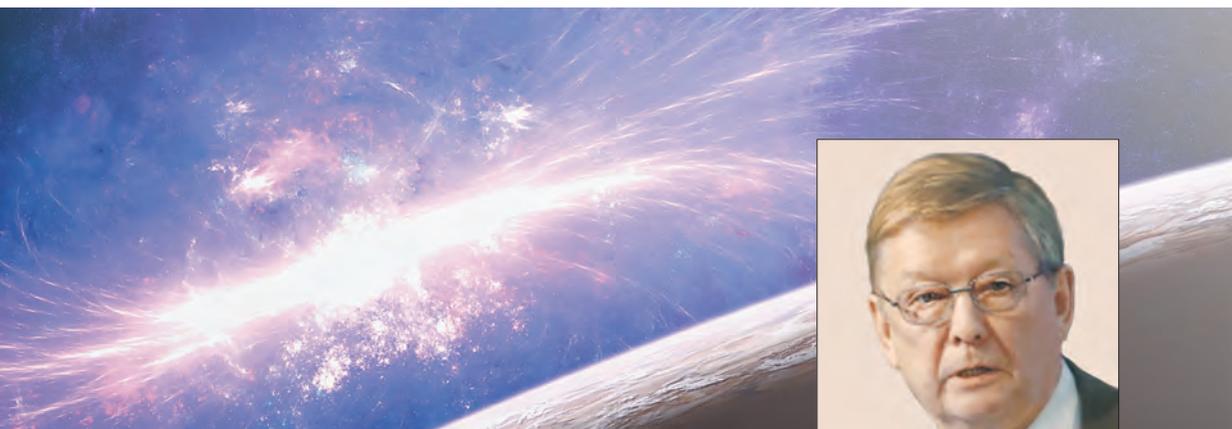


ТЯЖЕЛЫЕ ЯДРА КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ И ПЛАНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ



М.И. ПАНАСЮК,

доктор физико-математических наук
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова

DOI: 10.7868/S00044394819020014

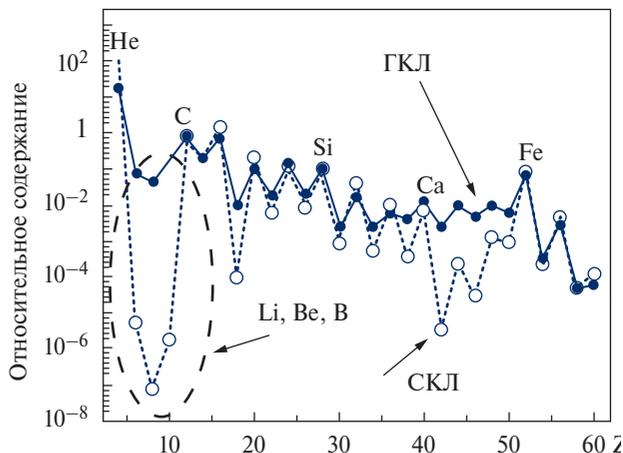
Космические лучи – энергичные заряженные частицы – представлены в природе практически всей Периодической таблицей Д.И. Менделеева. Ядер космических лучей тяжелее водорода мало, но они, как оказалось, играют большую роль в оценках радиационного риска для космических полетов, поскольку их присутствие значительно его увеличивает. Учет их воздействия важен как для электроники космических аппаратов, так и для биологических структур, находящихся на их борту. Именно поэтому изучение тяжелых ядер исключительно важно при планировании космических миссий.

ТЯЖЕЛЫЕ ЯДРА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Наша Вселенная устроена таким образом, что количество тяжелых элементов значительно меньше, чем легких; такое соотношение характерно и для

космической радиации (ЗиВ, 2006, № 3). В составе галактических космических лучей (ГКЛ) 85% составляют протоны, или ядра водорода (с атомным номером $Z = 1$) с энергиями более десятков–сотен МэВ, ядер гелия ($Z = 2$) всего 14%, а ядер с $Z > 3$ и того

График распространенности элементов (атомных ядер) тяжелее водорода в галактических и солнечных космических лучах, демонстрирующий их схожесть, за исключением ядер лития (Li), бериллия (Be) и бора B – отмечено овалом (данные спутника ACE http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html)



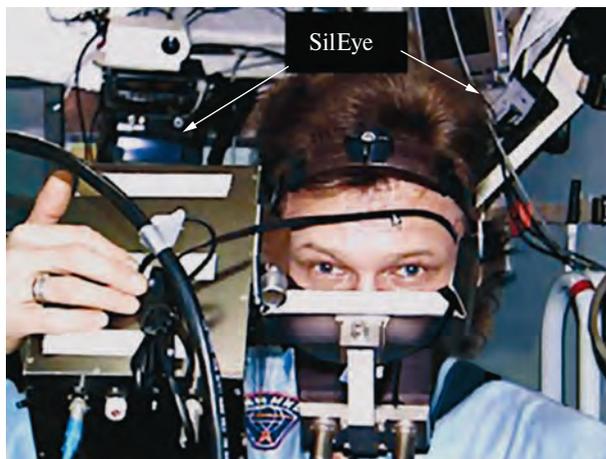
меньше – всего около 1%. Примерно такая же пропорция между легкими и тяжелыми элементами и в солнечных космических лучах (СКЛ), поэтому, казалось бы, тяжелая компонента ГГЛ и СКЛ – тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) – не могут давать существенного вклада в радиационные эффекты. Относительно недавно в результате исследований космического пространства выяснилось, что это не так.

Интерес к ТЗЧ как к источнику радиационной опасности возник в конце 1960-х – начале 1970-х гг., во время шести пилотируемых экспедиций по программе “Аполлон” (“Apollo”). Несколько дней они находились в космическом пространстве, в том числе 8–12 суток вне пределов земной магнитосферы (ЗиВ, 2009, № 5).

В июле 1969 г., во время первой лунной экспедиции на КК “Аполлон-11”, американский астронавт Эдвин Олдрин, совершавший полет вместе с Нилом Армстронгом, сообщил о своих необычных ощущениях: иногда во время полета он наблюдал яркие вспышки в глазах. Порой их частота достигала сотни в день. Именно тогда специалисты и высказали предположение, что это явление может быть вызвано воздействием ГГЛ, постоянно присутствующих в космическом пространстве. В их составе есть тяжелые ядра – углерод, кислород, железо, обладающие большими ионизационными потерями энергии, чем легкие. Именно они и вызывают вспышки света в глазах. Оказалось, что этот орган человека – своеобразный детектор космического



Нил Армстронг (командир), Эдвин Олдрин и Майкл Коллинз совершили первый в истории полет на Луну. Э. Олдрин во время перелета к Луне сообщил о вспышках в глазах, вызванных, как впоследствии оказалось, галактическими космическими лучами. На вставке слева – след, фосфен в глазном яблоке, созданный ядром железа ГГЛ. Фото NASA



Космонавт Сергей Авдеев во время своего полета на станции "Мир" принял участие в российско-итальянском эксперименте по исследованию влияния тяжелых заряженных частиц на глазное яблоко. На фотографии: шлем на голове космонавта – детектор, регистрировавший ТЗЧ, попадающих в глаза космонавта. Снимок любезно предоставил С.В. Авдеев

излучения, регистрирующий его отдельные тяжелые компоненты. В данном случае ТЗЧ при взаимодействии космических частиц с веществом глазного яблока вызывали вспышки света – фосфены. Интерес к изучению ТЗЧ в космосе, как источнику радиационной опасности для человека и создаваемой им космической электроники, возник именно в период первых лунных экспедиций. Теперь это явление широко известно, оно, вероятно, наблюдалось и до Э. Олдрина, только не все космические пилоты сообщали о нем на Землю.

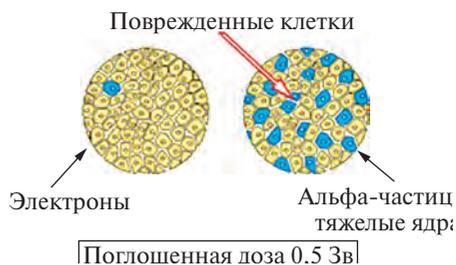
В 1998–1999 гг. на борту Международной космической станции проводился эксперимент по более глубокому изучению этого эффекта. Выглядел он так: шлем, начиненный детекторами для регистрации заряженных частиц, надевали на голову космонавта Сергея Авдеева, и он должен был отмечать момент прохождения частицы по наблюдаемым им вспышкам, а детекторы независимо фиксировали их пролет через глаз и детектор. Глаза космонавта действительно зафиксировали следы прохождения через голову ТЗЧ-фосфены (это были большей частью ГКЛ и частицы радиационных поясов Земли) (см. продолжение статьи в следующем номере журнала).

Так началась история исследования ТЗЧ в космосе, в иностранной литературе их называют HZE particles (High atomic number and high Energy particles – частицы с высокой энергией и атомным номером). Ученых интересуют аспекты их воздействия на биологические структуры и электронику космических аппаратов. Рассмотрим эти эффекты на том уровне, который нам сегодня понятен.

О ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Эффекты взаимодействий ТЗЧ с биологическими структурами и более легкими частицами, например электронами или гамма-излучением, сильно различаются (а далее мы увидим, что это справедливо и для твердотельной электроники). Радиобиологи определяют их эффективность в сравнении с уровнем радиационного влияния на живые организмы рентгеновского излучения. Эксперименты показали, что “относительная биологическая эффективность” ТЗЧ по инициированию одного и того же эффекта значительно больше, чем у рентгеновского излучения. Если облучать одной и той же дозой рентгена

Схема взаимодействия альфа-частиц (ядра гелия) и других тяжелых частиц космических лучей с клетками организма, оно оказалось более эффективным, чем электронов – легких частиц. Тяжелые частицы теряют в веществе гораздо больше энергии на единицу пути, нежели более легкие. При одной и той же дозе радиации от электронов и тяжелых частиц число поврежденных клеток в последнем случае больше



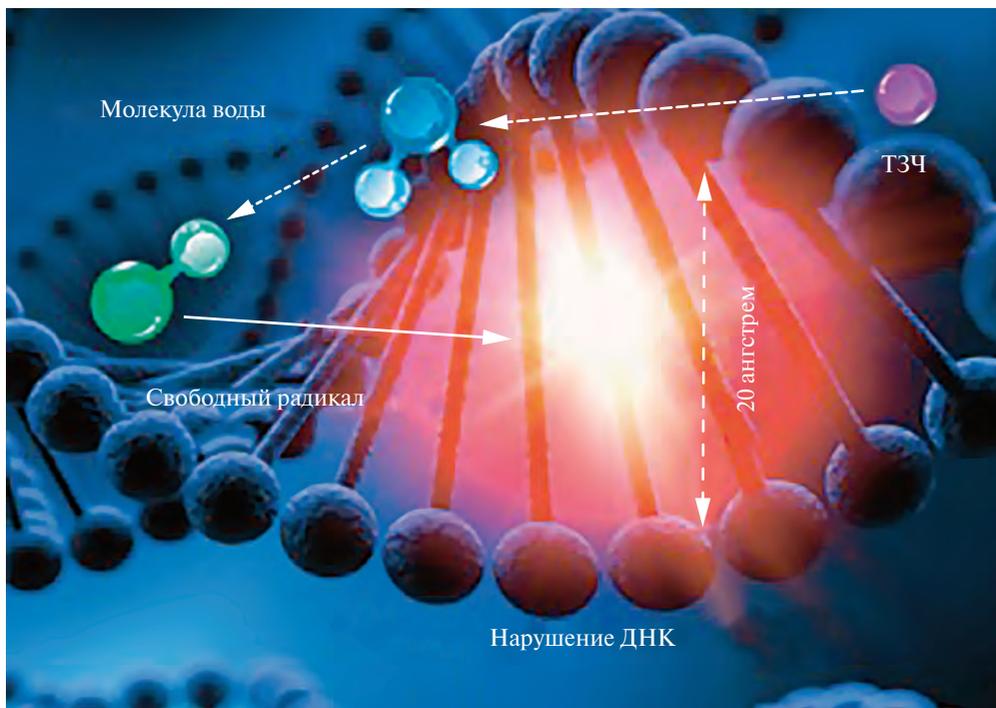
(или электронов) и тяжелыми ионами многоклеточную структуру, то радиационный эффект в виде ее повреждений во втором случае будет значительно больше. Экспериментально доказано, что “относительная биологическая эффективность” (в терминологии радиобиологов – “фактор качества”) таких ТЗЧ, как, например, ядра железа, в 20 раз превышает создаваемую рентгеновским излучением. Соответственно, “поражающий эффект” ТЗЧ более эффективен и в сравнении с электронами и протонами. В радиационной биологии используется не просто доза радиационного облучения, а “эквивалентная доза”, которая учитывает “фактор качества”.

Обладая значительной массой, ТЗЧ теряют существенно больше энергии на единицу пройденного пути, чем более легкие частицы, летящие с той же скоростью. Вследствие этого будут проявляться только локальные, в микроскопических объемах, повреждения биологических структур. При малых потоках ТЗЧ не следует ожидать получения больших доз, характерных для высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения. Тем не менее ТЗЧ в микрообъемах вещества могут вызвать существенные, а иногда

ТЗЧ могут вызвать изменения в структуре ДНК. Основное вещество биологических тканей – вода – в поле радиации ионизируется, из-за этого образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК

необратимые изменения, например повреждения, возникающие на клеточном уровне. При одной и той же исходной дозе радиации тяжелых частиц и от электронов или рентгена число поврежденных клеток в первом случае значительно больше. Как следствие, при облучении ТЗЧ и гамма-излучением возникают мутации, частота которых зависит от мощности полученной дозы (в первом случае они больше). В результате могут возникнуть необратимые генетические последствия, в том числе и канцерогенные.

ТЗЧ могут вызвать изменения в структуре ДНК. Основное вещество биологических тканей – вода – в поле радиации ионизируется, из-за этого образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключены прямые повреждения ДНК при торможении ТЗЧ в клетке. Следует отметить, что область взаимодействия ТЗЧ с веществом биологических структур, в отличие, например, от гамма-квантов, сопоставима с размерами элементов самой ДНК-структуры и клетки. Это приводит к локальным повреждениям. Данные о радиационном риске, полученные американскими специалистами из Брукгейвской лаборатории,



наглядно демонстрируют более сильный, по сравнению с легкими частицами, эффект радиационного эффекта ТЗЧ на биологические структуры.

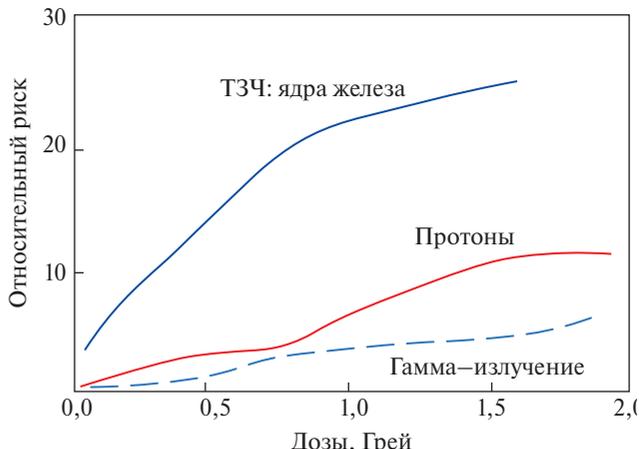
По свидетельству специалистов NASA, у некоторых астронавтов – ветеранов длительных космических полетов – наблюдались серьезные хромосомные aberrации кровяных клеток, что может быть свидетельством начала развития канцерогенных образований. Эти образования могут и не вызывать рак, если они не будут подвержены дополнительным мутациям, но, несомненно, такие нарушения потенциально опасны. Другой пример: воздействие ТЗЧ на глаз человека может привести повреждению клетчатки и хрусталика. Однако надо отметить, что в самом механизме взаимодействия ТЗЧ с клеточными структурами много неясного и сама проблема в рамках радиационной биологии далека от решения. Вероятность радиационных нарушений, описанных выше,

Взаимодействие тяжелых частиц ГКЛ с молекулой ДНК в пределах ее линейных размеров (примерно 20 Å) может приводить к нарушениям в ее структуре двумя путями: либо через образование свободных радикалов, либо напрямую – путем повреждения самой молекулы

не обязательно пропорциональна общей дозе радиации. Сами aberrации разных типов по-разному соотносятся с величиной общей дозы: для одних aberrаций необходимы малые дозы, для других – значительно большие. Не вполне ясен и синергетический эффект различных видов радиации: скажем, воздействие ТЗЧ наряду с гамма-излучением, электронами. Исследования наших космических биологов показывают, что, если хрусталик глазного яблока предварительно облучить ионизирующей радиацией, развитие катарактных явлений протекает быстрее.

Биологическая эффективность ионизирующей радиации коррелирует

График радиационного риска возникновения канцерогенных новообразований при облучении биологических структур различными дозами гамма-квантов, протонов и ядер железа. Сильный эффект от тяжелых заряженных частиц (ядер железа) – очевиден. По материалам, опубликованным Cucinotta F.A., Hu S., Shwadronek N.A. *Space radiation Cancer Risk Projections and Uncertainties*. 2010. 2011, NASA/TP-2011-216155

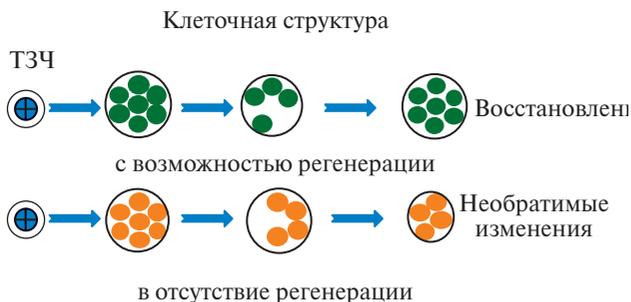


с величиной энерговыделения частицы вдоль ее трека в веществе. Единицей измерения потерь энергии частицы обычно служит величина линейных потерь энергии (ЛПЭ). Это энергия, теряемая частицей на единицу длины в веществе с определенной плотностью.

Радиобиологи выяснили, что биологическая эффективность воздействия ТЗЧ (например, инактивация клетки) начинает увеличиваться с определенного порога, затем наступает насыщение. Несмотря на то, что существуют факты, свидетельствующие в пользу такой интерпретации, следует отметить, что зависимость между ЛПЭ и биоэффективностью ТЗЧ не является простой функцией. Об этом может свидетельствовать, например, тот факт, что биоэффективность ионов с различными зарядовыми состояниями при одном и том же ЛПЭ – разная. Специалистами в области радиобиологии отмечается, что, в отличие от нейтронов и, скажем, альфа-частиц, ситуация по изучению эффектов, вызываемых более высокоэнергичными тяжелыми ТЗЧ, вероятно, более проблематична. Такие данные практически просто отсутствуют, а имеющиеся относятся к экспериментам с большими дозами.

Для ТЗЧ с большими значениями ЛПЭ биологическая эффективность воздействия ТЗЧ не имеет прямой связи с ЛПЭ. Это происходит, скорее всего, из-за того, что толщина трека частиц в веществе зависит от их скорости. Поэтому частицы с разными Z приводят к разному эффекту при одном и том же ЛПЭ. Так, по некоторым экспериментальным данным, полученным на ускорителях, видно, что максимум биологической эффективности ТЗЧ изменяется от 100 кэВ на 1 мкм пройденного частицей пути в веществе до более чем 150 кэВ/мкм при изменении от Z от 1 (протоны) до 26 (железо). Можно констатировать, что эффективность воздействия ТЗЧ скорее зависит от заряда частицы Z и ее энергии, чем от ЛПЭ. В этом случае становится очевидным, что “ЛПЭ-концепция” интерпретации эффектов, вызываемых ТЗЧ, не вполне состоятельна.

В контексте изложения механизмов воздействия ТЗЧ на биологические структуры следует упомянуть и о возможности изменения когнитивных функций высших млекопитающих. Причиной тому – нарушения на молекулярном уровне, изучение которых также еще впереди. Интересен



Воздействие ТЗЧ на клеточную структуру: в ряде случаев наблюдаются регенеративные процессы, но существует и обратный эффект: ТЗЧ могут привести и к необратимым изменениям

такой факт (также результат экспериментальных исследований): если после облучения обезьян малыми дозами протонов – наиболее легкими ядрами – процент успешно выполняемых тестов несколько увеличивается, то при облучении ТЗЧ он уменьшается! Почему? Пока неясно.

Здесь надо отметить, что на сегодняшний день специалисты по космической медицине и биологии неспособны дать исчерпывающий ответ на подобного рода вопросы. Есть проблемы, которые надо решать в будущих исследованиях. Например, само по себе нарушение ДНК не обязательно должно привести к раку. Более того, молекулы ДНК, получив сигнал опасности о нарушении своей структуры, стараются включить “программу ремонта” (репараций) самостоятельно, и это происходит порой небезуспешно. Любая физическая травма, тот же удар молотком по телу, вызывает гораздо больше нарушений на молекулярном уровне, чем радиация. Но клетки восстанавливают ДНК, и организм “забывает” об этом событии. Но и этот процесс не всегда реализуется: некоторые клеточные структуры не допускают возможности регенерации после воздействия ТЗЧ.

Любая физическая травма, тот же удар молотком по телу, вызывает гораздо больше нарушений на молекулярном уровне, чем радиация. Но клетки восстанавливают ДНК, и организм “забывает” об этом событии

Тем не менее стабильность некоторых ДНК чрезвычайно велика: вероятность мутации не превышает 1 : 10 млн вне зависимости от локальных условий, что говорит о фантастической надежности биологической структуры, ответственной за воспроизводство жизни. Даже сверхсильные радиационные поля не могут нарушить структуры ряда типов ДНК. Есть бактерии, которые не мутируют в огромных по мощности радиационных полях, достигающих многих тысяч греев (грей – единица поглощенной дозы ионизирующего излучения, 1 Гр = 100 рад). Такую дозовую нагрузку

не выдерживает даже кристаллический кремний и многие конструкционные материалы. Однако, как представляется биологам, возможен сбой в “программе ремонта”: например, как результат воздействия ТЗЧ, хромосома может оказаться в совсем не нужном месте в структуре ДНК.

Вот эта ситуация становится уже опасной, но и здесь возможна многовариантность последовательности событий.

Во-первых, надо учесть, что процесс мутации – размножения “неправильных клеток” – занимает большой промежуток времени. Биологи полагают, что могут пройти десятилетия между

первичным неблагоприятным фактом облучения ТЗЧ и негативной реализацией этого эффекта. Это время необходимо, чтобы сформировать новообразование, состоящее из многих миллиардов клеток, подвергнутых мутациям. Поэтому прогноз развития неблагоприятных последствий – дело очень проблематичное.

Другая сторона проблемы влияния радиации на биологические структуры состоит в том, что недостаточно изучен сам процесс воздействия малых доз. Не существует прямой связи между величиной дозы – количеством радиации и радиационными повреждениями. Как полагают биологи, разные типы хромосом различным образом реагируют на величину дозы. Одним из них для проявления эффекта “требуются” значительные дозы радиации, а другим достаточно и сверхмалых. В чем здесь причина? Ответа на это пока также нет. Более того, не вполне ясны последствия облучения биологических структур одновременно двумя или несколькими видами радиации – скажем, ГКЛ и СКЛ или ГКЛ, СКЛ и частицами радиационных поясов. Состав этих видов космического излучения несколько разный, и поэтому каждый из них может приводить к своим последствиям. Но неясен эффект их совместного действия. Окончательный ответ на эти вопросы будет получен лишь по результатам будущих экспериментов и при моделировании.

Краткий экскурс в данную проблему показывает, что изучение радиационных эффектов ТЗЧ на биологические структуры находится в настоящее время на стадии своего развития. Однако уже сейчас очевидно, что потенциальная опасность ТЗЧ – реальность,

которую нельзя не учитывать при планировании космических миссий. На этом неприятные последствия присутствия в космосе тяжелых частиц космических лучей высокой энергии не заканчиваются...

Замечено, что работа бортовых компьютеров спутников может нарушаться, они бывают двух типов: компьютер “зависает” и через некоторое время восстанавливается или же полностью выходит из строя. Опять-таки, изучая это явление, ученые пришли к выводу, что ответственны за него тяжелые частицы ГКЛ. Почему это происходит?

ТЗЧ И ЭЛЕКТРОНИКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Удивительно, но подобные по своему негативному результату последствия, наблюдаемые в биоструктурах при воздействии на них ТЗЧ, обнаруживают себя и в космической электронике. Эти эффекты стали заметны при широком внедрении в бортовую электронику микросхем высокой степени интеграции. Поэтому данная проблема возникла где-то на рубеже 60-х – 70-х годов прошлого столетия, то есть даже календарно ее появление совпало с рождением сходной проблемы в радиационной биологии.

В качестве прямого доказательства существования эффекта негативного воздействия ТЗЧ на бортовую электронику можно привести экспериментальные результаты. Здесь приводится частота сбоев в микросхеме памяти, наблюдавшаяся на одном из спутников в течение ряда лет. Там же нанесена кривая солнечной активности.

Не существует прямой связи между величиной дозы – количеством радиации и радиационными повреждениями. Как полагают биологи, разные типы хромосом различным образом реагируют на величину дозы

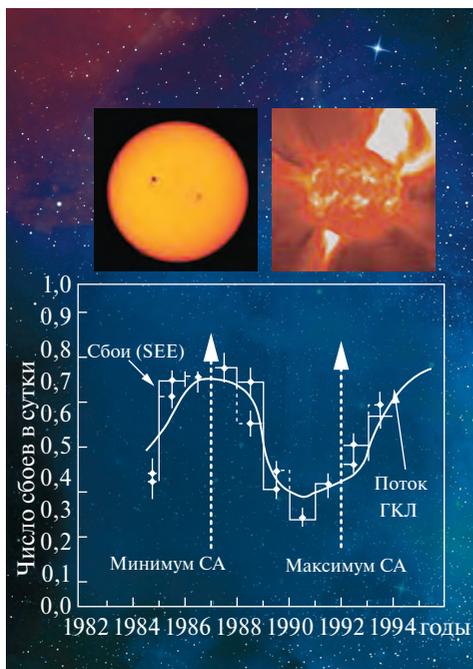


График вариаций потока галактических космических лучей и одиночных сбоев в компьютерных системах спутника. Модуляция ГКЛ в течение цикла солнечной активности приводит к аналогичным изменениям частоты сбоев (По материалам, опубликованным в Bashkirov V., Kuznetsov N., Nyrmik R. An analysis of the SEU rate of microcircuits exposed by the various components of space radiation // Radiation Measurements, 1999. Т. 30. № 3. С. 427–433)

Налицо высокая корреляция между этими явлениями. В годы минимума солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален, частота сбоев нарастает, уменьшается же она в максимуме солнечной активности, когда поток ГКЛ минимален. Таким образом, очевидно, что частицы ГКЛ были источником сбоев в бортовой электронике данного спутника (заметьте сходство с воздействием на биологические структуры!).

Невозможно бороться с этим неприятным явлением традиционными

методами – создавая пассивную защиту. Никакая защита не спасает аппаратуру спутника от этих частиц с их громадными энергиями, уж слишком велика их проникающая способность. Наоборот, увеличение толщины обшивки космического корабля приводит к обратному эффекту. Нейтроны, образуясь в результате ядерных реакций ГКЛ с веществом, создают сильный радиационный фон внутри корабля. Эти вторичные нейтроны, взаимодействуя с материалом, расположенным вблизи чипа, генерируют, в свою очередь, тяжелые частицы, которые, проникая внутрь чипов, создают сбои (часть 2 этой статьи читайте в следующем номере).

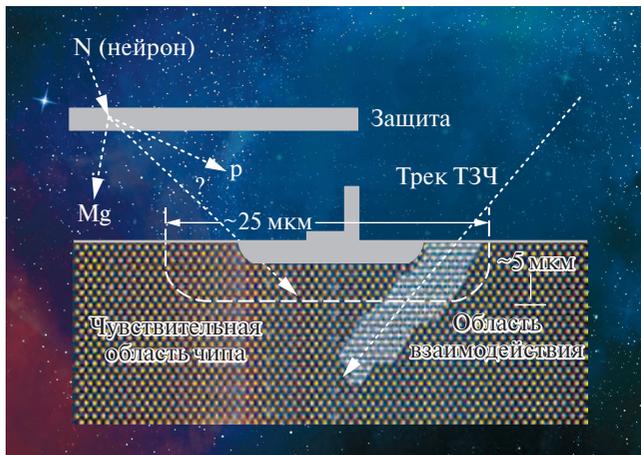
Каков же механизм образования сбоев в микросхемах под воздействием ТЗЧ? Так же, как и в случае с глазным яблоком человека, они проникают внутрь чипа и вызывают локальные микроскопические нарушения в его “сердце” – чувствительной области полупроводникового материала, из которого он изготовлен. В результате довольно сложных процессов, связанных с нарушением движения носителей электрических токов в материале чипа, и происходят сбои в его работе (их называют “одиночными сбоями”). Это неприятное явление для бортовой аппаратуры современных космических аппаратов, напичканных компьютерными системами, управляющими его работой. Как результат, аппарат может потерять ориентацию или не выполнить необходимую команду оператора с Земли, а если на борту нет дублирующей компьютерной системы, его можно и потерять.

Сбой представляет собой эффект ионизации ТЗЧ, генерирующими трек из электронно-дырочных пар. Заряд, аккумулированный на электроде, может сформировать ложный сигнал, который приводит к “мягкому” сбою. Дальнейший сброс или перезапись устройства

приводит, как правило, к нормальному функционированию. Подобные сбои обычно наблюдаются как переходные импульсы в логических или вспомогательных цепях, а также как инвертирование в элементах памяти или в регистрах. Возможны многократные одиночные сбои, в которых единичная ТЗЧ поражает два или более бита, вызывая одновременные сбои.

В отличие от “мягких”, “жесткие” сбои приводят к отказам, которые исключают возможность восстановления путем перезапуска – при этом функциональность устройств нарушается окончательно. Один из примеров – эффект “защелки”, или SEL (Single Effect Latchup – одиночный эффект защелки), приводящей к генерации сильных токов во время “зависания” в одном состоянии. Состояние защелкивания может разрушить устройство, закортит напряжение на общей шине или повредив источник электропитания. Интересно, что SEL впервые наблюдался во время наземных испытаний микросхем.

Для описания одиночных сбоев обычно, так же как и в радиационной биологии, часто используется концепция линейных потерь энергии. Считается, что устойчивость устройства определяется порогом ЛПЭ, который определяется по минимуму ЛПЭ, вызывающему сбой. Зная энергетический спектр исходного космического ионизирующего излучения, и преобразовав его в ЛПЭ-спектр, можно модельно оценить частоту сбоев в конкретной микросхеме с учетом ее топологии и конструктивных особенностей. Этот метод оценки сбоев основан на определении для микросхемы так называемой



Механизм иницирования одиночного сбоя в микросхеме: тяжелая заряженная частица космических лучей, проникая внутрь чувствительной области, создает локальные нарушения электропроводности, что приводит к сбою в работе. Другой вариант – заряженная частица, взаимодействуя с конструкционными материалами спутника путем ядерных реакций, создает нейтроны, которые, в свою очередь, взаимодействуя с материалами (например, магниевыми сплавами), могут создать тяжелые заряженные частицы (скажем, α -частицы). Они также вызовут сбои в работе микросхем

величины критического заряда – минимального аккумулярованного заряда, который создается ионизирующей частицей в чувствительном объеме устройства и необходимым для инициации одиночного сбоя. Высокоэнергичная ионизирующая радиация, помимо дозовых эффектов – главной причины деградации полупроводниковых приборов в высокоинтенсивных полях радиации, может вызывать сбои, вызванные не объемной, а локальной ионизацией, причем сбои зависят от ЛПЭ и носят пороговый характер (аналогично эффектам ТЗЧ в биологических структурах!).

Однако имеются результаты наземных испытаний ряда микросхем, демонстрирующие, что такая простая зависимость вероятности сбоев от ЛПЭ – весьма упрощенная. В реальности она более сложная и свидетельствует о существовании многоуровневого порогового эффекта. ЛПЭ-концепция сбоев базируется на простейшем подходе учета средних ионизационных потерь заряженных частиц в аморфном веществе. Не учитываются возможные вклады, например, многократного рассеяния частиц в веществе, изменения энергии в пройденном слое мишени, влияния кристаллической решетки и температуры кристаллов полупроводниковых материалов интегральных схем, что может быть связано с проблемами каналирования (движение заряженных частиц вдоль каналов) при прохождении частицы через вещество.

Не исключено, что сбои в микросхеме могут произойти за счет генерации вторичных продуктов ядерных реакций при взаимодействии ГКЛ с веществом, окружающим саму микросхему. Аналогичный процесс, приводящий к образованию вторичных ТЗЧ, происходит и при взаимодействии нейтронов с веществом. Кроме того, не очевидно, что дозовые эффекты и сбои от одиночных частиц – независимые явления. Проблема связи накопленной дозы с вероятностью одиночных сбоев актуальна и неоднозначна. Все эти дополнительные факторы нельзя сбрасывать со счетов при оценке ресурса электроники в условиях космического полета. Напомним, что тяжелые заряженные частицы встречаются не только в космических лучах.

В следующем номере журнала рассмотрим физические характеристики радиационных полей в космосе (галактических и солнечных космических лучей, радиационных поясов Земли, а также вторичных частиц) на предмет возможного проявления негативных последствий от воздействия ТЗЧ на электронику и на биологические структуры в космосе. Также кратко остановимся на проблеме планирования космических миссий с целью минимизации радиационных рисков, связанных с этими частицами.

Окончание статьи читайте в следующем номере журнала

ПОПРАВКА

На этапе работы в редакции “ЗиВ” над текстом статьи А.И. Еремеевой “Памяти К.А. Бархатовой” (ЗиВ, 2018, № 3, с. 29) при сокращении внутренних подзаголовков в авторском оригинале статьи во фрагменте:

“Скопления как ключ к разгадке направления эволюции звезды. Звезды скопления находятся практически на одном расстоянии от земного и т.д.” по недосмотру оказалось сокращенным заканчивавшее первую строку слово “Звезды”, а следующая строка начата словом “Скопления” с заглавной буквы.

В результате возникло нелепое искажение смысла: “Скопления находятся практически на одном расстоянии... и т.д.”.

Редакция приносит свои извинения за допущенную оплошность.