

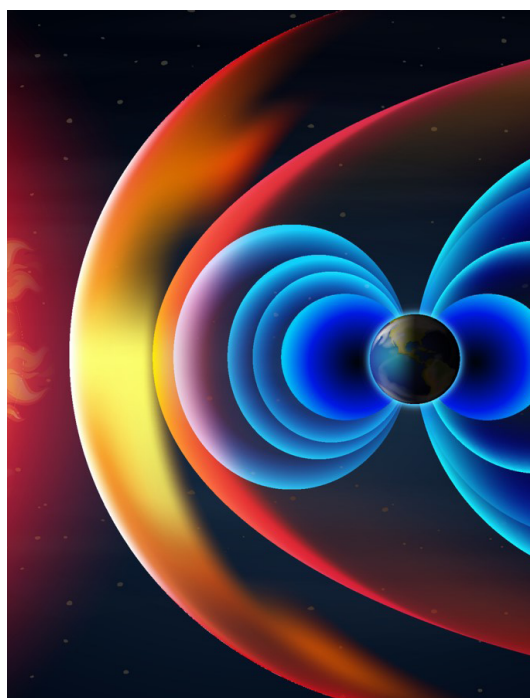


Юлия Ушеренко,
доцент кафедры
«Порошковая металлургия,
сварка и технология
материалов» Белорусского
национального технического
университета, кандидат
технических наук



Анатолий Белоус,
член-корреспондент
НАН Беларуси,
профессор,
заслуженный
изобретатель
Республики Беларусь

За последнее десятилетие в мире были достигнуты значительные успехи как в изучении особенностей влияния электромагнитных излучений на биологические и технические объекты, так и создании современных методов защиты от лучей естественного и искусственного (антропогенного) происхождения. Разработаны новые материалы, технологии и устройства, способные эффективно экранировать или нейтрализовать их вредное воздействие. Инновационные подходы в этой сфере не обошли стороной и Беларусь. В основу многих новшеств были положены результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований большого коллектива белорусских ученых и инженеров. Многие из этих работ стали базой для современных технических решений при обеспечении безопасности бортовой электроники отечественной космической и военной техники.



Защита космических аппаратов от электромагнитного излучения

«Доспехи» для микросхем

При работе космических аппаратов в околоземном пространстве их бортовая аппаратура подвергается интенсивному воздействию электромагнитных излучений и магнитных полей. Они вызывают «сбои» в работе управляющих систем и искажения в данных, поступающих от чувствительных научных приборов. Современные спутники – как коммерческие, так и военные – буквально насыщены электронными устройствами, и малейшее электромагнитное возмущение может привести к серьезным последствиям.

Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения – одни из главных дестабилизирующих факторов, влияющих на элементы, блоки и приборы ракетно-космических комплексов. Более того, они представляют угрозу для надежности и стабильности функционирования бортовой электроники в течение всего заданного срока активного существования (САС) аппарата, который может достигать 10 и более лет.

На фоне стремительного развития электротехнических, радиоэлектронных и информационных технологий значительно возрос уровень электромагнитного фона, расширился диапазон используемых частот ЭМИ и увеличилась их амплитуда. Одновременно развитие бортовой электроники идет по пути миниатюризации устройств, повышения плотности компоновки и снижения массы. Все это делает задачу обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и стабильного функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) особенно сложной.

Не менее важная проблема радиационной составляющей космической среды связана с поддержанием эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях повышенного уровня радиационных воздействий различного типа в космическом пространстве. Потoki электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц с энергиями от ~0,1 МэВ/нуклон до ~10 ГэВ/нуклон – одна из основных причин отказов электронных систем в космосе. Эти частицы вызывают деградацию полупроводниковых элементов, сбои в микросхемах и сокращение САС аппарата.

Существует несколько подходов к повышению радиационной стойкости: использование специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении интегральных микросхем, конструктивная защита на основе алюминиевых сплавов, методы мажоритирования и другие инженерные решения [1, 2]. Однако даже при их применении остаточные радиационные воздействия остаются значительными. Поэтому для наиболее уязвимых элементов ракетно-космической аппаратуры требуется дополнительная система защиты.

Наиболее универсальным и эффективным способом предохранения от ЭМИ остается экранирование. Именно поэтому разработка новых материалов и технологий для высокоэффективных электромагнитных и радиационных экранов сегодня приобретает стратегическое значение. Временные, финансовые и материальные затраты на эти исследования несопоставимы с потерями, которые может повлечь эксплуатация «незащищенной» космической техники. Учеными НПЦ материаловедения за последние 20 лет

было опубликовано более 100 трудов, посвященных данной проблеме [3–11].

За успешное выполнение в 2010–2016 гг. цикла научно-исследовательских работ по защите микросхем космического и специального назначения от внешних дестабилизирующих факторов и успешное внедрение новых разработок в промышленное производство в 2017 г. ведущий научный сотрудник НПЦ материаловедения С.С. Грабчиков и сотрудники холдинга «Интеграл» В.А. Солодуха и С.В. Шведов были удостоены Государственной премии Беларуси в области науки и техники.

На заседании Высшего Государственного Совета Союзного государства 4 ноября 2021 г. было принято решение о присуждении учрежденной им премии в области науки и техники за 2021 г. в том числе и белорусским ученым – за разработку и создание высокоэффективных систем электромагнитной защиты, нового поколения датчиков потоков космического излучения для космических приборов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Лауреатами стали С.С. Грабчиков, А.В. Труханов (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению), Н.И. Мухуров (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»), а также их российские коллеги Н.Л. Бородкова, О.И. Кораблев, В.А. Котцов из Института космических исследований (ИКИ) РАН.

Именно в этой области ведут активные работы исследовательские центры ведущих стран мира, стремясь получить широкополосные электромагнитные экраны нового поколения, сочетающие малый вес, высокую эффективность и устойчивость к агрессивным условиям космоса.

Воздействие потоков высокоэнергетических частиц

Отдельного внимания заслуживает проблема высокоскоростных потоков микрочастиц – своеобразных пылевых снарядов, движущихся с огромными скоростями в космическом пространстве. Как часть космической пыли они представляют собой важный, но долгое время остававшийся недооцененным фактор, способный вызывать повреждения конструкций, модулей и даже элементной базы (ЭКБ) бортовой электроники космических аппаратов.

В космосе кроме большого количества «космического мусора» и микрометеоритов находятся многочисленные «сгустки» (облака) микрочастиц космической пыли и других объектов микроуровня. Специалистам в области космического материаловедения и приборостроения уже более полувека известно, что в околоземном пространстве циркулирует огромное число микрометеоритов, обломков старых спутников и сгустков микрочастиц различного происхождения. Плотность космической пыли вблизи Земли составляет порядка 3×10^{-29} кг/м³, и, по оценкам, ежедневно на поверхность планеты оседает около 400 т таких частиц [12]. Более 5 тыс. запусков различных аппаратов с начала космической эры лишь усугубили ситуацию: орбиты все больше «засоряются» мельчайшими фрагментами техники и пылевыми облаками.

В отличие от видимых метеоритов, частицы космической пыли имеют микроскопические размеры – от нескольких микрон до сотен микрометров. Основная их масса приходится на диа-

пазон 1–100 мкм. По местоположению различают межгалактическую, межзвездную, околопланетную, кометную и астероидную пыль, а также пыль Пояса Койпера и облаков вокруг звезд. Все это делает задачу анализа воздействия таких микрочастиц на долговечные космические аппараты и станции крайне актуальной.

Долгое время результаты столкновения потоков пылевых частиц с металлическими конструкциями космических аппаратов рассматривались лишь как эрозионное повреждение внешней поверхности. Однако накопленные данные показали, что реальная картина гораздо сложнее.

Белорусские ученые впервые выдвинули научную гипотезу, согласно которой при ударе микрочастиц о корпус аппарата образуется плазма, способная индуцировать в электронных системах мощные импульсные токи [13–16], которые нарушают работу бортовой электроники и могут привести к ее полному выходу из строя. Здесь стоит напомнить, что научная гипотеза – это обоснованное предположение о механизме или закономерности явления, требующее экспериментальной проверки. Только при подтверждении независимыми исследованиями она может перерасти в научную теорию.

Отечественные ученые первыми разработали физико-математические модели [17–20], описывающие указанные процессы, и показали, что последствия таких микроскопических столкновений могут приводить не только к изменению структуры материалов, но и к генерации электромагнитных импульсов, способных нарушать работу чувствительной электроники [21, 22].

Эти исследования внесли весомый вклад в международную науку

о защите космических систем от микрометеоритного и плазменного воздействия. Значительно развил данную тему С.М. Ушеренко, который экспериментально доказал существование области взаимодействия микрочастиц с материалами, характеризующейся феноменом «сверхглубокого проникания» – известным сегодня как эффект Ушеренко [21–23]. Его суть в том, что микрочастицы, двигаясь с колоссальной скоростью, способны пробивать металл и другие материалы на несколько порядков глубже, чем это предсказывают классические модели взаимодействия макротел.

В научных трудах [14, 24] представлены результаты многолетней работы белорусских ученых, посвященной анализу новых материалов, включая многослойные структуры, применяемые для защиты от электромагнитного излучения. Особое внимание здесь уделено изучению физических механизмов отражения и поглощения излучения, а также экспериментальной оценке изменений механических и электрофизических свойств защитных материалов после воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц.

Отдельное место в отечественной научной школе занимает цикл работ, касающихся физического моделирования в наземных условиях процессов взаимодействия «космических» микрочастиц с материалами корпусов летательных аппаратов и микросхем. Для этих целей в одном из институтов Академии наук БССР долгие годы функционировал уникальный подземный исследовательский комплекс – своего рода «лаборатория микрометеоритов». Здесь с помощью специально созданных взрывных ускорителей микрочастицы различ-

ных материалов разгонялись до космических скоростей и направлялись в мишени, имитирующие фрагменты корпусов спутников и корпусированных микросхем с установленными чипами.

Именно белорусские исследователи в ряде работ [2, 24–27] впервые экспериментально (с использованием фотографий и снимков растровой электронной микроскопии) показали характер реальных повреждений микросхем после таких ударов. Было установлено, что основными являются механические разрушения – разрывы и сколы в местах проволочных соединений, металлизированных шин питания и контактных площадок. Впервые зафиксированы и оригинальные дефекты: в зонах локального разогрева высокой интенсивности наблюдалось формирование новых кристаллических образований из полупроводникового материала разрушенного кристалла.

Долгое время зарубежным ученым не удавалось количественно определить энергию, необходимую для генерации электромагнитного поля и выброса струй плотной плазмы из материала при ударе, поскольку длительность процесса не превышает 10^{-3} секунды. В рамках классической механики такое выделение энергии объяснить невозможно. Их белорусские коллеги предложили оригинальную модель [18–20]. Ее суть в том, что воздействие электромагнитного поля начинается уже на первой стадии удара – в момент движения частиц внутри твердого тела. Возникает «классический» механизм трения, сопровождающийся потерей массы и образованием электрически заряженных частиц. Движение миллионов таких частиц инициирует появление локальных электромагнитных полей. Их пульсации

внутри так называемых солитонов высокого давления приводят к появлению эквивалентных пульсаций плотной плазмы в объеме материала, а сопровождающие ударно-волновые процессы вызывают перераспределение обобществленных электронов в металлах. Такое комплексное объяснение позволило впервые связать механические, тепловые и электромагнитные явления в единый физический процесс, что стало одним из ключевых достижений белорусской школы динамического материаловедения и физики высокоэнергетических воздействий.

Мировая проблема – белорусское решение

Невозможно не привести несколько фактов, хотя и не связанных напрямую с вопросами защиты от ЭМИ, но ярко подтверждающих инновационность и приоритет (ноу-хау) белорусских исследований в области сверхглубокого проникновения и высокоэнергетических воздействий.

За прошедшее с момента полета Юрия Гагарина время накопилось множество данных, касающихся надежности (отказов) космической техники, которые до сих пор не получили однозначной оценки ученых и специалистов в части механизмов и причин их возникновения. О некоторых из них общественность узнает лишь из редких сообщений СМИ.

Так, в 2019 г. в переходной камере российского модуля МКС была зафиксирована первая утечка воздуха, которая продолжалась до середины 2025 г. Космонавты неоднократно пытались устранить ее при помощи клеевых композиций и герметизирующих пленок. Официальной причиной назывались «микротрещины»

в металлической обшивке, предположительно вызванные эффектом усталости металла – хотя точный механизм их возникновения так и не был установлен.

В декабре 2022 г. произошла еще одна аварийная ситуация: российский корабль «Союз МС-22», пристыкованный к МКС для эвакуации российского экипажа, фактически вышел из строя из-за утечки гелия через внешнюю обшивку. По заявлению «Роскосмоса», повреждение произошло вследствие столкновения с частицей метеорного потока Геминиды. Однако вероятность попадания даже мельчайшего метеорита в конкретный участок станции с учетом колоссальных масштабов космоса близка к нулю. Через 2 месяца аналогичная проблема повторилась уже с грузовым кораблем «Прогресс МС-21». А в марте 2025 г. американские астронавты Барри Уилмор и Сунита Уильямс смогли вернуться на Землю лишь после 9-месячной задержки, вызванной утечкой гелия и отказом двигательной системы. При этом физическая причина этой поломки официально не была выявлена.

Не избежала инцидента и китайская космическая программа: в ноябре 2025 г. возвращение космического корабля «Шэньчжоу-20» с 3 тейконавтами с орбитальной станции «Тяньгун» было отложено после того, как, по словам специалистов, «в иллюминатор корабля влетел фрагмент космического мусора». Примечательно, что ни одна из установленных по периметру станции высокоскоростных видеокамер столкновения не зафиксировала.

Эти и подобные случаи вызывают закономерные вопросы: действительно ли речь идет о метеоритах или же мы имеем дело с иными микропроцессами – например, высокоскоростным

взаимодействием микрочастиц и образованием плазмы, о котором еще много лет назад писали белорусские исследователи?

Американские специалисты NASA также внимательно изучали указанные выше работы наших ученых. Убедившись в достоверности данных, они передали тему в ведение агентства перспективных исследований DARPA, которое затем, получив десятки миллионов долларов финансирования, развернуло исследовательскую программу NOM4D, направленную на создание «самовосстанавливающихся космических материалов». В рамках этой программы разрабатываются композиты нового поколения, способные к самосборке

и саморемонту в условиях космоса. Особое внимание уделяется материалам, которые могут самостоятельно восстанавливаться после повреждений, вызванных потоками высокоэнергетических частиц. Разрабатываются и жидкие вещества, которые затвердевают под действием локального нагрева, обеспечивая герметизацию микроповреждений в реальном времени. Первые эксперименты с ними запланированы в текущем году на борту Международной космической станции.

Европейское космическое агентство (ESA) финансирует аналогичный проект Cassandra (Composite Autonomous Sensing And Repair). Его ведут швейцарские компании CompPair и

CSEM совместно с бельгийской Com&Sens. Инженеры модифицируют углепластиковый композит так, чтобы он не только выдерживал нагрузки, но и мог сам диагностировать повреждения и запускать процесс ремонта.

Таким образом, идеи, зародившиеся в белорусской научной школе еще десятилетия назад, нашли продолжение и развитие в крупнейших международных космических программах. Это наглядное подтверждение того, что отечественные исследования занимают достойное место в мировой науке – настолько, что формируют собственное направление, сочетающее физику, материаловедение и инженерную практику будущего. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 2. – М., 2015.
- Belous A., Saladukha V., Shvedov S. High Velocity Microparticles in Space: Influence Mechanisms and Mitigating Effects of Electromagnetic Irradiation. – Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- Грабчиков С.С., Сосновская Л.Б., Шарапа Т.Е. Многослойный электромагнитный экран: пат. Респ. Беларусь №11843; заявл. 28.01.2009.
- Дмитренко В.В., Батищев А.Г., Грабчиков С.С. [и др.]. Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения: пат. РФ №2474890; заявл. 10.02.2013.
- Dmitrenko V.V., Besson D., Grabchikov S.S. [et al.]. Multilayer film shields for the protection of PMT from constant magnetic field // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86. P. 013903-1–013903-3.
- Дмитренко В.В., Грабчиков С.С., Ньют П.В. [и др.]. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. №5. С. 43–48.
- Grabchikov S.S., Trukhanov A.V., Kazakevich I.S. [et al.]. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. V. 398. P. 49–53.
- Громыко Г.Ф., Грабчиков С.С., Ерофеев В.Т., Заяц Г.М. Эффективность экранирования постоянных магнитных полей цилиндрическим экраном с учетом нелинейных эффектов // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4, №4(17). С. 30–39.
- Zubar T., Grabchikov S., Kotelnikova A. [et al.]. Efficiency of Magnetostatic Protection Using Nanostructured Permalloy Shielding Coatings Depending on Their Microstructure // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, 634.
- Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств: краткий курс «белой магии» / Под ред. А.И. Белоуса. – М., 2017.
- Белоус А.И., Ушеренко Ю.С. Защита от электромагнитных излучений: материалы, технологии, конструкции. – М.; Вологда, 2026.
- Plane J.M.C. Cosmic Dust in the Earth's Atmosphere // Chemical Society Reviews. 2012. Vol. 41(19). P. 6507–6518.
- Wozniakiewicz P.J., Burchell M.J. Space Dust and Debris Near the Earth // Astronomy & Geophysics. 2019. Vol. 60(3). P. 38–42.
- Belous A.I., Usherenko S.M., Romanov G.S. [et al.]. On Superdeep Penetration of a Multiparticle Flux and Damage of Electronic Elements Positioned behind an Obstacle // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77. P. 638–640.
- Овчинников В.И., Дорошкевич Е.А., Белоус А.И., Петлицкая Т.В., Реут О.П., Ушеренко С.М. Эффекты электромагнитного излучения, наблюдаемые в условиях нагружения высокоэнергетическим потоком порошковых частиц // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов. – Днепропетровск, 2007. С. 153–160.
- Ушеренко Ю.С., Алексенцева С.Е., Ушеренко С.М. Исследование надежности материалов внешних оболочек корпусов космических аппаратов при взаимодействии с пылевидными фракциями // Технология металлов. 2022. №5. С. 52–56. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-5-52-56.
- Альтшулер Л.В., Андиленко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. О модели сверхглубокого проникновения // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, №5. С. 55–57.
- Usherenko S.M., Koval O.I., Usherenko Yu.S. Estimation of the Energy Expended for Superdeep Penetration // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77, №3. P. 641–646.
- Соболев В.В., Ушеренко С.М. Образование плазмы в ударно-волновых процессах // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15, №2. С. 86–95.
- Owsik J., Jach K., Usherenko S. [et al.]. The Physics of Superdeep Penetration Phenomenon // Journal of Technical Physics. 2008. Vol. 49, №1. P. 3–25.
- Соболев В.В., Ушеренко С.М., Чой К.И. К вопросу о дестабилизации служебных параметров систем управления аппаратов при длительных полетах // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15, №3. С. 41–46.
- Emel'yanov V.A. [et al.]. New Problem of Risk: Process of the Accelerated Degradation of an Electronic Control System // WMSCI 2005 – The 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Proceedings.: July 10–13, 2005, Orlando, Florida, USA 2005. P. 485–488.
- Андиленко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М., Шилин В.А. Некоторые эффекты сверхглубокого проникновения // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, №22. С. 42–44.
- Belous A.I., Dybov O.A., Romanov G.S., Usherenko S.M., Shvedov S.V. On Superdeep Penetration of a Multiparticle Flux and Damage of Electronic Elements Positioned behind an Obstacle // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77(3). P. 638–640.
- Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М. Динамическая модификация металлов. – Минск, 2021.
- Овчинников В.И. Технология получения многослойных материалов для защиты интегральных микросхем от высокоскоростных потоков микрочастиц: Дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2014.
- Белоус А.И., Овчинников В.И., Турцевич А.С. Особенности конструирования микроэлектронных устройств для космических аппаратов. – Гомель, 2014.