

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по прикладным исследованиям и проектам
в области обеспечения безопасности
деятельности в околоземном космическом
пространстве, д-р техн. наук

М.М. Пеньков

"20" августа 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Телегина Алексея Михайловича
"Разработка методик, экспериментальных установок и бортовых приборов
для регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического
мусора", представленную на соискание ученой степени доктора технических
наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность избранной темы

Диссертационное исследование Телегина А.М. посвящено решению одной из ключевых проблем современной космонавтики — проблеме техногенного засорения околоземного космического пространства и естественной метеорной опасности. Существующие модели пространственно-временного распределения высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и космического мусора) характеризуются значительным разбросом данных и недостаточной точностью, что вынуждает разработчиков космических аппаратов либо закладывать избыточные запасы прочности, либо использовать устаревшие модели, не учитывающие резкий рост засорения в последние десятилетия. При этом подавляющее большинство опасных частиц размером менее 1 см не контролируется наземными средствами, что делает их воздействие плохо прогнозируемым.

В этих условиях разработка новых методов и приборов регистрации, обладающих повышенной чувствительностью, помехозащищенностью и информативностью, является безусловно актуальной научно-технической задачей, имеющей как фундаментальное значение (для изучения эволюции ненаблюдаемого космического мусора (КМ) и метеорной активности), так и важнейшее прикладное значение для повышения надежности космических аппаратов, в частности малых космических аппаратов (МКА) типа CubeSat, для которых массогабаритные ограничения являются критическими.

Входящий № 205-7830

Дата 09 СЕН 2026

Самарский университет

Новизна исследования и полученных результатов

В диссертационной работе получен ряд новых научных результатов, отличающихся оригинальностью и практической значимостью:

1. **Метод частотного анализа для пленочных датчиков.** Впервые предложен и экспериментально обоснован метод регистрации высокоскоростных микрочастиц на основе частотного анализа коэффициента передачи пленочных металлических проводников ("змейки", спиральной катушки индуктивности), позволяющий определять место и факт разрыва проводника без применения многоканальных мультиплексоров. Установлена зависимость частоты резонанса коэффициента передачи от места разрыва микрополоска в диапазоне 4–30 МГц, что позволяет существенно (на 10–30%) сократить массогабаритные характеристики датчиков.

2. **Новые конструкции ионизационных датчиков.** Разработаны и изготовлены приборы ионизационного типа с комбинированной системой электродов (чередование нитяных и пластинчатых электродов), позволяющей при сохранении большой площади сбора ионов снизить входную емкость на 15–20% и повысить чувствительность не менее чем на 17%. Создана и экспериментально апробирована конструкция прибора "МЕТЕОР-М" с оптическим каналом синхронизации и двухканальным режимом измерения, обеспечивающая подавление электромагнитных помех от ускорителя.

3. **Математические модели для расчета сигналов.** На основе теоремы Рамо-Шокли разработаны аналитические модели для расчета форм наведенного и ионизационного импульсов в датчиках с различной геометрией электродов (пластины, сетки, струны, непараллельные плоскости), что позволило впервые объяснить экспериментально наблюдаемые "двугорбые" формы наведенных импульсов. Установлены эмпирические зависимости отношения заряда ионов к массе частицы от скорости для различных материалов мишени (медь, нержавеющая сталь, АМГ6) в диапазоне скоростей до 10 км/с.

4. **Методика измерения вектора скорости и параметров частиц.** Предложена и обоснована конструкция модульного прибора с измерительными сетками для одновременного определения трех компонент вектора скорости, заряда и массы микрочастицы. Проведена оценка зависимости точности измерений от геометрических размеров прибора, показано, что погрешность измерения скорости не превышает 5% при расстоянии между сетками не более 7,5 см и точности измерения времени 10^{-7} с.

5. **Использование элементов космического аппарата в качестве датчиков.** Разработана и реализована в макете концепция "спутник-датчик" с пленочной структурой металл-диэлектрик-металл зонтичной конструкции, обеспечивающей регистрацию ударов на площади около 1 м² с широким телесным углом 2π стерадиан, что примерно в 1,5 раза больше, чем у ранее разработанных ионизационных датчиков. Предложены методики регистрации

параметров микрочастиц с использованием поверхности малого космического аппарата.

6. Модификация индукционных датчиков для ускорителей. Разработана конструкция датчика с тремя электродами, расположенными на окружности, и методика обработки сигналов с этих электродов, позволяющая определять отклонение микрочастицы от оси тракта ускорителя с погрешностью не более 2% (за исключением области вблизи оси симметрии).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Обоснованность научных положений и выводов обеспечивается комплексным подходом к исследованию, сочетающим строгие математические модели (теорема Рамо-Шокли, аппарат S- и T-матриц передачи, численное моделирование методом конечных элементов в среде FEMM) с широким спектром экспериментальных исследований.

Достоверность результатов подтверждается:

- воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных на сертифицированном оборудовании (электростатический и электродинамический ускорители микрочастиц, спектроанализатор RIGOL DSA875, векторный анализатор LiteVNA64, цифровые осциллографы);
- успешным проведением космического эксперимента на борту малого космического аппарата "АИСТ-1Т" с использованием разработанной аппаратуры "МЕТЕОР", в ходе которого были зарегистрированы реальные высокоскоростные микрочастицы;
- хорошим согласием расчетных и экспериментальных данных, в том числе для различных конфигураций электродов и материалов мишеней;
- публикацией результатов в рецензируемых научных журналах, в том числе в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science;
- патентованием разработанных технических решений (35 патентов РФ).

Значимость для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в развитии физических представлений о процессах взаимодействия высокоскоростных микрочастиц с чувствительными элементами датчиков. Разработанные математические модели, основанные на фундаментальных теоремах электростатики, позволяют прогнозировать форму и параметры выходных сигналов датчиков различных конструкций. Установленные эмпирические и аналитические зависимости служат основой для интерпретации экспериментальных данных и проектирования новых приборов. Полученные результаты вносят существенный вклад в теорию и методы экспериментальной физики в части регистрации высокоскоростных микрочастиц.

Практическая значимость работы подтверждается актами внедрения и включает:

1. Создание и успешную эксплуатацию прибора "МЕТЕОР" на МКА "АИСТ-1Т", обеспечившего сбор уникальных экспериментальных данных о потоках микрометеороидов и электризации поверхности космического аппарата.
2. Разработку и изготовление научной аппаратуры "МЕТЕОР-М" в рамках международного контракта с Пекинским институтом инженерии космического пространства, что подтверждает мировой уровень разработок.
3. Создание модифицированных электродных систем и методик обработки сигналов для ускорителей микрочастиц, позволяющих повысить эффективность наземных испытаний материалов и элементов конструкций космических аппаратов.
4. Разработку патентованных конструкций малых космических аппаратов, использующих пленочные структуры и приемники ионов для мониторинга космического пространства.
5. Полученные эмпирические зависимости для различных материалов мишеней (медь, АМГ6, нержавеющая сталь), которые могут быть использованы при проектировании противометеороидной защиты и оценке деградации поверхностей космических аппаратов.

Оценка содержания и структуры работы.

Диссертация (325 страниц, 217 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 437 наименований) является завершенным научно-квалификационным исследованием, структура которого логично выстроена и полностью соответствует поставленной цели и задачам.

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, приведён обзор существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации

Первая глава содержит глубокий и всесторонний обзор современных методов регистрации пылевых микрочастиц, физических эффектов, лежащих в их основе, и конструкций датчиков. Автор не просто констатирует состояние дел, но и проводит критический анализ недостатков существующих решений (низкая чувствительность, сложность, большое количество мультиплексоров и т.д.), что позволяет сформулировать направления собственных исследований. Предложенная в главе методика регистрации на основе частотного анализа пленочных металлических полосков является оригинальной и хорошо обоснованной. Математическое моделирование с использованием S- и T-матриц передачи, а также последующие экспериментальные исследования прототипов ("змейка", спиральная катушка) убедительно доказывают работоспособность подхода, позволяя определять место разрыва по сдвигу резонансной частоты без использования многоканальной электроники. Это существенное достижение, решающее проблему массогабаритных ограничений.

Вторая глава посвящена приборам ионизационного типа. Автором детально рассмотрены общие принципы построения таких систем, включая расчет силы тока в измерительной цепи на основе теоремы Рамо-Шокли и модели колебаний нитяных электродов. Особую ценность представляет описание созданного прибора "METEOR", установленного на МКА "АИСТ-1Т". Приведены результаты космического эксперимента, включая регистрацию нескольких высокоскоростных частиц, что подтверждает работоспособность аппаратуры в реальных условиях. Также детально описан прототип ионизационного датчика с плоскопараллельными электродами, для которого получены важные эмпирические зависимости длительности импульса от скорости и заряда от массы. Это закладывает надежную основу для интерпретации данных. Разработка прибора "METEOR-M" с комбинированной системой электродов (нить/пластина) является логическим развитием и позволяет решить проблему снижения входной емкости и повышения чувствительности, что подтверждено экспериментально.

Третья глава содержит описание приборов пролетного типа для измерения вектора скорости и других параметров заряженных микрочастиц. В ней предложена и обоснована конструкция модульного сеточного прибора, позволяющего одновременно определять три компоненты скорости. Разработанные аналитические модели для оценки выходного сигнала с измерительной сетки, в том числе для струнных датчиков и наклонных сеток, являются важным теоретическим вкладом. Особого внимания заслуживает методика оценки параметров (массы, заряда, скорости) на основе предложенной конструкции. Проведенные расчеты погрешностей позволяют обоснованно выбирать геометрические размеры прибора (расстояние между сетками, напряжение смещения) для достижения требуемой точности (не более 5% при скорости до 10 км/с). Экспериментальная проверка прототипа шестисеточного датчика на ускорителе подтвердила основные теоретические положения.

Четвертая глава направлена на решение задач калибровки и отработки приборов на наземных ускорителях микрочастиц. Автором проведен анализ различных конструкций датчиков для ускорительного тракта, включая цилиндры Фарадея. Ключевым результатом является разработка и теоретическое обоснование (с использованием FEMM) новых модифицированных электродов. Создание трехэлектродной системы, расположенной на окружности, и разработанная методика обработки сигналов позволяют определять не только время пролета, но и координаты микрочастицы в поперечном сечении ускорителя, что критически важно для управления процессом ускорения. Полученные в главе результаты имеют самостоятельную ценность для развития экспериментальной базы.

Пятая глава рассматривает использование элементов конструкций самих космических аппаратов в качестве датчиков ударов. Автор рассматривает различные физические принципы (ионная эмиссия,

акустическая эмиссия, электромагнитное излучение). Наиболее значимым результатом является разработка концепции и создание макета МКА с большой площадью чувствительной поверхности (пленочная структура металл-диэлектрик-металл, приемник ионов). В этой главе предложены и защищены патентами несколько оригинальных конструкций МКА, использующих пленочные датчики, магнитную систему ориентации и развертываемые элементы, что позволяет существенно увеличить площадь детектирования без увеличения массы и габаритов базового блока.

В **заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, строго обоснованы. В работе наблюдается гармоничное сочетание глубоких теоретических разработок (моделирование полей, расчет сигналов, математическая обработка) с масштабными экспериментальными исследованиями (лабораторные испытания на ускорителях и космический эксперимент на борту МКА "АИСТ-1Т").

Безусловными **достоинствами** работы являются:

- высокий научный уровень и эрудиция автора, сочетание тонкого теоретического анализа с большим объемом экспериментальной работы;
- логичность и ясность построения диссертации, четкое структурирование материала по типам приборов;
- большой объем экспериментальных данных и их наглядная визуализация (более 200 рисунков);
- значительное количество публикаций (103 работы, включая 41 статью в журналах ВАК и 35 патентов), что свидетельствует о высокой активности и признании результатов научным сообществом.

Личный вклад автора

Личный вклад автора является определяющим на всех этапах работы: от анализа литературных источников, выявления научной проблемы и постановки задач по ее решению до проведения теоретических расчетов, численного моделирования, разработки и изготовления экспериментальных образцов, проведения лабораторных и космических экспериментов, обработки и интерпретации полученных данных. Результаты работы получены автором лично либо при его непосредственном участии. Постановка задач диссертационного исследования и обсуждение результатов проводились совместно с научным консультантом.

Недостатки в содержании и оформлении диссертации

По результатам анализа работы можно выделить следующие замечания и пожелания:

1. Диссертация содержит значительный объем технических деталей (подробное описание конструкций разъемов, креплений, конкретных номиналов элементов), часть которых могла бы быть вынесена в приложения.

Основной текст выиграл бы от большей концентрации на ключевых научных и методических результатах. Впрочем, это не снижает научной ценности работы.

2. В работе упоминается использование оптического канала синхронизации и частотного анализа для подавления помех, но отсутствуют количественные оценки эффективности этих мер (например, величина подавления помех в децибелах). Для практической реализации приборов такие оценки были бы полезны.

3. Предлагаемая методика оценки массы микрочастицы основана на априорно известной плотности и максимальной пробивной напряженности E_n . Однако в реальных условиях микрометеороиды могут иметь различную пористость и состав (ледяные, каменные, металлические). Отсутствие метода верификации плотности частицы *in-situ* ограничивает точность оценки массы для частиц неизвестного происхождения. Автор отмечает это косвенно (например, зависимость Q/m от материала мишени), но не предлагает способа решения проблемы для натурных измерений.

4. Для пленочных датчиков ("змейки", спирали), являющихся расходными элементами, не рассмотрена динамика снижения чувствительности при множественных повреждениях. Неясно, сохраняется ли работоспособность датчика после 5, 10 или 50 разрушенных дорожек и влияет ли это на вероятность регистрации новых частиц. Для длительных космических миссий этот аспект является критичным и требует дополнительного исследования.

5. В работе упоминается использование ПЛИС и SDR-технологий, однако не приведено детальной архитектуры обработки данных в режиме реального времени с учетом ограничений бортовых вычислителей. Вопрос отсеивания ложных срабатываний (например, от протонов радиационных поясов) и сжатия телеметрии для передачи на Землю требует более глубокой проработки при переходе к серийным образцам.

6. Хотя автор приводит калибровочные зависимости для скоростей до 2,5 км/с и до 10 км/с, микрометеороиды могут иметь скорость до 72 км/с. В работе не обсуждаются возможные ограничения и изменения характера физических процессов (например, переход к объемной ионизации, релятивистские эффекты) при регистрации частиц с такими скоростями.

Указанные замечания носят рекомендательный и дискуссионный характер, не влияют на достоверность основных научных положений и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы.

Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертационной работы могут найти практическое применение в следующих областях:

1. В космическом приборостроении:

- малогабаритные датчики на основе частотного метода (Глава 1) могут быть внедрены в группировки наноспутников формата CubeSat для оперативного мониторинга космического мусора;
- приборы ионизационного типа "МЕТЕОР-М" могут быть использованы для оснащения геостационарных спутников и пилотируемых станций (МКС, РОСС) в качестве систем предупреждения об ударах;
- разработанные методики позволяют создавать бортовые системы диагностики для подтверждения причин выхода аппаратов из строя (удар частицы как причина отказа электроники).

2. При испытаниях и разработке новых материалов:

- экспериментальные установки и методики (Глава 4) могут быть использованы для ускоренных ресурсных испытаний новых защитных экранов, покрытий солнечных батарей, радиаторов и оптических элементов;
- возможно также применение при тестировании "самозалечивающихся" и композитных материалов на воздействие высокоскоростных частиц.

3. В фундаментальных научных исследованиях:

- создание сети малых спутников с датчиками типа "МЕТЕОР-М" для построения глобальной карты распределения ненаблюдаемого КМ и космической пыли на различных орбитах;
- использование времяпролетных масс-спектрометров (Глава 3) для элементного анализа микрометеороидов и дифференциации частиц естественного и техногенного происхождения.

4. В учебном процессе:

- материалы диссертации могут быть использованы в учебных курсах по космическому приборостроению, физике космической среды, методам экспериментальной физики для магистрантов и аспирантов технических университетов;
- разработанные методики расчета и обработки сигналов могут быть включены в лабораторные практикумы по проектированию научной аппаратуры.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат диссертации в полной мере соответствует основному содержанию работы. В нем корректно и в сжатой форме отражены ключевые этапы исследования, основные научные результаты, положения, выносимые на защиту, а также выводы. Стиль изложения и структура автореферата соответствуют требованиям ВАК. При этом следует отметить, что автореферат мог бы быть более сфокусирован на семи защищаемых положениях, так как в текущей редакции он содержит значительный объем вводной и справочной информации, что несколько затрудняет быструю оценку новизны и значимости каждого положения. Однако это замечание носит рекомендательный характер и не влияет на общую положительную оценку.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением ВАК

Диссертационная работа Телегина Алексея Михайловича "Разработка методик, экспериментальных установок и бортовых приборов для регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического мусора" является завершенной, логически выстроенной и научно-обоснованной квалификационной работой. Она вносит существенный вклад в развитие методов и средств экспериментальной физики, космического приборостроения и физики околоземного космического пространства.

Соискателем решена крупная научная проблема, имеющая важное социально-экономическое и оборонное значение, – разработаны новые методы, приборы и экспериментальные установки для мониторинга потоков высокоскоростных микрочастиц, обладающие повышенной чувствительностью, помехозащищенностью и информативностью, что позволяет существенно повысить достоверность моделей засорения космоса и надежность проектируемых космических аппаратов.

По своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, а также достоверности полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным пунктам 9–14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Автор диссертации, Телегин Алексей Михайлович, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании подсекции 10.1 Научно-технического совета АО "ЦНИИмаш" 19 августа 2026 г., протокол № 14.

Главный ученый секретарь,
д-р техн. наук



В.Ю. Ключников

141070, Московская область, г.Королев, ул. Пионерская, 4
Тел.: 8-495-513 44-44, E-mail: Klyushnikovvyu@tsniimash.ru

Начальник Центра автоматических космических
систем и комплексов, д-р техн. наук



Е.М. Твердохлебова

141070, Московская область, г.Королев, ул. Пионерская, 4
Тел.: 8-495-513 59 23, E-mail: TverdohlebovaEM@tsniimash.ru