

УТВЕРЖДАЮ

Врио заместителя начальника
4 Центрального научно-
исследовательского института
Министерства обороны
Российской Федерации
по научной работе
кандидат технических наук, доцент



Н.Никифоров

« 7 » мая 2026 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Азановой Ирины Сергеевны
«Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов
интерферометрических датчиков физических величин»,
представленной на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук по специальности
1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

1. Общая характеристика работы и актуальность

Волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин (далее – ВОИД) нашли широкое применение в различных системах мониторинга состояния объектов (в том числе специальных). Наиболее представительным образцом ВОИД является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), основными компонентами которого, как и других ВОИД, служат источник оптического излучения, многофункциональная интегрально-оптическая схема (далее – СИОМ), а также чувствительный элемент на основе оптического волокна (далее – ОВ) с сохранением поляризации излучения.

Применение таких систем в космических аппаратах, на атомных силовых установках и других специальных объектах осуществляется при повышенном радиационном фоне, что может не только ослабить чувствительность ВОИД, но и привести к потере их работоспособности. Поэтому тема диссертации И.С. Азановой, посвященная вопросам обеспечения радиационно-оптической стойкости (далее – РОС) систем к воздействию как непрерывного, так и импульсного ионизирующего

излучения (далее – ИИ), является весьма **актуальной**.

Для проектирования ВОИД с необходимым уровнем РОС компонентов необходим учет таких факторов, как уровень напряженно-деформированного состояния ОВ, оптической мощности рабочего сигнала, температурного режима, вида и интенсивности воздействующего ИИ, технологии изготовления ВОИД.

Особую актуальность имеет необходимость разработки научных основ промышленной технологии производства оптических компонентов и одномодового ОВ с повышенной РОС.

Цель работы – определение основных физических закономерностей и разработка экспериментальных методов исследования влияния ИИ и технологии изготовления на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе и после облучения, а также создание физических основ промышленной технологии производства радиационно-стойких компонентов ВОИД.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

1) На основе разработанной методологии создан экспериментальный комплекс для исследования РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД при различных условиях облучения и температурных режимах.

2) Выполнен большой объем экспериментальных исследований РОС компонентов ВОИД на установках с импульсным и непрерывным режимами облучения.

3) Установлены основные физико-химические критерии, выполнение которых необходимо при создании промышленной технологии производства радиационно-стойкого ОВ с сохранением поляризации излучения.

4) Разработаны научные основы создания промышленной технологии производства оптических компонентов с повышенной РОС.

2. Краткая характеристика диссертации по автореферату

Диссертация И.С. Азановой выполнена в Пермском государственном национальном исследовательском университете. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и списка публикаций. Общий объем составляет 308 страниц, текст сопровождается рисунками и таблицами.

Во введении сформулированы актуальность, цель и задачи исследования, описаны объект и предмет, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, данные об апробации и личном вкладе автора.

В первой главе дан обзор по состоянию разработок волоконно-оптических гироскопов и интерферометрических датчиков, их компонентной базе, проведен анализ результатов исследований в стране и

за рубежом радиационной стойкости оптических волокон и интегрально-оптических схем. Отмечены фрагментарность и несопоставимость существующих данных, особенно в части совместного влияния вида излучения, температур и напряжённо-деформированного состояния волокна.

Во второй главе изложена методология исследований: использование непрерывного γ -излучения, импульсного тормозного и γ -нейтронного излучения в широком диапазоне доз и мощностей доз, температурном диапазоне от отрицательных до положительных температур; контроль спектров пропускания, радиационно-наведённого поглощения (РНП), поляризационных характеристик, оптической мощности и деформационного состояния волокон.

В последующих главах представлены результаты радиационных исследований анизотропных волокон типа «Панда» (PGeO, PSiO), изотропных кварцевых волокон, активных волокон и суперлюминесцентных источников (СВИ), интегрально-оптических схем, а также обобщение этих данных с оценкой вклада каждого волоконно-оптического компонента в радиационную стойкость ВОГ и других ВОИД.

Автореферат в целом даёт полное представление о структуре и основных результатах работы.

3. Феноменологическая модель и численный прогноз

Важной частью работы является построение феноменологической модели поведения волоконно-оптических компонентов и доказательство возможности численного прогнозирования их деградации.

В диссертации на основе большого массива экспериментальных данных для оптических волокон с нелегированной кварцевой и германо-силикатной сердцевиной сформулирована феноменологическая модель релаксации РНП при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения. Показано, что РНП во времени можно описать как сумму вкладов «короткоживущих» и «деформационных» центров, параметры которых зависят от условий облучения, температуры, входной оптической мощности и уровня напряжённо-деформированного состояния образцов. Полученные аппроксимационные зависимости позволяют численно прогнозировать изменение оптических потерь и времени восстановления характеристик как анизотропных волокон типа «Панда», так и изотропных волокон, при воздействии различных видов ионизирующего излучения и в различных температурных режимах.

Достоинством предлагаемой феноменологической модели является ее опора на детальное рассмотрение структуры стекла, природы радиационных центров окраски, роли легирующих примесей, кислородного баланса и напряжённо деформированного состояния, а не на формальную

аппроксимацию экспериментальных данных.

Таким образом, проведённый физический анализ обосновал возможность перехода от чисто экспериментального подхода к расчётно-экспериментальному прогнозу поведения чувствительного элемента, что полностью соответствует современным представлениям об обеспечении РОС навигационных и измерительных систем.

4. Научная новизна, теоретическая значимость работы, практическая значимость результатов для разработки измерительных и навигационных систем спецназначения

В диссертации в качестве базового прибора рассматривается волоконно-оптический гироскоп, однако полученные результаты и подходы имеют гораздо более широкий потенциал применения.

Во-первых, волоконно-оптические датчики различных типов всё активнее используются в качестве чувствительных элементов в системах мониторинга вибраций, деформаций, давления, температуры в составе сложных технических объектов, в том числе специального назначения. Для таких систем принципиально важно понимать, как будет изменяться чувствительность и уровень шумов датчика под воздействием ИИ и при изменении температур, а также иметь возможность заранее оценить их ресурс и остаточную работоспособность.

Предложенная в работе феноменологическая модель радиационно-наведённого поглощения и её температурной и деформационной зависимости создаёт возможность инженерного прогноза поведения волоконно-оптических чувствительных элементов не только в составе ВОГ, но и в составе других волоконно-оптических измерительных каналов аппаратуры спецназначения.

Во вторых, важным **практическим результатом** является разработка и внедрение промышленной технологии изготовления радиационно-стойких волокон с сохранением поляризации и изотропных одномодовых волокон для создания элементной базы для создания радиационно-стойких измерительных трактов. Наличие серийно выпускаемых волокон с подтверждённой РОС существенно упрощает разработку навигационных и измерительных систем, для которых требуется гарантированная работоспособность в условиях воздействия ионизирующих излучений.

В третьих, в диссертации сформулирован ряд практических рекомендаций по выбору параметров суперлюминесцентных источников, волоконных контуров и фотоприёмников, а также по учёту изменения спектральных характеристик источника и компенсируемых погрешностей, что может быть напрямую использовано при проектировании измерительных каналов с высокими требованиями к точности и стабильности.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается

в следующем.

1) Обоснован методический подход к исследованию РОС компонентов ВОИД, позволяющий минимизировать влияние погрешности определения уровня ИИ на достоверность определения РОС ВОИД в целом.

2) Получены новые данные по РНП оптических компонентов ВОГ, позволяющие прогнозировать РНП в оптическом тракте ВОИД при различных уровнях ИИ, а также проектировать волоконно-оптические приборы с повышенной РОС.

3) Заложены теоретические основы промышленной технологии изготовления радиационно-стойких ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной с сохранением поляризации излучения.

В совокупности это делает работу существенным вкладом в методологию обеспечения радиационной стойкости измерительных и навигационных систем специального назначения, основанных на волоконно-оптических принципах.

5. Соответствие паспорту специальности

Диссертационные исследования И.С. Азановой находятся на стыке физики конденсированного состояния, материаловедения и приборостроения и соответствуют пунктам 2, 4, 6 паспорта специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

С одной стороны, работа ориентирована на практические задачи создания и испытаний радиационно-стойких волоконно-оптических датчиков, включает разработку промышленной технологии и содержит значительный объём инженерно технологических результатов.

С другой стороны, её ядром является именно физический анализ процессов в стеклообразных средах под воздействием ионизирующего излучения:

- исследовано формирование и эволюция радиационных центров окраски в волокнах различного состава;

- проведен анализ связи между структурой стекла, внутренними напряжениями и радиационно-наведённым поглощением;

- использованы методы физико-химической кинетики и математические модели для описания релаксации РНП.

На основе физического анализа построена феноменологическая модель, а инженерные выводы выступают ее следствием.

Системный характер задания и решения поставленных задач, глубина физического анализа и разработка модели, пригодной для инженерного прогноза, позволяют считать диссертацию полноценной докторской работой по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

6. Достоверность, апробация и публикации

Достоверность результатов диссертации подтверждается:

- использованием аттестованных облучательных установок и измерительной техники;
- тщательно продуманной методикой проведения экспериментов, обеспечивающей сопоставимость результатов для различных типов волокон и компонентов;
- значительным объёмом экспериментальных данных и использованием современных методов их обработки;
- промышленным внедрением разработанных радиационно-стойких волоконно-оптических компонентов;
- широкой апробацией результатов исследования на российских и международных конференциях и семинарах, посвящённых радиационной стойкости волоконно-оптическим системам.

Основные результаты исследований опубликованы в 37 работах, получен патент на полезную модель и патент на изобретение.

7. Замечания

По содержанию автореферата можно высказать ряд замечаний.

1) Подробно рассмотрена физика процессов при воздействии ИИ на ВОИД и ОВ на уровне их отдельных компонентов (структура стекла, центры окраски, кинетика РНП). При этом вопросы интерпретации полученных зависимостей в терминах функциональной работоспособности конкретных приборов (при разных требованиях к чувствительности, дрейфу и допустимому уровню деградации сигнала) затронуты относительно кратко.

2) Полученные в диссертации результаты имеют широкий потенциал применения для различных классов ВОИД и измерительных каналов спецназначения, однако эта масштабируемость в автореферате обозначена лишь в общих формулировках. Представляется, что отдельного внимания заслуживает более предметное обсуждение того, какие элементы феноменологической модели являются универсальными для широкого класса ВОИД, а какие требуют перенастройки (и дополнительной валидации под конкретный тип датчика и режим эксплуатации).

Такое уточнение помогло бы избежать некорректных трактовок результатов, особенно со стороны специалистов, не связанных непосредственно с разработкой волоконно-оптических систем.

3) В автореферате не приведено обозначение аббревиатуры РНП.

Отмеченные замечания имеют характер пожеланий по дальнейшему развитию исследований и не оказывают влияния на научную и практическую ценность выполненной работы.

8. Заключение

Диссертация Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков

физических величин» является завершённой, крупной и самостоятельной научно-квалификационной работой. В ходе диссертационных исследований получены следующие результаты, имеющие важное значение для создания ВОИД с повышенной радиационной стойкостью.

1) Проведено комплексное исследование радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов ВОИД в условиях непрерывного и импульсного ионизирующего излучения и различных температур.

2) Установлены физические закономерности формирования и релаксации радиационно-наведенного поглощения в оптических волокнах различного типа.

3) Предложена и обоснована феноменологическая модель, позволяющая численно прогнозировать деградацию и восстановление волокон (как анизотропных, так и изотропных) при различных видах и режимах ионизирующего излучения в сочетании с температурным фактором.

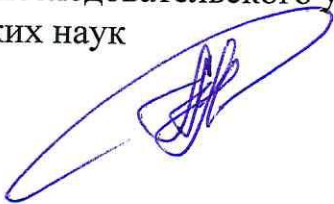
4) Разработаны физические основы промышленной технологии радиационно-стойких оптических волокон, внедрённой в серийное производство.

По содержанию и уровню научных результатов диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, и паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» является завершённой научно-квалификационной работой, соответствует паспорту заявленной научной специальности и требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 16 октября 2024 г.), а ее автор, Азанова Ирина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Начальник научно-исследовательского управления
кандидат технических наук

« 07 » мая 2026 г.



Карпов Анатолий Сергеевич

Старший научный сотрудник
научно-исследовательского отдела
доктор технических наук,

Щербинко Александр Васильевич

« 07 » мая 2026 г.

Начальник научно-исследовательского отдела
кандидат технических наук, доцент

Лептюхов Андрей Анатольевич

« 07 » мая 2026 г.

Старший научный сотрудник
научно-исследовательского отдела
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Мойсеенко Александр Владимирович

« 04 » мая 2026 г.