

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение Диссертационного совета от «16» мая 2025 г. № 7

о присуждении Петрову Владимиру Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Минимизация изотопического сдвига в балансной схеме датчика вращения на магнитном резонансе в ядрах ксенона» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 14.02.2025 г, протокол № 4, диссертационным советом 24.1.029.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.31-33, лит. А, приказ от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель: Петров Владимир Игоревич, 1969 года рождения, в 1994 г. окончил СПбГЭТУ им. В.И. Ленина (ЛЭТИ) по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы средств управления подвижными объектами». Диплом радиоинженера ФВ № 044719, выдан 28.02.1994 г.

Петров Владимир Игоревич был прикреплен к АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» для подготовки диссертации на соискание учёной степени кандидата наук без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 05.13.01 «Приборы навигации» с 06.10.2015 г. по 05.10.2018 г.

С 2015 года по настоящее время Петров Владимир Игоревич работает научным сотрудником в лаборатории 080 (проектной лаборатории по разработке гироскопа на ядерном магнитном резонансе).

Диссертация выполнена в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Научный руководитель: Вершовский Антон Константинович, доктор физико-математических наук, в настоящее время ведущий научный сотрудник лаборатории атомной радиоспектроскопии отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Козлов Глеб Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Фотоника» физического факультета ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) г. Санкт-Петербурга представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 1) К незначительным недостаткам работы относится, на мой взгляд, некоторая «несбалансированность материала» диссертации – очень подробно излагаются принципы магнитометрии и не вполне детально описывается, как магнитометрия позволяет определить неинерциальность системы координат, в которой находится датчик. Вместо подробного описания магнитометрии, возможно, следовало привести несколько конкретных конструкций датчиков вращения с подробным описанием их принципа работы и недостатков. Возможно, следовало бы более подробно остановиться на том, почему вращательная неинерциальность может быть интерпретирована как дополнительное магнитное поле, и так ли это.
- 2) Хотелось бы более подробного описания способа, с помощью которого можно с помощью атомного датчика обнаружить неинерциальность системы координат, в которой находится наблюдатель. Что наблюдается - сдвиг ларморовой частоты, если да, то какой - в ядерной или электронной системе? Как он связан с характеристиками неинерциальности? Как наблюдение двух типов атомов позволяет устранить неоднозначность, связанную с возможным изменением внешнего магнитного поля? Как бы ни были очевидны ответы на эти вопросы специалистам по атомной магнитометрии, они будут полезны для неспециалиста, желающего познакомиться с этими методиками. В этой связи кажется, что материал 1.6.1.4, 1.6.1.5 (Детектирование сигналов) возможно, кратко поместить ближе к Введению, с более подробным объяснением. Ведь возможно, диссертация будет использована как учебное пособие.
- 3) На стр. 72 сказано: "внутреннее поле $B_A(z)$ следует за распределением $P(z)$, демонстрирующим снижение градиента $dB_A(z)/dz$ ". Непонятно, какое снижение имеется в виду - во времени или в пространстве, и если в пространстве, то в каком направлении.
- 4) На Рис.18 А (стр.79) приведены "типичные ошибки эксперимента" при разных температурах. С чем связан такой быстрый, близкий к экспоненциальному, рост ошибки с уменьшением температуры?
- 5) На Рис.21 (стр.91) шкалы на врезке практически нечитаемы вследствие малого размера.
- 6) Текст диссертации содержит ряд стилистических погрешностей. Например, в главе 3 (стр. 71) сказано: "Ядра атомов ксенона, не способные к прямой оптической накачке, приобретают магнитный момент в процессе СООН (спин-обменной оптической накачки)". Ядра не приобретают и не теряют момент в процессе СООН, но моменты ядер ориентируются, и ансамбль атомов приобретает ненулевой средний ядерный момент. Кроме того, выражение "Ядра ... не способные к прямой оптической накачке" неточно сформулировано, поскольку ядра не осуществляют накачку, а являются ее объектом.

Сошенко Владимир Владимирович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отделения Оптики ФГБУН «Физического института имени П.Н. Лебедева РАН», г. Москва, представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 1) На странице 57 используется калька с английского языка «штарковское поле переменного тока». Следовало бы использовать термин «динамический эффект Штарка».

- 2) На странице 58 соотношение сигнал-шум для определения частот прецессии ксенона приведено с размерностью корень из Герц, в то время как соотношение сигнал-шум обычно безразмерная величина.
- 3) На рисунке 17 время на легенде стоило бы привести в единицах времени, а не в итерациях расчёта, это сделало бы график более читаемым.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, в своем **положительном заключении**, утвержденном проректором по научной работе ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), кандидатом физико-математических наук Фоминым Юрием Владимировичем, подписанном Лиокумовичем Леонидом Борисовичем, доктором физико-математических наук, профессором Высшей школы прикладной физики и космических технологий и Баранцевым Константином Анатольевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом Высшей школы прикладной физики и космических технологий указала, что диссертация Петрова В.И. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2, и отметила следующие замечания:

- 1) В главе 1 проанализированы квантовые методы измерения магнитного поля. К сожалению, в конце главы отсутствуют выводы, которые бы кратко позволили пояснить суть проделанной работы в данной главе.
- 2) Глава 2 состоит всего из 7 страниц. Было бы разумнее её содержание объединить, например, с главой 3.
- 3) В главе 2 на рис. 14 (нижний) имеются две экспериментальные точки, погрешность которых сильно отличается от остальных в большую сторону. Было бы полезным прокомментировать автору, почему так происходит.
- 4) В Главе 3 релаксация атомов цезия на стенках ячейки моделируется функцией, приведённой на стр. 76. В тексте диссертации не приводится обоснование выбора данной функции. Автору необходимо объяснить, какими физическими соображениями обоснован этот выбор.
- 5) В главе 4 речь идёт о численном моделировании. Однако автором не раскрыты пределы применимости данной модели. Было бы полезным прокомментировать область параметров, в которых применима предложенная математическая модель.
- 6) В Главе 5 на стр. 102 утверждается, что представленная одномерная модель компенсации градиента магнитного поля может быть обобщена на трёхмерный случай. Причём сообщается об оценках автора, которые показывают, что в силу осевой симметрии задачи влияние поперечных градиентов существенно подавлено по сравнению с влиянием продольного градиента, и в качественных расчетах можно пренебречь их влиянием. К сожалению, данные оценки в диссертации отсутствуют. Автору стоило бы привести количественные оценки и показать, что это действительно так.

Соискатель имеет **11 (одиннадцать)** опубликованных работ, в том числе **2 (два)** патента на изобретения, индексируемых в базах РИНЦ, SCOPUS и Web of Science, из них по теме диссертации **4 (четыре)**, в т.ч. из Перечня ВАК **4 (четыре)**.

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся 4 (четыре) публикации, опубликованные в журналах, состоящих в Перечне ВАК:

1. Вершовский А.К., Пазгалёв А.С., **Петров В.И.** Природа эффекта рассогласования частот прецессии ядер ^{129}Xe и ^{131}Xe при спин-обменной накачке атомами щелочного металла. Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44, №7, с. 88-94
2. **Petrov V.I.**, Pazgalev A.S., Vershovskii A.K. Isotope Shift of Nuclear Magnetic Resonances in ^{129}Xe and ^{131}Xe Caused by Spin-Exchange Pumping by Alkali Metal Atoms. IEEE Sensors Journal. 2020. V. 20, n. 2, p. 760-766.
3. Вершовский А.К., **Петров В.И.** Моделирование размерных зависимостей изотопического сдвига ЯМР в ксеноне. Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109), с. 11-24.
4. **Петров В.И.**, Вершовский А.К. Метод подавления изотопического сдвига в балансном квантовом датчике вращения на эффекте ядерного магнитного резонанса. Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 2 (117), с. 34-42.

На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:

- 1) От доктора физико-математических наук, профессора кафедры Лазерных измерительных и навигационных систем ФГАОУ ВО Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Венедиктова Владимира Юрьевича:

1.1. Автор рассматривает в диссертации ячейки только кубической конфигурации, тогда как шарообразные ячейки с отростком значительно более технологичны.

1.2. В главе 3 автор приводит результаты, полученные в одномерной численной модели системы. Почему автор ограничился одномерной моделью, и не учёл распределение внутреннего поля по всем трём координатам?

1.3. Термины «комагнитометр» и «комагнитометрический датчик» впервые встречаются на стр. 4, а объяснение этих терминов приводится только на стр. 11.

- 2) От доктора физико-математических наук, профессора кафедры Оптических и квантовых систем связи ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций (СПбГУТ) им. проф. М.А. Бонч-Бруевича Дудкина Валентина Ивановича:

Исследование проведено на высоком научном уровне, замечаний к работе нет. Вопросы, возникшие из-за недопонимания текста, разрешились при личной беседе.

- 3) От кандидата технических наук, главного специалиста Бюро научно-технического сопровождения работ НТК 325 Акционерного общества «Северо-Западный региональный центр Концерн ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод», старшего научного сотрудника Дружина Владимира Ефимовича:

Существенных критических замечаний по тексту автореферата нет. Можно сделать следующее замечание. В автореферате не представлена информация о перечне и значениях оптимальных параметров, полученных в результате моделирования, например, для конкретного набора внешних воздействующих факторов (ВВФ).

- 4) От кандидата физико-математических наук, доцента кафедры информационно-измерительных систем электроники и автоматики ФГБОУ ВО Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) Игнахина Владимира Станиславовича и от кандидата физико-математических наук, инженера кафедры информационно-измерительных систем электроники и автоматики ФГБОУ ВО Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) Секирина Игоря Всеволодовича:

4.1. Представляется не очень удачным использование терминов «квадратичный градиент поля» и «градиент второго порядка» вместо «квадратичный член в разложении V_z по z ».

4.2. Из текста автореферата непонятно, контролировались ли экспериментально магнитное поле и его градиент в области ячейки.

- 5) От кандидата химических наук, доцента, доцента кафедры общей и медицинской химии им. проф. В.В. Хорунжего ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет (СПбГПМУ) Минздрава России Сраго Игоря Александровича:

5.1. При описании научной новизны п. 2. почему-то отсутствует.

5.2. На рис. 3 вертикальными линиями показаны «типичные величины экспериментальной ошибки (СКО)», вероятно, среднеквадратичного отклонения. При этом, масштаб этой величины из графика неясен, а очертания кривых, соответствующих аппроксимации экспериментальных данных и численному расчёту, явно свидетельствуют о каком-то неучтённом в математической модели факторе.

- 6) От доктора физико-математических наук, заведующего отделом физических проблем квантовой электроники Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцина ФГБОУ ВО Московский государственный университет (НИИЯФ МГУ) им. М.В. Ломоносова Васильева Андрея Николаевича и от доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела физических проблем квантовой электроники Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцина ФГБОУ ВО Московский государственный университет (НИИЯФ МГУ) им. М.В. Ломоносова Умарходжаева Рауфа Муртазаевича:

Замечаний нет.

- 7) От кандидата физико-математических наук, доцента научно-образовательного центра математики, доцента научно-образовательного

центра фотоники и оптоинформатики ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет ИТМО (НИУ ИТМО) Попова Евгения Николаевича:

7.1. Несколько удивляет, что ссылка на наиболее близкую к диссертационному исследованию статью Т. Волкера и М. Ларсена, в которой описан построенный прототип датчика вращения на основе ядерного магнитного резонанса в ксеноне, отсутствует в кратком литературном обзоре автореферата, но она почему-то приведена далее при описании результатов 4-й главы.

7.2. В качестве пожелания хотелось бы видеть формулы не в тексте, а в виде отдельных пронумерованных вставок, тем не менее их малое количество не делает из этого проблемы.

7.3. Для обсуждения расчётов не хватает самой математической модели и уравнения эволюции спиновой поляризации. Особенно любопытно было бы посмотреть на слагаемые, в которых присутствуют феноменологические константы релаксации.

7.4. Также в автореферате не объяснено, каким образом в модели вычисляется средняя поляризация щелочных атомов в условиях непрерывной накачки. Без системы управляющих уравнений сделать вывод о качестве расчёта тяжело.

7.5. Согласие модели с опытом получено для некоторого выборочного набора параметров, поэтому хотелось бы увидеть, какие именно константы подбирались (и подбирались ли) для сведения численных кривых и экспериментальных точек.

8) От кандидата технических наук, заместителя генерального директора ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева Кривцова Евгения Петровича:

8.1. Недостаточно раскрыто, как в ходе экспериментов контролировалось магнитное поле и его градиент.

8.2. Величина среднеквадратического отклонения полученных экспериментальных результатов на рис. 3А для некоторых графиков чрезмерно велика, что может говорить о влиянии неучтённых в модели факторов.

9) От кандидата физико-математических наук, директора по разработкам АО «Морион» (г. Санкт-Петербург) Баранова Алексея Анатольевича:

9.1. В работе не рассматриваются иные варианты подавления ИС, основанные, например, на калибровке и компенсации ошибки показаний измерительного модуля.

9.2. В работе отсутствуют данные о чувствительности эффекта подавления при вариации рекомендуемых конструктивных параметров, а также о повторяемости результатов во времени.

10) От кандидата технических наук, доцента физики, доцента 10 кафедры Математических, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин ФГКВООУ ВО Михайловская военная Артиллерийская академия МО РФ Устинова Бориса Александровича:

К недостатку диссертационной работы следует отнести тот факт, что в ней рассматриваются процессы, происходящие только в кубических ячейках.

11) От кандидата технических наук, доцента, доцента 10 кафедры Математических, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин Михайловской военной Артиллерийской академии МО ФГКВОУ ВО Михайловская военная Артиллерийская академия МО РФ Жарковой Татьяны Викторовны:

Текст автореферата не даёт ответа на вопрос, каким образом определялось магнитное поле в ячейке и величина градиента поля. Если поле контролировалось, то какими приборами, каким образом тестировались КДВ (квантовые датчики вращения). Возможно, ответ существует в плоскости работы лаборатории.

12) От кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника, ведущего научного сотрудника лаборатории методов медицинской физики ФГБУН Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН (КФТИ КазНЦ РАН) Фаттахова Яхьи Валиевича:

Замечаний нет.

13) От доктора технических наук, заместителя генерального директора по научной работе АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП») (Ленинградская обл., г. Сосновый Бор) Павлова Николая Ильича:

В автореферате диссертации на рисунке 1В и рисунке 3Б приведены зависимости величины параметра изотопического сдвига δV_A от линейного градиента внешнего магнитного поля для температуры 75°C и 85 °C соответственно. Ход кривых существенно различается, что требует пояснения.

14) От кандидата физико-математических наук, заведующего научно-исследовательской лабораторией квантовой магнитометрии ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ им. Б.Н. Ельцина) Сапунова Владимира Александровича:

В качестве замечания к анализу источников погрешностей, в рамках рекомендаций для дальнейшей работы, можно обратить внимание на необходимость анализа перекрёстной помехи в тракте регистрации комагнитометра-гироскопа. Очевидно, автором используются узкополосные усилители, настроенные на частоты прецессии двух изотопов ядер Ксенона, но не проанализирована величина погрешности, которая может быть значительной, что известно из опыта развития протонных прецессионных градиентометров, где датчики разнесены физически, но уровень перекрестной наводки приводит к заметным ошибкам, а наличие градиента в объеме датчика приводит к снижению чувствительности.

15) От доктора технических наук, профессора кафедры «Физика» (ФН-4) Факультета «Фундаментальные науки» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана) Тимченко Светланы Леонидовны:

15.1. Хорошо бы связать результаты численного моделирования с влиянием ИС /изотопического сдвига/ на ошибки измерений подобных систем при заданном интервале температур. Например, сказано, что в датчике с кубической ячейкой, характеризуемой внутренним линейным размером 2 мм, применение данных методов позволяет снизить систематическую ошибку с 0,17 град/час/мК до $2,5 \cdot 10^{-4}$ град/час/мК, то есть примерно в 700 раз. Каковы параметрические связи в такой системе и есть ли их оптимальное сочетание?

15.2. Почему автор рассматривает только продольное распределение магнитного поля и не уделяет внимания поперечному распределению?

16) От доктора физико-математических наук, профессора кафедры физической электроники и технологии ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Устинова Алексея Борисовича:

В качестве замечания можно отметить отсутствие в автореферате данных о погрешностях измерения экспериментальных характеристик.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в областях спектроскопии, магнитометрии, квантовой оптики и общей физики, в том числе гироскопии, что подтверждается публикациями, в которых рассматриваются вопросы, связанные с тематикой диссертационного исследования соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

выдвинута и обоснована гипотеза возникновения изотопического сдвига в балансной схеме КДВ (квантового датчика вращения);

предложен метод подавления изотопического сдвига в традиционной продольной схеме квантового датчика вращения, путём обеспечения условий, при которых внутренние поля оказывают равнозначное влияние на оба изотопических канала. Для этого предлагается создать внешнее корректирующее магнитное поле, имеющее линейную и квадратичную составляющие градиента вдоль оси чувствительности датчика;

создана численная модель процесса релаксации активных составляющих газовой смеси газовых ячеек квантового датчика вращения, позволяющая определить длительности релаксации двух изотопов ксенона за время их полной эволюции, а также распределение поляризованных атомов щелочного металла и изотопов ксенона вдоль ячейки в направлении распространения света накачки в течении эволюции одного поколения поляризованных атомов изотопов ксенона;

предложены решения, улучшающие характеристики датчика на основе теории релаксации неравновесного состояния атомов, разработанной У. Хаппером и М. Ромалисом с коллегами, С. Зельтцером;

показано, что оптимальной температурой, с точки зрения чувствительности КДВ (квантового датчика вращения), можно считать значение, обеспечивающее такую концентрацию паров ЩМ (щелочного металла), при которой достигается компромисс между чувствительностью к изменению магнитного поля и однородностью условий поглощения света в ячейке при заданной интенсивности накачки;

выполнен расчёт значений оптимальной температуры и оптимального давления в ячейках кубической формы для различных линейных размеров внутреннего ребра таких ячеек в диапазоне 0,1 – 2,0 см;

сделан вывод о невозможности компенсации изотопического сдвига только линейным градиентом в газовых ячейках с длиной ребра менее 5 мм;

предложено для компенсации изотопического сдвига использовать помимо линейного градиента ещё и квадратичный градиент внешнего приложенного магнитного поля, для чего **была применена** тройная система тонких магнитных колец;

сделан вывод о значительном, примерно в 700 раз, снижении величины параметра изотопического сдвига в случае применения предложенной системы компенсации по сравнению с устройством датчика без системы компенсации при организации датчика вращения на газовой ячейке, имеющей размер ребра 2 мм.

Теоретическая значимость работы.

- 1) **Дана интерпретация** физических эффектов, возникающих в газовой ячейке конечной толщины в условиях оптически плотной среды внутри ячейки. Показано, что в условиях несовпадения времен релаксации коллективного магнитного момента двух изотопов ксенона в такой ячейке возникает эффект ИС /изотопического сдвига/.
- 2) Разработанная численная модель **позволяет** проводить теоретические исследования изотопического сдвига при различных сочетаниях параметров датчика: различных температурах, интенсивностях падающего света, приложенных линейных градиентах магнитного поля и давлениях газовой

смеси, что, в свою очередь, **позволяет** проводить оптимизацию параметров рабочих ячеек и условий их работы в проектируемых квантовых датчиках.

- 3) Исследование эволюции магнитных моментов атомов рабочей газовой среды ячейки, **позволяет** лучше понять особенности взаимодействий накаченных атомов с внутренними и внешними магнитными полями газовой ячейки. Как следствие, **получены** данные об эволюционных процессах для ансамблей атомов в широком диапазоне условий окружающей среды, состава газовой смеси и размеров газовых ячеек.

Практическая значимость работы состоит в том, что результаты проведённых исследований **могут быть применены** при разработке квантового датчика вращения в целях его миниатюризации и существенного повышения стабильности. При этом **может быть использована** стандартная двулучевая квантовая магнитометрическая схема, **не требующая** усложнения ни оптической, ни электронной систем.

Для работы квантового датчика вращения **может быть применено** продольное постоянное поле порядка 10 мкТл и более, что пропорционально увеличивает динамический диапазон квантового датчика вращения по сравнению со схемами, использующими для уменьшения изотопического сдвига поперечную импульсную накачку в слабом поле.

Предложенные решения, способствуют улучшению характеристик КДВ на основе принятых в качестве оптимальных условий функционирования газовых ячеек (освещённости светом накачки, температуры, давления газовой смеси).

Результаты диссертации могут быть использованы рядом организаций, задействованных в разработке и производстве навигационного оборудования.

Газовые ячейки (ГЯ), особенности применения которых рассмотрены в диссертации, используются для построения навигационных и измерительных устройств в

1. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (г.Санкт-Петербург);
2. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе (г.Санкт-Петербург);
3. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г.Санкт-Петербург);
4. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (г.Санкт-Петербург);
5. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)» (г.Санкт-Петербург);
6. Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН (ИЛФ СО РАН) (г.Новосибирск);
7. Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт АО «ГНИНГИ» (г.Санкт-Петербург).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что научные положения, выводы и результаты, содержащиеся в диссертации, подтверждаются использованием признанных, апробированных и обоснованных физических

методов, комплексным характером выполненных экспериментов и исследований численными методами с использованием лицензионных программных пакетов, а также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием метрологически поверенного оборудования. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими оценками и моделированием.

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Доклад на конференции «Magnetic resonance and its applications – 13th International Youth School-Conference «Spinus» («Магнитный резонанс и его приложения – 13-я международная молодёжная школа-конференция «Спинус»»), В.И. Петров, Р.К. Сперанский, Е.Н. Попов, «Non-magnetic heat controller in scheme of quantum magnetometer and the angular velocity sensor» («Немагнитный терморегулятор в схеме квантового магнитометра и датчика угловой скорости»), 2016 г.
2. Доклад на конференции «XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова», В.И. Петров, А.С. Пазгалёв, А.К. Вершовский, «Исследование эффекта рассогласования балансной схемы гироскопа на ЯМР», 2018 г.
3. Доклад на конференции «Magnetic resonance and its applications – 16th International Youth School-Conference «Spinus» («Магнитный резонанс и его приложения – 16-я международная молодёжная школа-конференция «Спинус»»), В.И. Петров, А.С. Пазгалёв, А.К. Вершовский «Isotopic shift of Xe nuclei precession frequencies caused by spatial inhomogeneity of optically oriented alkali atoms» («Исследование изотопического сдвига частот прецессии ядер ксенона в присутствии оптически ориентированных щелочных атомов»), 2019 г.
4. Доклад на конференции «XXIV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», (НМММ – 2021). Петров В.И., Вершовский А.К. «Зависимость предельной точности балансного квантового ЯМР датчика вращения от размера газовой ячейки», 2021 г.

Личный вклад соискателя:

Автор разработал для экспериментальной установки ряд электронных блоков, использованных для обеспечения функционирования исследуемой ячейки и считывания сигналов коллективного спина квантовой системы.

Автор провёл поиск температурной зависимости ИС в ряде газовых ячеек, в выбранных ячейках автором проведено подробное исследование температурной зависимости, комплексное исследование её параметров при взаимодействии со светом накачки различной интенсивности и с приложенным градиентом магнитного поля. Эти данные легли в основу численной модели.

При помощи численной модели, разработанной совместно с руководителем, автором проведено теоретическое исследование изменения характеристик газовых ячеек в зависимости от размера кубической ячейки – длины её внутреннего ребра. Проведено численное исследование предельной точности балансного квантового

датчика вращения, построенного на такой ячейке, определён минимальный допустимый размер ячейки и условия функционирования датчика вращения, построенного на такой ячейке, с минимальным сдвигом нуля, вызванным изотопическим сдвигом и минимальными значениями частных производных такого сдвига.

Кроме того, автор участвовал в подготовке научных публикаций совместно с соавторами, а также представлял результаты работы на конференциях.

На заседании 16 мая 2025 года Диссертационный совет принял решение присудить **Петрову Владимиру Игоревичу** учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве **16** человек, из них **16** докторов наук, участвовавших в заседании, из **21** человека входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **16**, против – **нет**, недействительных бюллетеней – **нет**.

Председатель
Диссертационного совета
д.т.н., профессор



В.Е. Курочкин

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

Дата оформления заключения
16 мая 2025 г.

М.П.