

## Концепция создания и применения помехозащищенных систем автономной навигации по геофизическим полям

© В. Ф. Фатеев, О. В. Денисенко, А. М. Каверин, И. С. Сильвестров, Д. С. Бобров

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Московская обл., Россия

### Реферат

Основой систем автономной навигации (САН) управляемых средств в настоящее время являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), способные самостоятельно определять движение объекта навигации. Однако БИНС применимы только на начальном участке трассы движения, на протяженных трассах показания БИНС необходимо корректировать. В статье предложена Концепция создания и применения помехозащищенных САН по геофизическим полям, которые основаны на комплексном использовании БИНС и измерителей параметров гравитационного и магнитного полей Земли (ГПЗ и МПЗ).

Цель разработки Концепции состояла в определении основных путей развития теоретических и экспериментальных основ комплексных геофизических САН, в том числе для обеспечения «беспроводной» навигации, в определении направлений их фундаментального и метрологического обеспечения, а также в расширении областей их применения. На основе математического моделирования авторами проведена оценка ожидаемой точности комплексных геофизических САН, которые подтверждены испытаниями макетов САН. На основе оценки точности обоснованы требования к измерителям ГПЗ и МПЗ. Проведены оценки требований к точности измерителей в режиме «беспроводной» навигации. Проанализирован имеющийся мировой и отечественный задел по геофизическим САН, представлены возможности использования новых измерителей ГПЗ и МПЗ, которые могут применяться для построения навигационных карт и для измерения текущих параметров полей на борту объекта навигации. Особое внимание авторами уделено состоянию и возможностям применения высокоточных квантовых атомных и квантовых оптических (лазерных) измерителей, которые обладают исключительными возможностями для повышения точности и оперативности измерений. Представлены возможности создания и применения оригинальных космических бортовых измерителей для построения навигационных карт на удаленных территориях. Все новые предложения защищены патентами.

Для фундаментального обеспечения САН предложена геодезическая сеть «Квантовый футшток», которая реализуется на стандартах частоты и времени с нестабильностью от  $10^{-17}$  до  $10^{-19}$ . Сеть предназначена для создания высокоточной высотной основы страны, включая Арктический регион. Рассмотрены направления развития эталонной гравиметрической базы геофизических САН.

К реализации положений Концепции предлагается пригласить исполнителей из Минпромторга, Росстандарта, Росатома, Росреестра, Роскосмоса и других заинтересованных ведомств.

**Ключевые слова:** автономная навигация, гравитационное поле Земли, магнитное поле Земли, геофизические поля, гравиметр, магнитометр, гравитационный градиент, квантовый атомный гравиметр.

*Контакт для связи:* Фатеев Вячеслав Филиппович ([generalfat@mail.ru](mailto:generalfat@mail.ru)).

**Для цитирования:** Фатеев В. Ф., Денисенко О. В., Каверин А. М., Сильвестров И. С., Бобров Д. С. Концепция создания и применения помехозащищенных систем автономной навигации по геофизическим полям // Труды ИПА РАН. 2025. Вып 74. С. 42–56.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.74.42-56>

## The Concept of Creation and Application Geophysical Fields Based Autonomous Navigation Interference-Resistant Systems

V. F. Fateev, O. V. Denisenko, A. M. Kaverin, I. S. Silvestrov, D. S. Bobrov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleev settlement, Moscow region, Russia

### Abstract

The foundation of autonomous navigation systems (ANS) for vehicles currently relies on strapdown inertial navigation systems (SINS), which can independently determine the vehicle's movement. However, SINS are effective only on the initial segment of a route; for extended journeys, their readings require correction. This article proposes a concept for the development and application of interference-resistant geophysical navigation systems (SANs), based on the integrated use of SINS and measurements of Earth's gravity and magnetic fields (EGF and EMF).

The purpose of developing the Concept was to define the main strategies for advancing the theoretical and experimental bases of integrated geophysical SANs, including ensuring "seamless" navigation, identifying their fundamental and metrological support foundations, and expanding their application areas. Through mathematical modeling, the au-

thors assessed the expected accuracy of integrated geophysical SANs, which was confirmed by tests of prototype systems. Based on these accuracy evaluations, requirements for EGF and EMF meters were established. The study also analyzed current global and domestic capabilities in geophysical SANs and explored the potential use of new EGF and EMF meters, capable of constructing navigation maps and measuring current field parameters onboard vehicles. Special attention was given to the state and potential of high-precision quantum atomic and quantum optical (laser) meters, which possess exceptional capabilities for enhancing measurement accuracy and efficiency. The article presents possibilities for developing and utilizing original space-based onboard measuring devices to create navigation maps in remote regions. All proposed innovations are protected by patents.

To support the fundamental infrastructure of SANs, the “Quantum Footstock” geodetic network is proposed, utilizing frequency and time standards with stability ranging from  $10^{-17}$  to  $10^{-19}$ . The aims to establish a high-precision altitude reference system for the country, including the Arctic region. The article also discusses directions for developing a reference gravimetric base for geophysical SANs.

It is proposed to invite key stakeholders from the Ministry of Industry and Trade, Rosstandart, Rosatom, Rosreestr, Roscosmos and other interested agencies to implement the provisions of the Concept.

**Keywords:** autonomous navigation, Earth's gravitational field, Earth's magnetic field, geophysical fields, gravimeter, magnetometer, gravitational gradient, quantum atomic gravimeter.

Contact: Vyacheslav F. Fateev (*generalfat@mail.ru*).

**For citation:** Fateev V. F., Denisenko O. V., Kaverin A. M., Silvestrov I. S., Bobrov D. S. The Concept of creation and application geophysical fields based autonomous navigation interference-resistant systems // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 74. P. 42–56.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.74.42-56>

## Введение

Наиболее распространенным средством коррекции навигационных решений БИНС являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), однако в условиях преднамеренных помех они работают неустойчиво. В качестве систем коррекции навигационных решений БИНС могут использоваться корреляционно-экстремальные навигационные системы, основанные на измерении профиля текущей высоты рельефа и изображений участков местности. Однако такие системы коррекции неприменимы над океаном и равнинной местностью, что неприемлемо для протяженных трасс движения объекта навигации.

Глобальность и устойчивость бортовой системы автономной навигации (САН) в условиях помех можно обеспечить за счет дополнительных измерений на борту средствами навигации параметров геофизических полей: гравитационного и магнитного полей Земли (ГПЗ и МПЗ).

По проблемам создания и применения геофизических САН во ФГУП «ВНИИФТРИ» в период 2017–2024 гг. проведены три Всероссийские научно-технические конференции. В статье предложена Концепция создания и применения помехозащищенных САН по геофизическим полям.

Цель разработки Концепции состоит в определении основных путей развития теоретических и экспериментальных основ геофизических САН для обеспечения «бесшовной» навигации, в определении направлений их фундаментального и метрологического обеспечения, а также областей применения.

## Оценка точности геофизической системы навигации и требования к измерителям ГПЗ и МПЗ

Оценка достижимой точности комплексной системы автономной навигации с использованием ГПЗ проведена с использованием специальной модели (Денисенко и др., 2020). При этом использовались совместные измерения БИНС (с уходом 1.8 км/ч), измерения ускорения свободного падения (УСП) и гравитационного градиента (ГГ). Для моделирования использовались карты УСП и карты ГГ, соответствующие предгорному (холмистому) району.

Оценка точности навигации с использованием МПЗ выполнена для участка размером  $250 \times 500$  км на уровне моря.

На основе моделирования навигации по параметрам ГПЗ получены следующие основные результаты (рис. 1а–с):

а) при погрешности измерения УСП в 1 мГал и погрешности навигационно-гравиметрической карты в 0.1 мГал (рис. 1а), погрешность навигации составляет 380–710 м;

б) при погрешности измерителя ГГ 5 Этвеш, а также при погрешности карты 1–10 Этвеш (рис. 1б), погрешность навигации составила 510–1020 м;

в) при совместном использовании измерений комплекса БИНС+УСП+ГГ погрешность навигации уменьшается на 15 % (рис. 1с).

При использовании МПЗ достижимые в настоящее время погрешности навигации в целом соизмеримы с вариантом использования ГПЗ и составляют сотни метров (рис. 1 д).

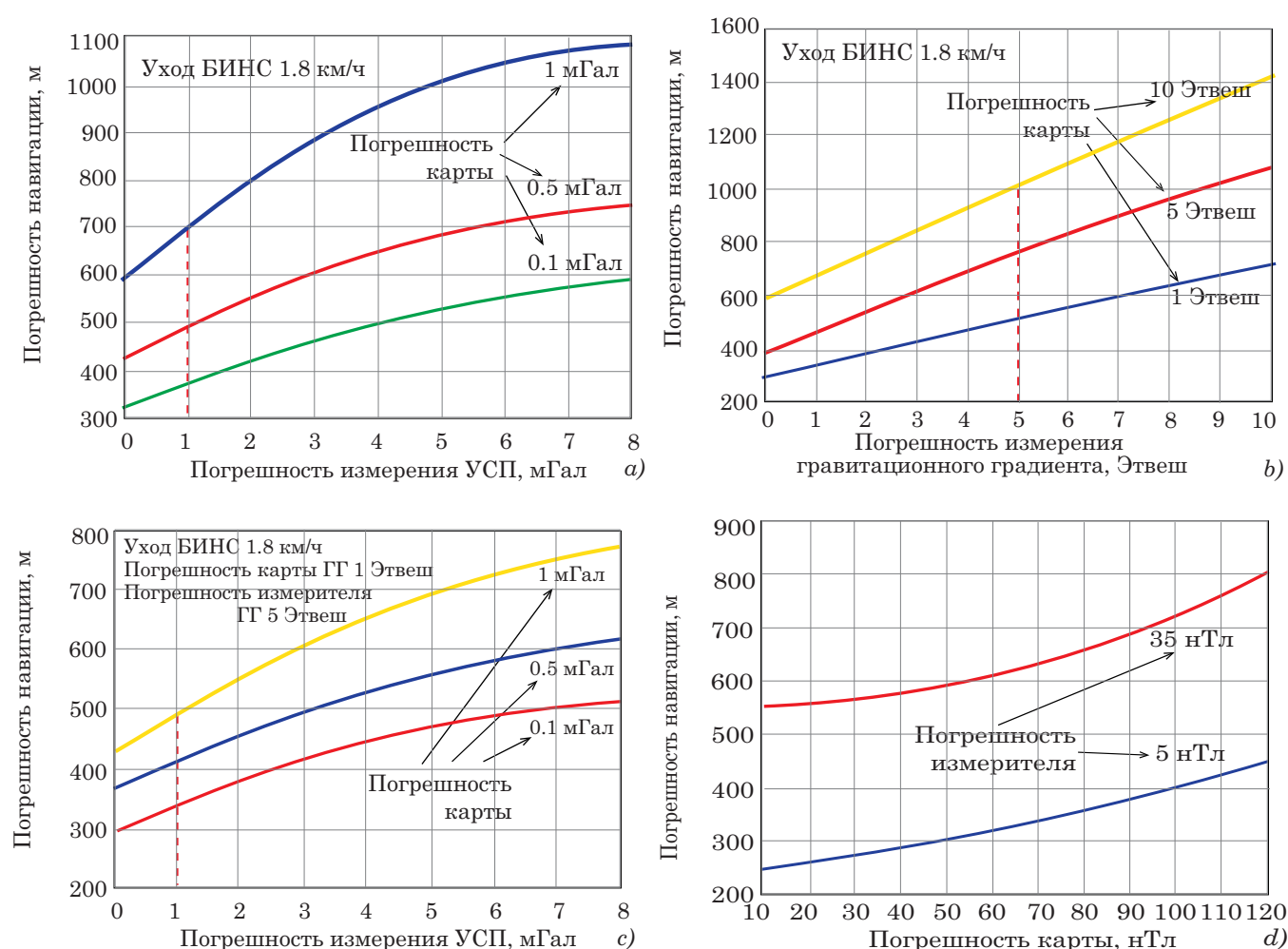


Рис. 1. Результаты моделирования погрешности комплексной геофизической системы навигации: а) по измерениям БИНС+УСП; б) по измерениям БИНС+ГГ; в) по измерениям БИНС+УСП+ГГ; д) по измерениям БИНС+МПЗ

Исходя из результатов моделирования, можно сформулировать следующие требования для измерителей параметров ГПЗ с целью обеспечения точности навигации в сотни метров на холмистом рельефе: погрешность измерений бортовых гравиметров и градиентометров должна составлять 0.5–1.0 мГал и 2–3 Этвеш соответственно. Для осуществления «беспроводной» навигации, которая должна обеспечивать погрешность, соизмеримую с точностью ГНСС ГЛОНАСС/GPS, требования более жесткие: для бортовых гравиметров погрешность измерений должна быть не более 0.01 мГал, для градиентометров — не более 0.1 Этвеш.

#### Имеющийся задел по геофизическим САН

В одной из зарубежных работ ([Canciani, Raquet, 2017](#)) рассмотрена магнитометрическая САН летательного аппарата, включающая скалярный квантовый и феррозондовый магнитометры, размещенные на выносном стингере, а также БИНС и барометр. Частота измерений скалярного магнитометра составляет 20 Гц, чувствительность — 0.02 нТл/Гц<sup>1/2</sup>, погрешность измерений — 0.15 нТл.

Опорная карта аномального МПЗ (АМПЗ) для задачи навигации имеет размеры примерно 35 × 35 км, она имеет высокий контраст и многополосную структуру. Значения АМПЗ изменяются от –200 до +800 нТл с СКО 104 нТл на пространственном интервале 1–3 км. В целом, карта МПЗ является сильно аномальной. Схема измерений с совместным использованием скалярного квантового и векторного феррозондового магнитометров, размещенных на выносном стингере, позволила авторам откалибровать влияние магнитных полей самолета. Испытания САН проходили на высоте полета 300 м, время полета — 1 ч, маршрут движения проложен поперек полос карты значений АМПЗ. Погрешность навигации составила около 13 м.

В другой зарубежной работе ([Gnadt, 2022](#)) рассмотрена воздушная САН, включающая 4 скалярных и 3 феррозондовых магнитометра, БИНС, барометр и вспомогательное оборудование. Погрешность опорной карты АМПЗ составляет примерно 6.5 нТл. Влияние самолета на показания магнитометра рассмотрено применительно к вы-

сокодинамичным самолетам, когда размещение магнитометров на выносном стингере становится невозможным. Для решения этой проблемы авторами предложен и исследован метод учета влияния самолета при размещении магнитометров внутри самолета.

Новый подход к решению проблемы заключается в использовании технологии машинного обучения и использовании дополнительных измерительных данных во время полета. Дело в том, что эти дополнительные данные позволяют лучше наблюдать за состоянием магнитного поля самолета, а машинное обучение поможет изучить взаимосвязь между данными полетных измерений и магнитным полем, создаваемым самолетом. В целом погрешность навигации в данной САН не превышает 42 м.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан и испытан бортовой макет системы навигации наземного транспортного средства по одновременным измерениям параметров слабо аномальных ГПЗ и МПЗ. В его состав входят БИНС, средства определения параметров магнитного поля (магнитометр и магнитный градиентометр), а также измеритель путевого профиля ускорения свободного падения — малогабаритный бортовой гравиметр, разработанный во ФГУП «ВНИИФТРИ». При подготовке навигационных карт был использован участок дороги в Подмосковье. В целом, погрешность комплексной системы навигации на маршруте не превысила 900 м.

Кроме того, во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан и испытывается макет САН по МПЗ на основе использования БПЛА типа квадрокоптера. Основой САН является квантовый магнитометр с погрешностью  $< 1$  нТл и БИНС на основе МЭМС-датчиков. Для учета вариаций МПЗ во время измерений используется собственная перебазируемая магнито-вариационная станция. Испытания макета магнитометрической САН проводятся на специальном испытательном полигоне. Предварительно выполненные измерения АМПЗ по двум маршрутам на полигоне показали его высокую аномальность ( $\approx 150$  нТл), что обеспечивает погрешность навигации до 100 м.

Экспериментальный образец магнитометрической навигационной системы летательного аппарата, использующей принцип корреляционно-экстремальных навигационных систем, разработан в АО «РПКБ» (Сазонова, 2020). Он включает: инерциально-спутниковую навигационную систему «КомпаНав-3»; магнитометр цифровой трехкомпонентный феррозондовый МЦТ-7 с погрешностью 20 нТл; квантовый магнитометр «Аэромастер» с погрешностью 8 нТл, а также вспомогательное оборудование. Опорные карты аномального МПЗ (АМПЗ) имели погрешность порядка 10–20 нТл и были созданы для высоты 450 м. Карта условно

разделяется на слабо-аномальные районы (СКО значений АМПЗ  $\leq 40$  нТл), умеренно-аномальные районы ( $80 \text{ нТл} > \text{СКО} \geq 40 \text{ нТл}$ ) и сильно аномальные районы ( $\text{СКО} \geq 80 \text{ нТл}$ ). Феррозондовый и квантовый магнитометры размещались на выносном стингере в хвосте самолета. При этом измерения высокоточного квантового магнитометра использовались для решения задачи навигации, а феррозондовый магнитометр — для учета влияния носителя на показания квантового магнитометра.

Испытания магнитометрической навигационной системы проводились на высотах 450 м, 2000 м и 4000 м. Так как опорная карта АМПЗ соответствовала высоте 450 м, для ее редуцирования на другие высоты авторы использовали метод преобразования Фурье, который обеспечил погрешность редуцирования около 5 нТл. По итогам испытаний получены следующие погрешности навигации: для умеренного АМПЗ — 588 м; для сильного АМПЗ — 410 м.

Как следует из вышеизложенного, главные проблемы создания помехозащищенных геофизических САН заключаются в подготовке высокоточных карт параметров МПЗ и ГПЗ и в создании высокоточных датчиков геофизических полей.

### **Новые наземные геофизические средства подготовки навигационных карт**

#### *Высокоточный относительный гравиметр «Пешеход»*

Принцип действия малогабаритного носимого высокоточного относительного гравиметра (ВОГ) «Пешеход» основан на измерении растяжения металлической пружины, изготовленной из специального сплава, с помощью емкостного высокочастотного датчика информации. К настоящему времени создан и испытан макет гравиметра с термостатированным корпусом. Термостат обеспечивает точность поддержания температуры чувствительного элемента около 0.001 градуса. Организованы работы по подготовке к серийному производству ВОГ «Пешеход». Заканчиваются работы по созданию трех предсерийных экземпляров гравиметра (рис. 2). Выполнены предварительные лабораторные испытания гравиметров методом наклонов и методом перемещений. Испытания показали, что погрешность предсерийных экземпляров гравиметра находится на уровне 5 мкГал, управление прибором дистанционное и реализуется с помощью выносного блока. Готовится серийное производство ВОГ «Пешеход», получены два патента на изобретения, две заявки на патент находятся на рассмотрении в ФИПС.

Применение прибора предполагается при создании навигационных карт для помехозащищенных систем автономной навигации по ГПЗ,



Наименование характеристики	Значение
Длина, мм	245
Ширина, мм	202
Высота, мм	235
Масса, кг	4.5
Потребляемая мощность, Вт	8
Погрешность измерений, мкГал	Не более 5
Диапазон измерений, Гал	$\pm 9$



Рис. 2. Малогабаритный носимый высокоточный относительный гравиметр «Пешеход»

в геологии при поиске полезных ископаемых, а также при проведении инженерно-изыскательных работ. Гравиметр «Пешеход» является аналогом зарубежного гравиметра Scintrex CG-6 по точности и эксплуатационным свойствам. Вместе с тем, по сравнению с ним он обладает целым рядом преимуществ, наиболее важные из которых заключаются в следующем: 1) более высокая ударостойкость в полевых условиях, поскольку используется металлический чувствительный элемент (Scintrex CG-6 оснащен хрупким кварцевым чувствительным элементом); 2) возможность серийного конвейерного изготовления всех элементов прибора, в том числе чувствительного элемента (кварцевый чувствительный элемент Scintrex CG-6 изготавливается вручную); 3) высокая ремонтпригодность, поскольку неисправные детали могут быть изъятые и легко заменены.

### Абсолютные квантовые гравиметры

Для обеспечения точности навигации в сотни метров на холмистом рельефе погрешность измерений бортовых гравиметров не должна превышать 1.0 мГал. Однако для осуществления «бесшовной» навигации, при которой погрешность навигации соизмерима с погрешностью ГНСС, погрешность гравиметров должна быть на 1–2 порядка меньше. Традиционные технологии гравиметрии такую погрешность пока не обеспечивают. В этой связи для создания высокоточных систем автономной навигации авторами предлагается создание высокоточных квантовых измерителей параметров ГПЗ, основанных на новых достижениях в физике. Проведенный анализ ([Фатеев, 2024](#)) позволил выявить перспективные возможности повышения точности у целого ряда квантовых измерителей, которые могут быть использованы при создании САН по геофизическим полям.

При измерении абсолютных значений ускорения свободного падения в ГПЗ в настоящее время наиболее широкое распространение получили квантовые оптические, или лазерные, абсолютные баллистические гравиметры (АБГ). В этих приборах используется лазерный принцип измерения параметров падения оптического уголкового отражателя с высоты в несколько сантиметров. В РФ изготовлены и используются отечественные лазерные АБГ: «ГРОТ» с погрешностью измерений 4 мкГал), а также полевой АБГ ГАБЛ (изготовитель СО РАН) с погрешностью 5 мкГал. Работа по повышению точности квантовых оптических АБГ продолжается.

Несмотря на высокие достигнутые показатели точности, лазерные АБГ обладают крупным недостатком: на развертывание, проведение измерений ускорения свободного падения в одной точке и приведение прибора в исходное транспортное состояние требуется около трёх суток.

В связи с изложенным, в последние годы в целом ряде зарубежных фирм созданы рабочие группы специалистов и развернуты работы по созданию абсолютных квантовых (атомных) гравиметров (АКГ) на холодных атомах. В приборах «фонтанного» типа используется интерференция материальных волн де Бройля двух вертикально падающих в гравитационном поле потоков холодных атомов.

Наибольшие успехи в создании АКГ «фонтанного» типа за рубежом достигнуты следующими исследовательскими группами: группой доктора Стивена Чу (США, точность 2–3 мкГал), группой LNE-SYRTE (Франция, точность 1–2 мкГал); группой университета Humboldt (Германия, транспортируемый АКГ чувствительностью 20 мкГал/√Гц); группой университета Huazhong (Китай, стационарный АКГ точностью несколько единиц мкГал). Китайский прибор выставлен на продажу.

Квантовые атомные гравиметры «фонтанного» типа обладают *более высокой оперативностью*, нежели лазерные АБГ: ожидаемое время измерения в одной пространственной точке составляет 1–1.5 ч.

Главный недостаток и лазерных АБГ и АКГ «фонтанного» типа состоит в возможности измерения только одной составляющей УСП, которая направлена вдоль силовой линии ГПЗ. Для определения всех составляющих УСП, ориентированных по осям земной системы координат в точке измерений, необходимы дополнительные измерения составляющих уклонения отвесной линии, выполненные в этой же точке.

Другое направление создания атомных квантовых гравиметров связано с использованием особого состояния атомов, которое именуется Бозе-Эйнштейна конденсатом (БЭК). С помощью квантовой технологии, основанной на БЭК, возможно получение чувствительности гравиметра на 2–3 порядка выше, чем в гравиметрах «фонтанного» типа. Используемые облака БЭК в таком случае имеют размеры около 1 мм при количестве атомов  $10^5$ – $10^6$ . Прибор может быть достаточно компактным, поскольку управление потоками атомов выполняется с помощью малогабаритных атомных чипов. Кроме высокой чувствительности прибор может обладать малым дрейфом. Повышение чувствительности и точности этого прибора еще на 1–2 порядка возможно на основе использования т. н. свойства «запутанности» атомов БЭК. За рубежом уже создан компактный наземный гравиметр на атомном чипе с чувствительностью  $\delta g \approx 1 \cdot 10^{-9} g = 1 \text{ мкГал}$  массой 20 кг, мощностью потребления 50 Вт. Он размещается в небольшом дорожном кейсе.

#### *Астрономический измеритель уклонения отвесной линии «Астрограв»*

Согласно ГОСТ 22268-78, уклонение отвесной линии (далее УОЛ) — это угол между отвесной линией — нормалью к поверхности геоида — и нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке поверхности Земли. Положение нормали к поверхности земного эллипсоида и геодезические координаты измерительной точки  $B, L$  определяются с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС. Положение отвесной линии относительно звездного неба (астрономические координаты точки измерений) определяется с помощью малогабаритного телескопа, ось которого ориентирована вдоль отвесной линии.

Для полевых измерений положения УОЛ во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан малогабаритный квантовый перебазируемый астроизмеритель уклонения отвесной линии «Астрограв» (рис. 3).



«Астрограв» в сборе

Состав: 1) зенитный телескоп со зрачком 20 см; 2) астрономический цифровой ПЗС-приемник; 3) высокоточный цифровой инклинометр; 4) звездный каталог GALA DR2; 5) СПО собственной разработки.

#### Основные отличия от конкурентов

1. Погрешность измерений — 0.2 угл. сек.
2. Используется новый запатентованный метод измерений с расширенным составом неизвестных (до 10), который обеспечивает следующие преимущества:
  - «автокалибровку» прибора, что повышает оперативность и точность измерений;
  - возможность измерений на любом твердом основании (грунтовые, асфальтовые дороги и площадки, в том числе на льду).
3. Время подготовки к измерениям сокращено за счет исключения калибровки с 30 до 10 мин.
4. Количество точек измерений в течение наблюдательной ночи увеличивается на 20 %.

Рис. 3. Астроизмеритель УОЛ «Астрограв» ФГУП «ВНИИФТРИ»

Он включает следующие основные элементы: малогабаритный телескоп, астрономический квантовый оптический приемник (ПЗС-камера с высокой квантовой эффективностью), высокоточный цифровой инклинометр, обеспечивающий ориентирование оси телескопа по отвесной линии, звездный каталог GAIA DR2, а также оригинальное специальное программное обеспечение (СПО). В процессе разработки прибора предложен и запатентован новый метод измерений, который основан на основе измерения положения изображений звезд в ПЗС-камере при 20 угловых положениях телескопа. При этом в состав неизвестных включены все 10 калибровочных коэффициентов. Это обеспечивает следующие преимущества созданного АУОЛ: автокалибровку прибора, что повышает оперативность и точность измерений, а также открывает возможность измерений на любом твердом основании типа грунтовых и асфальтовых дорог, на льду и др. Это исключает необходимость подготовки специальных измерительных площадок. Эти свойства прибора сокращают время его подготовки к полевым измерениям с 30 до 10 мин. В свою очередь, это увеличивает количество измерительных точек в течение наблюдательной ночи на 20–25 %.

Испытания измерителя УОЛ «Астрограв» проводились в Новгородской, Московской и Калужской областях в течение 16 наблюдательных ночей. Среднее значение погрешности измерений составило 0.2 угл. сек. Прибор готовится к серийному производству. Имеется патент на изобретение.

#### *Полевой малогабаритный горизонтальный градиентометр*

Полевой градиентометр использует принцип действия крутильных весов, примененный в известном венгерском градиентометре Е-60. Новый прибор основан на использовании современной лазерной системы измерения угла поворота механического коромысла, на концах которого закреплены пробные массы. Для измерения угла поворота коромысла применен фотоприемник на основе КМОП-матрицы, метод измерения — амплитудный. В целом, разрабатываемый прибор является модернизацией Е-60 на современной элементной базе. Предварительные испытания показали, что характеристики прибора существенно лучше, чем у оригинала: погрешность в 2–3 раза снижена, вес прибора — не более 8 кг (против 70 кг у оригинала). Более высокую точность планируется получить на основе использования лазерного интерферометра.

#### *Полевой комплекс определения горизонтальных составляющих УСП и гравитационных градиентов*

Полевой перебазируемый комплекс гравиметрии предназначен для измерения горизонтальных

составляющих ускорения свободного падения. Он основан на совместном использовании созданных «ВНИИФТРИ» высокоточных гравиметрических приборов: ВОГ «Пешеход» и астроизмерителя УОЛ «Астрограв». Другими способами эти составляющие не измеряются.

Такое сочетание измерителей позволяет на основе измеренного значения УСП  $g_{изм}$  и двух измеренных ортогональных составляющих УОЛ  $\xi$ ,  $\eta$  определить горизонтальные составляющие УСП  $g_x = -g_{изм} \cdot \xi$ ;  $g_y = -g_{изм} \cdot \eta$ .

Далее по их разностям  $\Delta g_x, \Delta g_y$  в двух соседних точках, разнесенных по координатам на  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , можно вычислить составляющие горизонтального градиентного тензора ГПЗ:  $W_{xx} \approx \Delta g_x / \Delta x$ ,  $W_{yy} \approx \Delta g_y / \Delta y$ ,  $W_{xy} \approx \Delta g_x / \Delta y$ .

Дискретность измерений, выполняемых таким комплексом, составляет от сотен метров до единиц километров. На испытательном полигоне размером  $5 \times 5$  км, при погрешности измерения УОЛ 0.2 угл. сек и погрешности гравиметра 5 мкГал погрешность определения градиентов составила единицы Этвеш. Дополнительные испытания этого комплекса были проведены при измерении УСП и составляющих УОЛ на хорошо известной Московской гравитационной аномалии (аттракции). Гребень этой аномалии проходит через Москву с запада на восток, при этом на северном «склоне» аттракции измеренное значение УОЛ, как и ожидалось, составляет  $\sim -7''$ , на южном —  $\sim +6''$ . В результате испытаний получены высокоточные значения горизонтальных составляющих УСП, а также горизонтальных градиентов.

В целом, по результатам испытаний перебазируемый гравиметрический комплекс в составе измерителей «Пешеход» и «Астрограв» можно рекомендовать для подготовки навигационных карт и высокоточной разведки полезных ископаемых. Исследования точности и направлений применения комплекса необходимо продолжить.

#### *Наземный квантовый нивелир*

В 2015 г. на Пражской конференции IAG была принята специальная резолюция «Об определении и реализации международной системы отсчета высот (IHRs)». Согласно этой резолюции, за опорную поверхность при определении высоты следует принять эквипотенциальную поверхность геоида и отсчитывать относительно нее ортометрическую высоту любой точки на Земле. Разность ортометрических высот предлагается определять через эквивалентную разность гравитационных потенциалов.

Согласно общей теории относительности физическими эффектами, непосредственно связан-



ными с разностью гравитационных потенциалов, являются *эффекты гравитационного замедления* (смещения) времени  $\Delta\tau_{гр}$  и *гравитационного смещения частоты*  $\Delta f_{гр}$  электромагнитного излучения. Эти гравитационные эффекты в настоящее время измеряются с помощью пары разнесенных в пространстве высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ), или квантовых часов. Относительная величина этих смещений однозначно связана с разностью ортометрических высот двух измерительных СЧВ  $\Delta H_{ОРТ}$  известным из теории соотношением:

$$\frac{\delta\tau_{гр}}{\tau_0} = \frac{\delta f_{гр}}{f_0} \approx \frac{g\Delta H_{ОРТ}}{c^2},$$

где  $c$  — скорость света;  $g$  — ускорение свободного падения в точке измерений;  $\tau_0, f_0$  — текущее время по шкале времени базовых квантовых часов и задающая частота базовых часов соответственно.

Комплекс средств, необходимых для измерения разности гравитационных потенциалов и соответствующей разности ортометрических высот, предложен и впервые реализован на практике специалистами «ВНИИФТРИ» ([Фатеев, Рыбаков и др., 2024](#)). Он включает (рис. 4) два разнесенных комплекта СЧВ и систему их сличения по частоте и времени. Такой комплекс авторами назван **квантовым нивелиром**, поскольку он измеряет геодезический параметр — разность ортометрических высот. Другое его название — гравипотенциометр. Конструкция квантового нивелира защищена несколькими патентами.

По сравнению с классическим нивелиром, его погрешность слабо зависит от расстояния между

исследуемыми точками и он, в зависимости от возможностей системы синхронизации, может выполнять глобальные измерения. В качестве систем сравнения шкал времени и сличения частот квантовых часов могут использоваться ГНСС ГЛОНАСС и др., волоконно-оптические линии связи, мобильные СЧВ, РТС «Дуплекс», а также квантово-оптические системы (КОС).

Из вышеприведенной формулы, а также из рис. 5 следует, что при относительной нестабильности квантовых часов  $10^{-17}$  погрешность измерения разности ортометрических высот составляет 10 см, что на глобальных расстояниях получить другими методами невозможно.

### Новые космические средства подготовки гравитационных карт

Известно, что все существующие типы гравиметров в космосе неработоспособны в силу состояния невесомости на борту КА-измерителя. На борту КА имеется возможность измерения только составляющих гравитационного градиента ГПЗ. За рубежом уже созданы специализированные космические гравиметрические средства типа GOCE, GRACE, GRACE-FO и др. Однако они имеют плохое пространственное разрешение, не измеряют составляющие ускорения свободного падения и поэтому мало пригодны для создания навигационных карт на удаленных территориях.

По мнению авторов, одна из возможностей высокоточного измерения гравитационных градиентов открывается на основе использования квантовых оптических измерителей микроперемещений чувствительных масс внутри КА, которые вызваны влиянием гравитационного поля. Другая возможность измерения всех параметров ГПЗ на борту КА открываются на основе использования сигналов ГНСС.

В основе — гравитационные эффекты Общей теории относительности:

- 1) эффект замедления времени;
- 2) эффект смещения частоты.

Для неподвижных наземных часов:

$$\frac{\Delta\tau_{гр}}{\tau_0} = \frac{\Delta f_{гр}}{f_0} \approx \frac{g\Delta H_{ОРТ}}{c^2}.$$

При  $g \approx 9.81 \text{ м/с}^2$  и погрешностях измерений гравитационных частотно-временных смещений:

$$\frac{\Delta\tau_{гр}}{\tau_1} = \frac{\Delta f_{гр}}{f_1} = 10^{-17}.$$

Погрешность нивелирования составит

$$\Delta H_{ОРТ} \approx 10 \text{ см.}$$

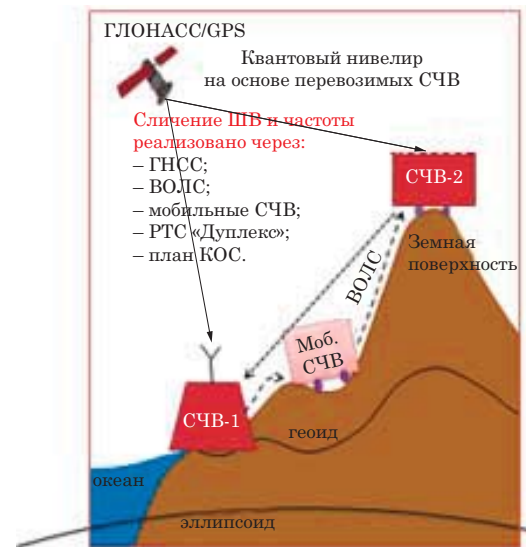


Рис. 4. К принципу действия квантового нивелира



### Космический квантовый оптический градиентометр

Этот прибор основан на использовании свободных масс, движущихся внутри объема спутника и измерении их относительного движения с помощью лазерного интерферометра (Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. и др. 2020). На свободных массах размещены полупрозрачное и непрозрачное зеркала, образующие высокочувствительные интерферометры Майкельсона и Фабри-Перо. Свободные массы приводятся в свободное движение и фиксируются с помощью механического арретира.

Теоретическая оценка и экспериментальная проверка показали, что ожидаемая погрешность этого прибора существенно ниже, чем у известного зарубежного прибора GOCE. Он вполне может использоваться для создания гравиметрических навигационных карт удаленных территорий и акваторий. Для оценки его характеристик во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан наземный испытательный стенд. Цель создания наземного стенда состояла в испытаниях градиентометра в наземных условиях и в отработке принятых технических решений. Достигнутая чувствительность прибора в наземных условиях составила около 5 Этвеш, что вполне приемлемо. Различные варианты конструкции прибора защищены патентом RU 2754098, С1. За рубежом похожая конструкция была испытана в космическом эксперименте LISA Pathfinder, при этом погрешность измерения расстояния между массами составила  $10^{-12}$  м. Авторами выдвинуто предложение использовать в качестве испытательного космического стенда проектируемую Российскую орбитальную станцию.

### Космический бортовой гравиметр на сигналах ГНСС

В основе принципа действия рассматриваемого космического измерителя ускорения свободного падения лежит известный принцип абсолютного баллистического гравиметра на свободной массе, движущейся в гравитационном поле Земли (патент RU 2768557 С1. (2022)). Только в данном случае в качестве свободной массы выступает сам геодезический КА (ГКА), а в качестве опорной точки — навигационный КА (НКА) ГНСС. В этом случае используется радиолиния «НКА – ГКА». Если для простоты пояснения рассмотреть положение излучающего НКА вблизи зенита относительно геодезического КА, то, обозначив текущую псевдодальность ГКА относительно НКА через  $\bar{R}(t)$ , его радиальное ускорение относительно НКА определим по формуле:

$$\ddot{\bar{R}} = \frac{d^2 \bar{R}}{dt^2} \approx \ddot{g}_{ГКА} + \ddot{g}_{НКА}, \text{ где } \ddot{g}_{НКА} —$$

ускорение НКА, которое легко вычисляется по эфемеридам НКА с высокой точностью;  $\ddot{g}_{ГКА}$  — искомого гравитационное ускорение (УСП) геодезического КА. Влиянием сопротивления остаточной атмосферы для зенитного случая для простоты пренебрегаем.

Это ускорение можно определять как в виде второй производной по результатам измерения текущей псевдодальности «НКА – ГКА», так и в виде первой производной по результатам измерения относительной псевдоскорости. Во втором случае измерения выполняются на известном интервале задержки доплеровского сигнала.





	РФ, ВНИИФТРИ	США, Microsemi	Китай, ELECSN	Великобритания, Quartzlock
Вид				
Название	НАП-КПН	SA.3xm Miniature Atomic Clock	XHTF1031 Miniature Rubidium Clock	E10-MRX
Размеры, см	5.00 × 5.00 × 2.40(60.0)	5.08 × 5.08 × 1.83(47.2)	5.08 × 5.08 × 2.50(64.5)	5.10 × 5.10 × 2.50(65.0)
СКДО, 1 с	$1.2 \times 10^{-11}$	$3.0 \times 10^{-11}$	$5.0 \times 10^{-11}$	$8.0 \times 10^{-11}$
СКДО, 10 с	$3.8 \times 10^{-12}$	$1.6 \times 10^{-11}$	$2.8 \times 10^{-11}$	$3.0 \times 10^{-11}$
СКДО, 100 с	$1.2 \times 10^{-12}$	$8.0 \times 10^{-12}$	$8.0 \times 10^{-12}$	$8.0 \times 10^{-12}$
Потребление, Вт	0.3	5.0	6.0	6.0
Время выхода на режим ( $\pm 10^{-10}$ ), с	180	900	600	300

Рис. 5. Сверхминиатюрные бортовые квантовые часы геофизических САН

Исследования показали ([Донченко и др., 2024](#)), что при использовании максимального количества видимых НКА всех ГНСС, при количестве сигналов, излучаемых НКА — до трех, погрешность определения УСП меньше, а пространственное разрешение измерений (детальность) существенно лучше, чем в известных зарубежных измерителях. При повышении точности измерений НАП погрешность определения УСП снижается.

Экспериментальная проверка метода была выполнена дважды: путем измерения ускорения свободного падения навигационного КА GPS в точке траверза с помощью наземной РТС, а также путем измерения ускорения низкоорбитального МКА с помощью наземной РТС ([Денисенко и др., 2023](#)). В первом случае СКО УСП составило 2–3 мГал, во втором случае — 6.3 мГал.

#### *Космический бортовой градиентометр на сигналах ГНСС*

Для реализации метода используется кластер из нескольких малых КА (МКА), каждый из которых оснащен бортовой НАП ГНСС и по принимаемым с ее помощью сигналам ГНСС выполняет измерения своего вектора ускорения свободного падения ([Донченко и др., 2024](#)). В основе определения гравитационных градиентов лежат измерения составляющих УСП  $g_x, g_y, g_z$  на каждом МКА кластера. Далее вычисляются разности УСП по осям системы координат по линии «спутник — спутник» в кластере. Например, для двух МКА кластера искомый градиент  $G_{xx}$  определяется по формуле:  $G_{xx} = (g_{x2} - g_{x1}) / (x_2 - x_1)$ , где в числителе — разность гравитационных ускорений МКА<sub>1</sub> и МКА<sub>2</sub> вдоль оси ОХ, а в знаменателе — разность координат этих МКА по оси ОХ. Количество МКА в кластере 6–8 шт.

Ожидаемая погрешность определения градиентов выше, чем при использовании известных методов. Этот метод по отношению к известным имеет ряд других преимуществ, поскольку сравнительно недорогой, а также позволяет определить все составляющие матрицы градиентов. Для повышения точности целесообразно использовать статистическую обработку множества измерений, выполненных, например, в течение года.

#### *Бистатистический радиолокационный измеритель высоты геоида на сигналах ГНСС*

Бистатистическая радиолокационная система на сигналах ГНСС для определения профилей высоты геоида основана на одновременном приеме прямых сигналов от НКА и сигналов, отраженных от поверхности Мирового океана. Прямые сигналы принимаются антенной, направленной в зенит, а отраженные — антенной, ориентированной в надир. Идея использования такой системы была впервые предложена в РФ одним из авторов ста-

ти ([Клюев, 1995](#)). По бистатистической радиолокационной системе в РФ проведено несколько экспериментов ([Ксендзук, 2024](#)). Метод бистатистической радиолокации с использованием отраженных сигналов ГНСС за рубежом получил название GNSS-Reflectometry. При реализации этого метода применяются сигналы ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BeiDou Navigation Satellite System (BDS) (Китай), Galileo (Европа), QZSS (Япония) и IRNSS (Индия). К настоящему моменту отраженные от океана сигналы ГНСС используются для решения различных практических задач более чем в 10 зарубежных космических проектах, например в многоспутниковом проекте CYGNSS (NASA), в проекте на спутниках LEMUR компании Spire Global и в др. За рубежом тема спутниковых бистатистических радиолокационных систем исследуется достаточно активно ([Li et al., 2017](#); [Nguyen et al., 2020](#); [Unwin et al., 2016](#)).

Моделирование показало, что количество треков точек зеркального отражения при приеме отраженных сигналов на борту низкоорбитального КА составляет от 30 до 66 одновременно. Для вычисления текущей высоты геоида использованы первичные измерительные данные одного из спутников системы CYGNSS и создан оригинальный алгоритм обработки измерений. В итоге установлено, что СКО высоты геоида, вычисленной с использованием разработанного алгоритма бистатистической радиолокационной системы, от значений, полученных по модели ГПЗ EGM2008, составило 13.3 см при длине трека чуть более 250 км ([Лопатин и др., 2024](#)). При вовлечении в обработку треков измерений высоты геоида по множеству сигналов других ГНСС (до 66 одновременно) погрешность определения текущей высоты геоида может быть уменьшена до единиц сантиметров, что вполне соответствует предъявляемым требованиям.

#### **Перспективные бортовые квантовые измерители САН**

##### *Квантовый хранитель бортовой шкалы времени потребителя*

Точное бортовое время на борту подвижного средства необходимо для обеспечения высокой точности БИНС при интегрировании измеряемых ускорений. Кроме того, наличие высокоточной бортовой шкалы важно для поддержания точности навигации при длительных интервалах автономного движения средства навигации. В отсутствие сигналов ГНСС точное бортовое время в системе автономной навигации наземных и космических потребителей можно получить от сверхминиатюрных квантовых бортовых рубидиевых стандартов частоты на атомном эффекте когерентного пленения населенностей (КПН) (условное наименование стандарта «НАП КПН»), которые созданы во

ФГУП «ВНИИФТРИ» (Зотов, Парехин, 2020). Сравнительные характеристики созданных сверхминиатюрных бортовых квантовых часов и других известных зарубежных аналогов приведены на рис. 5. Эти стандарты частоты характеризуются нестабильностью не хуже  $10^{-11}$ – $10^{-12}$ , малым энергопотреблением, весом до 0.3 кг. Ведется подготовка к серийному производству НАП КПН.

#### Квантовый носимый оптический интерференционный гравиметр

Этот прибор основан на использовании идеи интерферометрической гравитационно-волновой антенны (ГВА) (Давлатов и др., 2017). В одном из вариантов реализации он содержит гибкую мембрану, нагруженную чувствительной массой, а также интерферометр Майкельсона, в каждом из плеч которого находятся резонаторы Фабри-Перо. Под действием силы тяжести пробная масса изгибает мембрану и изменяет длину резонатора интерферометра. Это приводит к смещению интерференционной картины. Гравиметр малогабаритный и его можно назвать «ГВА-на-ладони». При использовании достижений в повышении точности измерений микросмещений, полученных при создании интерферометрических гравитационно-волновых антенн, перспективы повышения чувствительности весьма значительные.

#### Малогабаритный бортовой феррозондовый магнитометр

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» создается малогабаритный феррозондовый магнитометр, который предназначен для бортовых измерений в составе магнитометрической системы автономной нави-

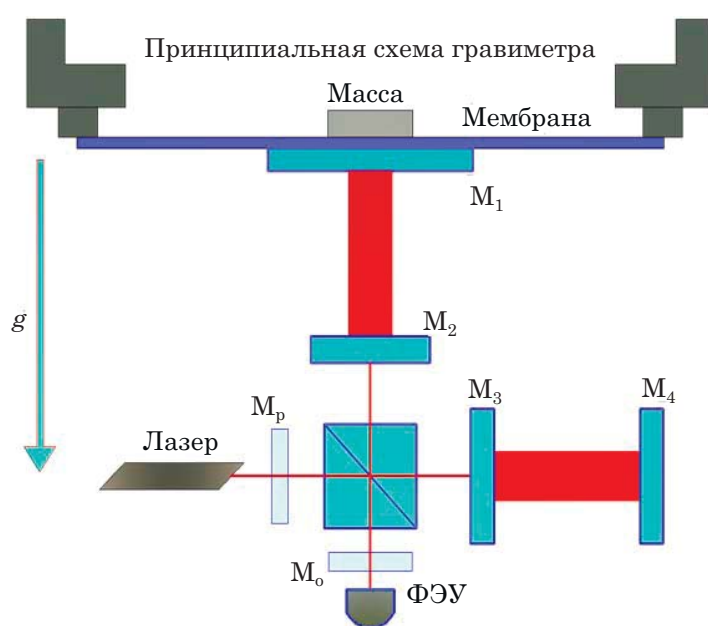
гации. Прибор трехкомпонентный, т. е. в нем измеряются три составляющие магнитной индукции по всем координатным осям, масса — не более 150 г. Пределы погрешностей измерений следующие:  $\pm (0.005 B_{\text{изм}} + 10)$  нТл, где  $B_{\text{изм}}$  — модуль вектора магнитной индукции. Срок завершения испытаний — декабрь 2025 г.

Прибор готовится к серийному производству.

#### Фундаментальное геодезическое обеспечение геофизических САН

##### Модели ГПЗ и их применение для навигации

Существуют большое количество моделей ГПЗ различной степени и порядка. Наиболее известной зарубежной моделью максимальной степени и порядка 2190 является модель EGM2008 (Pavlis, 2012). Эта модель обеспечивает пространственное разрешение около 18 км, что для навигации пока недостаточно. Специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2017 г. создана модель размерностью  $720 \times 720$ , что также недостаточно. В этой связи необходим поиск методов повышения пространственного разрешения (детальности) навигационных карт. Один из путей основан на повышении степени и порядка глобальных моделей. Примером является американская модель Sandwell and Smith v29.1 (2020) (Михайлов и др., 2022), имеющая пространственное разрешение в океане не более 2 км, что уже соизмеримо с требуемой точностью навигации. Другой путь основан на создании региональных моделей ГПЗ с высоким разрешением (Сугаипова, 2018). Третий метод предложен специалистом ФГУП «ВНИИФТРИ» (Бобров, 2020).



#### Особенности:

1. Используются отражающие зеркала со сложным законом изменения показателя отражения;
2. Лазер одномодовый с модовой очисткой;
3. Монозвенный маятник для виброизоляции подвеса;
4. МП, МО — полупрозрачные зеркала для повышения мощности циркулирующего потока.

#### Ожидаемая точность:

В сравнении с канадским CG-6 Autograv есть возможность повышения точности в 10–100 раз.

К принципу действия квантового оптического гравиметра:  $M_1$ – $M_2$  — зеркала рабочего плеча лазерного интерферометра;  $M_3$ – $M_4$  — зеркала опорного плеча интерферометра;  $M_p$ ,  $M_o$  — полупрозрачные зеркала для повышения мощности циркулирующего потока

Рис. 6. Пример реализации квантового оптического гравиметра «ГВА-на-ладони»



Он основан на использовании дополнительной информации о рельефе и плотности пород подстилающей поверхности. Оценка возможностей метода выполнена по результатам измерения профиля ускорения свободного падения в Подмоскowie. Исходный профиль состоял из 31 измерительной точки с расстоянием между ними  $\sim 5$  км. При помощи предлагаемого метода была выполнена интерполяция значений УСП в промежуточные точки. На основе этого метода открывается возможность повышения разрешающей способности региональной гравиметрической карты.

### Состояние разработки моделей МПЗ

Наибольшую степень и порядок (1440) имеет модель МПЗ BGGM (Beggan et al., 2016), однако ее разрешение на местности более 20 км. Глобальная модель аномалий МПЗ EMAGv2 имеет разрешение 2 угловые минуты (Meyer et al., 2017), что соответствует пространственному разрешению 3.5 км, что также недостаточно. Поэтому пространственное разрешение существующих моделей МПЗ необходимо увеличивать. Другой важной особенностью МПЗ является его изменчивость во времени. Для учета вариаций параметров МПЗ используются магнитные обсерватории и магнитовариационные станции. Вместе с тем, для периодического уточнения глобальных моделей МПЗ необходимы дополнительные измерения их параметров примерно один раз в 4–5 лет. Кроме того, анализ изученности территории страны в части картографирования аномального МПЗ показывает следующее (Минлигареев и др., 2020): для 80–90 % существующей отечественной картографической продукции исходный материал в цифровом формате отсутствует, параметры аномального МПЗ на территории страны определены фрагментарно, навигация по МПЗ возможна лишь на 10–20 % территории страны.

### Фундаментальная геодезическая сеть «Квантовый футшток»

Для создания и поддержания фундаментальной единой высотной основы РФ на основе сети квантовых нивелиров предлагается создание перспективной расширенной геодезической сети «Квантовый футшток» (рис. 7). Основу сети составляет ядерный стандарт частоты и времени с относительной нестабильностью  $10^{-19}$ – $10^{-20}$ . Главной задачей сети является создание и поддержание единой высотной основы на территории страны, включая Арктику, с погрешностью единицы – десятки сантиметров, что необходимо для фундаментального обеспечения работоспособности геофизических систем автономной навигации на всей территории страны, включая Арктику. В узлах сети



Рис. 7. Расширенная геодезическая сеть России «Квантовый футшток»

(отмечены квадратной рамкой) располагаются стационарные пункты геофизической колокации (ПГФК), которые включают в свой состав сверхстабильные СЧВ с нестабильностью  $10^{-17}$ – $10^{-18}$ , квантовые атомные гравиметры, высокоточные магнитометры, а также высокоточные астроизмерители отклонения отвесных линий. Все ПГФК соединены ВОЛС. В состав некоторых стационарных ПГФК входят мобильные ПГФК, которые необходимы для передачи значений параметров МПЗ региональным потребителям. Кроме того, в качестве мобильного ПГФК может использоваться проектируемая Российская орбитальная станция, для этого на борт последней необходимо установить высокостабильные квантовые часы.

### Эталонная метрологическая гравиметрическая база геофизических САН

В настоящее время в мире, в том числе в РФ, создан лишь один гравиметрический эталон: Государственный первичный специальный эталон единицы ускорения в гравиметрии: АБГ ВНИИМ (ГЭТ 190-2023). Погрешность эталона составляет 4 мкГал.

ФГУП «ВНИИФТРИ» обладает вторичным эталоном ускорения в гравиметрии, который основан на абсолютном баллистическом гравиметре FGL. Погрешность вторичного эталона составляет 10 мкГал.

Кроме того, в эталонную базу входят гравиметрические средства измерения утвержденного типа «Высокоточные относительные гравиметры (ВОГ)» Autograv CG-5 и CG-6. Погрешность относительных измерений, выполняемых этими средствами, — 5 мкГал.

Со временем планируется ввести в состав эталонной базы создаваемые силами ФГУП



«ВНИИФТРИ» абсолютный атомный квантовый гравиметр, а также ВОГ «Пешеход».

С созданием и развитием парка геофизических САН необходима разработка следующего поколения эталонных гравиметрических средств:

1) эталона единицы разности гравитационных потенциалов, который может быть создан на оптических или ядерных СЧВ с относительной нестабильностью  $10^{-18}$ – $10^{-19}$ ;

2) эталона единицы УОЛ на основе астроизмерителя типа «Астрограв»;

3) эталонов единиц вертикальных и горизонтальных гравитационных градиентов на основе криогенных гравиметров.

### Предпочтительные районы применения геофизических САН

Выше приводились модельные расчеты с оценкой точности навигации для холмистой местности, для которой гравитационные градиенты характеризовались значениями около 30 Этвеш. Погрешности навигационных определений при этом условии составляют от 500 до 1000 м. Однако возможны варианты применения САН в условиях, когда градиенты имеют существенно большие значения: в горных ущельях и в помещениях, к которым относятся большие хранилища, подземные ангары и др. Первый из этих вариантов — региональная навигация — исследовался применительно к маршруту, проложенному вблизи горного ущелья на участке горной местности размером  $20 \times 20$  км (Бобров, 2020) (рис. 8).

Значения измеряемого горизонтального гравитационного градиента  $W_{xy}$  на маршруте движения (цветная линия на рис. 8) изменялись в пределах  $(-120...+140)$  Этвеш. В результате погрешность навигации снизилась до 100–150 м.

Второй пример соответствует навигации в помещении, первый этаж которого имеет размеры на уровне пола примерно  $10 \times 18$  м. На рис. 9 показано сечение этого строения с внутренними

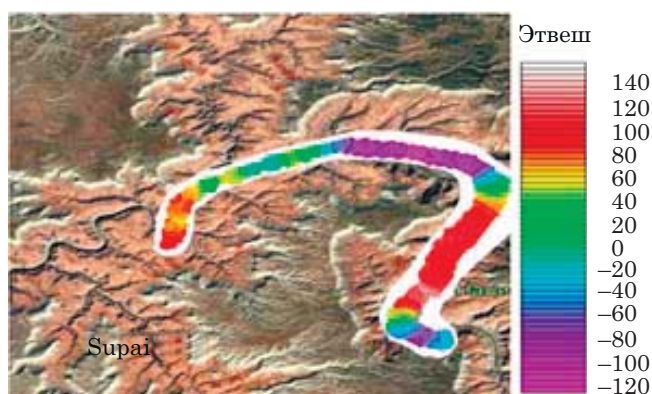


Рис. 8. Региональная навигация: пример значительного изменения гравитационного градиента  $W_{xy}$  на маршруте движения в горном ущелье (извилистая линия)

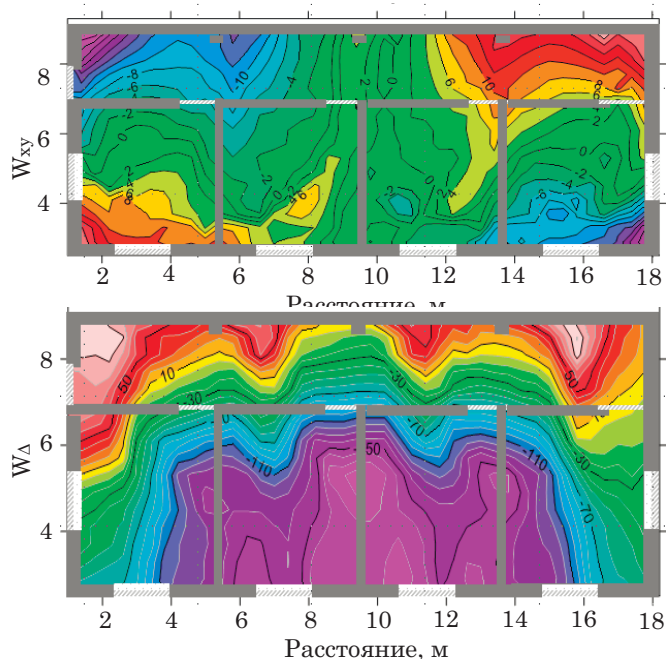


Рис. 9. Навигация в помещениях с погрешностью местоопределения 1–2 м

и наружными стенами, а также с дверными и оконными проемами. Исследования показали (Бобров, 2020), что для этого помещения характерны значительные изменения горизонтальных гравитационных градиентов: составляющая  $W_{xy}$  изменяется в пределах  $(-10...+14)$  Этвеш, а составляющая  $W_{\Delta}$  — в пределах  $(-150...+50)$  Этвеш.

Такие значительные изменения градиентов на малых расстояниях обеспечивают существенное снижение погрешности навигационных определений. Это особенно важно для закрытых и подземных помещений, в которых сигналы всех ГНСС отсутствуют. Измерения градиентов в обоих рассмотренных случаях выполняются малогабаритными градиентометрами типа СГ-6 и «Пешеход».

### Заключение

На основе имеющегося теоретического и практического задела авторами предложена Концепция создания и применения помехозащищенных систем автономной навигации по геофизическим полям.

Цель разработки Концепции состояла в определении основных путей развития теоретических и экспериментальных основ геофизических САН, в том числе для обеспечения «беспроводной» навигации, в определении направлений их фундаментального и метрологического обеспечения, а также в расширении областей их применения.

Предлагаемая Концепция включает: оценку ожидаемой точности геофизических САН с обоснованием требований к измерителям параметров ГПЗ и МПЗ; краткий обзор известного зарубежно-

го и отечественного задела по этой теме; новые наземные гравиметрические и магнитометрические средства подготовки навигационных карт; новые космические средства подготовки карт на удаленных территориях; перспективные бортовые квантовые средства геофизических САН; фундаментальное геодезическое и метрологическое обеспечение САН, а также предпочтительное с точки зрения обеспечения высокой точности направления применения рассматриваемых САН: в горной местности и в больших помещениях.

Оценка ожидаемой точности геофизических САН авторами проведена путем моделирования, при этом в качестве основы САН используется БИНС. Практические работы в области создания геофизических САН подтвердили их ожидаемые точности. На основе оценки точности обоснованы требования к измерителям ГПЗ и МПЗ. Проведены оценки требований к точности измерителей в режиме «беспроводной» навигации, когда потребитель не замечает перехода от высокоточной навигации по ГНСС к навигации по ГПЗ и МПЗ.

Проанализирован имеющийся мировой и отечественный задел по геофизическим САН, представлены возможности использования новых измерителей параметров ГПЗ и МПЗ, предложенных специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ», которые могут применяться как для построения карт, так и для измерения текущих параметров полей на борту объекта навигации. Особое внимание уделено возможностям создания и применения предложенных авторами оригинальных космических измерителей для построения карт на удаленных территориях. Это важно еще и потому, что известные зарубежные космические гравиметрические проекты мало пригодны для картографии в интересах перспективных геофизических САН.

Особое внимание авторами уделено состоянию и возможностям применения в САН высокоточных квантовых атомных и квантовых оптических (лазерных) измерителей, которые обладают исключительными возможностями для повышения точности геофизических САН. При рассмотрении фундаментального геодезического обеспечения заострена проблема повышения размерности отечественных моделей ГПЗ и МПЗ. На основе сверхстабильных СЧВ предложена фундаментальная геодезическая сеть «Квантовый футшток», которая предназначена для создания высокоточной высотной основы страны, включая Арктический регион. Сердцем сети «Квантовый футшток», по мнению авторов, должен быть ядерный СЧВ с относительной нестабильностью  $10^{-19} \dots 10^{-20}$ . В узлах сети устанавливаются СЧВ с нестабильностью  $10^{-17} \dots 10^{-18}$ , квантовые атомные гравиметры, высокоточные магнитометры, а также высокоточные астроизмерители уклонения отвесных линий.

В целом, Концепция вполне реализуема на отечественной элементной и производственной базе силами отечественных специалистов. К реализации положений Концепции могут быть приглашены исполнители Минпромторга, Росстандарта, Росатома, Росреестра, Роскосмоса и других заинтересованных ведомств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-67-10007.

## Литература

- Бобров Д. С. Разработка методов и средств создания навигационных гравитационных карт // Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Менделеево, НИИФТРИ. 2020.
- Давлатов Р. А., Пустовойт В. И., Фатеев В. Ф. Лазерные гравиметры на основе интерферометра Фабри-Перо // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3 (25). С. 63–71.
- Денисенко О. В., Пустовойт В. И., Сильвестров И. С., Фатеев В. Ф. Проблемы развития беспроводной ассистирующей технологии навигации в ГНСС ГЛОНАСС на основе измерений параметров геофизических полей В кн. Сборник докладов II научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии», 29–31 октября 2019 г., п. Менделеево, Моск. обл. // Альманах современной метрологии. 2020. № 4(24). С. 127–160.
- Денисенко О. В., Завгородний А. С., Лопатин В. П., Фатеев В. Ф. Орбитальный радиогравиметр на сигналах глобальных навигационных спутниковых систем // Альманах современной метрологии. 2023. № 3 (35). С. 48–60.
- Донченко С. И., Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Теоретическое обоснование и исследование методов измерения первого, второго и третьего градиентов гравитационного потенциала в кластере наноспутников по прямым сигналам ГНСС // Альманах современной метрологии. 2024. № 1 (37). С. 60–79.
- Зотов Е. А., Парёхин Д. А. Исследование метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. Альманах современной метрологии. 2020. № 3. С. 128–137.
- Клюев Н. Ф., Фатеев В. Ф., Ильин А. Л. и др. Принцип построения двухпозиционных РСА космического базирования // Материалы военно-научной конференции «А. Ф. Можайский: к 170-летию создателя первого российского самолета», 21–23 марта 1995. Т. 2. СПб.: ВИКА, 1996. С. 335–338.
- Ксендзук А. В., Герасимов П. А., Фатеев В. Ф., Лопатин В. П. Экспериментальные исследования системы дистанционного зондирования Земли по сигналам ГНСС // Сборник научных статей по материалам Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии». М.: МИРЭА, 2024. С. 23–29.
- Лопатин В. П., Мурзабеков М. М., Бобров Д. С. Результаты определения профиля высот геоида и уклонения отвесной линии по сигналам ГНСС, отраженным от водной поверхности // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 21–30. Doi: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-21-30.

Минлигареев В. Т., Алексеева А. В., Качановский Ю. М. и др. Картографическое и программное обеспечение перспективных магнитометрических навигационных систем // Альманах современной метрологии. 2020. № 4 (24). С. 97–103.

Михайлов П. С., Конешов В. Н., Соловьев В. Н., Железняк Л. К. Новые результаты оценок современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля земли в мировом океане // Гироскопия и навигация. 2022. Том 30, № 4 (119). С. 36–53.

Сазонова Т. В. Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли // Альманах современной метрологии. 2020. № 4 (24). С. 86–96.

Сугаипова Л. С. Разработка и исследование методов разномасштабного моделирования геопотенциала. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М., МИИГАиК. 2018. 325 с.

Фатеев В. Ф. Квантовые высокоточные измерители параметров гравитационного и магнитного полей Земли. Обзор состояния // Альманах современной метрологии. 2024. № 3. С. 79–118

Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А., Смирнов Ф. Р. и др. Квантовый нивелир и сеть «Квантовый футшток». Теория, эксперименты, макетирование. Монография / под ред. проф. Фатеева В. Ф. Изд. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2024. 344 с.

Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Анализ возможностей космического градиентометра на свободных массах // Альманах современной метрологии. 2020. № 2 (22). С. 65–72.

Beggan C. D., Macmillan S., Brown W. J., Grindrod S. J. Quantifying global and random uncertainties in

high resolution global geomagnetic field models used for directional drilling // SPE Drilling & Completion. 2016. P. 1–10. Doi: 10.2118/204038-pa.

Canciani A. J., Raquet J. F. Airborne magnetic anomaly navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017. Vol. 53, No. 1. P. 67–80. Doi: 10.1109/TAES.2017.2649238.

Gnadt A. R. Machine learning-enhanced magnetic calibration for airborne magnetic anomaly navigation. 2022. Doi: 10.2514/6.2022-1760.

Li W., Cardellach E., Fabra F., et.al. First spaceborne phase altimetry over sea ice using TechDemoSat-1 GNSS-R signals // Geophys. Res. Lett. 201744. 2017. P. 8369–8376. Doi: 10.1002/ 2017GL074513.

Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017 URL: <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX> (дата обращения 01.08.2025).

Nguyen V. A., Nogués-Correig O., Yuasa T., Masters D., et al. Initial GNSS phase altimetry measurements from the Spire // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47 (15). P. 1–10. Doi: 10.1029/2020GL088308.

Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117, B04406.

Unwin M., Jales P., Tye J., et. al. Spaceborne GNSS-Reflectometry on TechDemoSat-1: Early mission operations and exploitation // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Doi: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.