

В. Г. ПЕШЕХОНОВ, О. А. СТЕПАНОВ, В. Г. РОЗЕНЦВЕЙН,
А. А. КРАСНОВ, А. В. СОКОЛОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ АЭРОГРАВИМЕТРОВ

Представлен обзор современного состояния разработок в области бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров, которые обладают значительными преимуществами перед гиросtabilизированными гравиметрами в части габаритов, энергопотребления и стоимости и существенно расширяют возможности гравиметрической съемки. Описаны технические решения, позволяющие реализовать бесплатформенные аэрогравиметры. Обсуждены тенденции их развития, включая вопросы комплексирования данных бесплатформенных и гиросtabilизированных гравиметров.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, вектор возмущения силы тяжести, аномалия силы тяжести, бесплатформенный аэрогравиметр, векторный аэрогравиметр, скалярный аэрогравиметр, инерциальный измерительный модуль, глобальные навигационные спутниковые системы.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, научный руководитель, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Директор, Институт информационно-навигационных систем Университета ИТМО (С.-Петербург). Президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением»

Степанов Олег Андреевич. Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, начальник научно-образовательного центра, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО. Вице-президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0003-3640-3760.

Розенцвейн Владимир Георгиевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Краснов Антон Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела гравинерциальных и оптоэлектронных комплексов, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0003-0298-2418.

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-6423-1591.

Введение

Знание параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) необходимо для решения разнообразных задач геодезии, геологии и высокоточной инерциальной навигации. Для изучения гравитационного поля используется ряд методов, отличающихся по точности и пространственному разрешению: наземная гравиметрическая съемка в отдельных пунктах земной поверхности; съемка с подвижных объектов (морская и аэрогравиметрическая съемка); спутниковые методы (методы космической геодезии) [1–12].

Наземная гравиметрическая съемка является самой точной, с наилучшим пространственным разрешением, но обладает очень низкой производительностью [9, 12]. В результате выполнение полевых экспедиционных работ на значительных площадях становится неэкономичным. К тому же на Земле далеко не все районы доступны для такой съемки.

Методы космической геодезии вносят значительный вклад в создание и развитие глобальных моделей ГПЗ [6, 10], однако на больших высотах ослабление ГПЗ ограничивает их пространственное разрешение, что дает возможность получить точную информацию лишь о длинноволновой части поля и не позволяет только по спутниковой информации определять его локальные аномалии с достаточным разрешением [8, 10, 13].

Съемка с подвижных объектов с точки зрения точности и пространственного разрешения – сегодня наиболее важное связующее звено между наземной съемкой и спутниковыми методами.

Основной задачей гравиметрии является определение аномального ГПЗ, описываемого вектором возмущения силы тяжести (ВСТ), который определяется как разность вектора силы тяжести и вектора нормальной силы тяжести в одной и той же точке измерения. Частный случай этой задачи – определение аномалии силы тяжести (АСТ), представляющей собой величину вектора ВСТ вдоль истинной вертикали [7, 9, 10].

Поскольку настоящая работа в значительной степени посвящена вопросам, связанным с инерциальной гравиметрией, уточним смысл этого термина. При этом представляется разумным отталкиваться от определения гравиметрии как науки, как это делается в большинстве случаев, например в [5, 10, 14, 15]. Таким образом, под инерциальной гравиметрией следует понимать науку, представляющую собой определенный раздел гравиметрии. Заметим, что нередко этот момент упускается и под инерциальной гравиметрией понимается метод определения ГПЗ, технология и т.п. Такую, на наш взгляд, терминологическую неточность можно встретить, например, у В. Торге [5, с. 271] и в работах известного канадского ученого К.Р. Шварца [16], по сути заложившего основы современной теории инерциальной гравиметрии [16, 17]. В России первые исследования на эту тему были представлены в публикациях В.Л. Пантелеева и его коллег [18, 19]. В них, как ни странно, определение инерциальной гравиметрии в явном виде не введено. Хотя в одной из последних работ В.Л. Пантелеева этот термин предлагается использовать «для обозначения всех задач, возникающих при измерении напряженности гравитационного поля в движении» [20]. В дальнейшем в работах российских ученых инерциальная гравиметрия определяется достаточно широко – как «прикладная наука об определении силы тяжести по движению чувствительной массы» [15]. С учетом сказанного в настоящей работе под *инерциальной гравиметрией* будем понимать раздел гравиметрии, касаю-

щийся изучения (измерения) ГПЗ на подвижном основании с использованием инерциальных технологий. Соответственно, гравиметры, предназначенные для определения аномального ГПЗ на подвижном основании и построенные с применением тех же технологий, будем называть инерциальными.

При решении задач, стоящих перед инерциальной гравиметрией, на сегодняшний день могут быть задействованы три типа измерительных средств: инерциальные скалярные гравиметры, инерциальные векторные гравиметры и гравитационные градиентометры.

Инерциальные скалярные гравиметры, или просто скалярные гравиметры, предназначены для определения величины вектора ВСТ вдоль истинной вертикали. Современные скалярные гравиметры для подвижных объектов опираются в основном на технологии, связанные с построением гиросtabilизированных платформ и привлекающие данные глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). Эти технологии имеют высокий уровень аппаратной и программной отработанности и обеспечивают высокую точность измерения АСТ – 0,05-0,5 мГал, позволяющую решить многие задачи гравиметрии [10]. Тем не менее гравиметрам, использующим гиросtabilизированные платформы, присущ ряд недостатков, главными из которых являются следующие [9, 21, 22]:

- большие массогабаритные характеристики: объем – до 100 л, вес – до 100 кг;
- значительное энергопотребление, достигающее сотен ватт;
- высокая стоимость, в частности обусловленная наличием гиросtabilизированной платформы;
- необходимость обслуживания в процессе эксплуатации;
- высокая стоимость полевых экспедиционных работ, определяемая стоимостью эксплуатации носителей – надводных судов и летательных аппаратов (ЛА);
- трудности при использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как носителей, сложности проведения съемок с облетом рельефа.

Этих недостатков лишены скалярные гравиметры для подвижных объектов, опирающиеся на технологии, связанные с применением бесплатформенных инерциальных систем. Такие гравиметры называют бесплатформенными инерциальными скалярными гравиметрами, или просто бесплатформенными скалярными гравиметрами [9].

Инерциальные векторные гравиметры предназначены для определения всех трех компонент вектора ВСТ, оценки которых относят к системе координат, связанной с референц-эллипсоидом. Как и в случае скалярных гравиметров, построение векторных гравиметров может опираться на использование либо платформенных инерциальных систем, либо бесплатформенных систем. В последнем случае также говорят о бесплатформенных (бескарданных) инерциальных векторных, или бесплатформенных векторных, гравиметрах [9; 10, с. 222; 19].

Бесплатформенные векторные гравиметры, так же как и скалярные, лишены недостатков, присущих гиросtabilизированным гравиметрам. Кроме того, они имеют значительные преимущества перед скалярными в части определения параметров ГПЗ. Это обусловлено принципиальной возможностью вычисления уклонений отвесной линии и высот геоида вдоль траектории движения непосредственно по их показаниям [21, 23–25]. Такой путь значительно проще и гораздо менее трудоемкий по сравнению с нахождением этих параметров с использованием АСТ на большой площади, как этого требуют формулы Венинга-Мейнеса и Стокса [5]. Помимо этого,

независимые измерения горизонтальных компонент силы тяжести упрощают решение обратной задачи геофизики. По данным площадной съемки компонент вектора ВСТ могут быть вычислены градиенты силы тяжести с привлечением минимального количества информации, которая позволяет выявлять резкие изменения плотности в структуре земной коры [26, 27].

Гравитационные градиентометры предназначены для определения составляющих тензора вторых производных геопотенциала [10, с. 245; 28]. Преимущество использования вторых производных геопотенциала заключается в возможности получения с высоким разрешением приращений полного вектора силы тяжести, вектора ВСТ, включая и уклонения отвесной линии, однако разработка, изготовление и эксплуатация гравитационных градиентометров относятся к самым сложным технологиям современного приборостроения. Несмотря на впечатляющие результаты при проведении гравиразведки и создании глобальных моделей ГПЗ по результатам спутниковых миссий, гравитационная градиентометрия остается уникальным и дорогостоящим методом определения параметров ГПЗ [29–33].

Из сказанного вытекает актуальность создания скалярных и векторных бесплатформенных инерциальных гравиметров, применение которых позволит повысить точность и пространственное разрешение съемки параметров ГПЗ.

Аэрогравиметрическая съемка обладает очевидными достоинствами, такими как высокая производительность и возможность выполнять измерения в труднодоступных районах, что и определяет ее активное развитие [9, 11, 15, 21, 34–37]. Вместе с тем она имеет и ряд следующих особенностей [5]:

- большие скорость и высота летательного аппарата (ЛА) ограничивают пространственное разрешение измерений;
- широкий спектр возмущающих ускорений ЛА влечет за собой повышенные требования к точности навигационного обеспечения, необходимого, в частности, для компенсации в показаниях гравиметров инерционных ускорений, в том числе расчета поправки Этвеша с учетом сжатия Земли и высоты полета [5, 38];
- необходимость редуцирования полученных оценок с высоты полета на поверхность эллипсоида.

Заметим, что первая особенность в меньшей степени характерна для вертолетов и различного рода беспилотных ЛА.

Проблемам, связанным с созданием и перспективами развития бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров, и посвящена предлагаемая статья. Акцент делается на аппаратной части аэрогравиметров и достигаемых на сегодняшний день точностях измерения. Вместе с тем следует отметить, что в бесплатформенных инерциальных аэрогравиметрах значительное место принадлежит алгоритмам обработки измерительной информации, полученной в результате гравиметрической съемки [10, с. 222–245]. Подробное обсуждение методов обработки данных заслуживает специального рассмотрения и выходит за рамки настоящей работы.

Статья содержит четыре раздела. В первом разделе рассмотрены принципы работы скалярных и векторных бесплатформенных инерциальных гравиметров, построенных на комплексировании бесплатформенных систем и ГНСС. Во втором – кратко описывается история создания и развития бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров, а также приводится информация о ведущих фирмах, работающих над их созданием. Третий раздел посвящен описанию аэрогравиметров, которые

в настоящее время либо находятся в опытной эксплуатации, либо прошли натурные испытания. В четвертом обсуждаются тенденции развития бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров. В заключении представлены основные выводы, сформулированные по результатам проведенного обзора.

1. Основные соотношения и принцип работы бесплатформенных инерциальных гравиметров

Для пояснения принципа работы бесплатформенного гравиметра приведем основные математические соотношения, используемые при его реализации. Для этого потребуются следующие четыре ортогональные правые системы координат (СК): геоцентрическая инерциальная СК «*i*» (Earth-centered inertial – ECI), геоцентрическая земная СК «*e*» (Earth-centered earth-fixed – ECEF), СК, связанная с носителем «*b*» (body-fixed), и сопровождающая географическая СК «*n*» (local navigation frame) [39, 40]. Будем считать, что чувствительные массы триады акселерометров точечные и совмещены в одной и той же точке (точке наблюдения), определяемой в инерциальной системе координат радиус-вектором r . Полагаем, что СК «*b*» и СК «*n*» имеют общее начало координат в этой точке. При этом в СК «*b*» одна из осей x направлена параллельно диаметральной плоскости носителя (вдоль носителя), вторая y – вправо, а третья z – вниз, а в СК «*n*» одна из осей N направлена на север, вторая E – на восток, а третья D задается внутренней нормалью к общему земному или к референц-эллипсоиду [39].

В [10, с. 223] отмечается, что, как и в случае с бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС), уравнения идеальной работы векторного бесплатформенного гравиметра можно записать с привлечением разных опорных СК. Для определенности здесь будем ориентироваться на сопровождающую географическую СК.

Запишем показания акселерометров, измеряющих кажущееся ускорение f , которое представляет собой разность абсолютного ускорения чувствительной массы акселерометра, обусловленного движением объекта \ddot{r}^i , и силы тяжести g [9, 35]:

$$f^i = \ddot{r}^i - g^i. \quad (1)$$

Здесь и далее верхним индексом обозначается та система координат, в которой задается соответствующий вектор. Отметим, что в зарубежной литературе выходной сигнал акселерометров f принято называть удельной силой (specific force), а абсолютное ускорение \ddot{r} называют инерционным, или кинематическим (kinematic acceleration) [41–43].

Из уравнения (1) получаем следующее выражение для вектора силы тяжести:

$$g^i = \ddot{r}^i - f^i. \quad (2)$$

Будем полагать, что вектор силы тяжести необходимо определить в сопровождающей географической СК координат «*n*». В таком случае измерения акселерометров из связанной СК «*b*» надо преобразовать в географическую «*n*». Используем для этого матрицу направляющих косинусов C_b^n , определяемую в виде [39, 44, 45]

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \psi & -\cos \chi \cdot \sin \psi + \sin \chi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi & \sin \chi \cdot \sin \psi + \cos \chi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi \\ \cos \theta \cdot \sin \psi & \sin \chi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \chi \cdot \cos \psi & -\sin \chi \cdot \cos \psi + \cos \chi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \chi \cdot \cos \theta & \cos \chi \cdot \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ψ, θ, χ – соответственно углы поворота вокруг осей рыскания (вертикальная ось, направленная вниз), тангажа (ось, направленная вправо) и крена (ось, направленная вдоль носителя) СК «b».

Для того чтобы в показаниях акселерометров учесть ускорение Кориолиса и центробежные силы, необходимо ввести в уравнение, определяющее вектор ВСТ $\delta g^n = g^n - \gamma^n$, поправку Этвеша δg_{eot}^n :

$$\delta g^n = \ddot{r}^n - C_b^n f^b + \delta g_{eot}^n - \gamma^n, \quad (4)$$

где $\gamma^n = [0 \ 0 \ \gamma_D]^T$ – вектор нормальной силы тяжести на высоте h над эллипсоидом, направленный вдоль его нормали.

Для вычисления значения γ_D может быть использована формула Клеро с учетом вертикального градиента нормальной силы тяжести [1]

$$\gamma_D = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi) - 2\omega_0^2 h, \quad (5)$$

в которой $\beta = \frac{\gamma_p - \gamma_e}{\gamma_e}$ – относительный избыток силы тяжести на полюсе;

$\alpha = \frac{a-b}{a}$ – сжатие эллипсоида; a и b – большая и малая полуоси эллипсоида;

$\beta_1 = \frac{\alpha^2}{8} + \frac{1}{4}\alpha\beta$; γ_p, γ_e – нормальная сила тяжести на полюсе и экваторе соответственно;

ω_0 – частота Шулера ($1,24 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$); h – высота носителя над эллипсоидом.

Поправка Этвеша имеет вид [2, 41]:

$$\delta g_{eot}^n = 2\Omega_{ie}^n \dot{r}^n + \Omega_{en}^n \dot{r}^n, \quad (6)$$

где

$$\Omega_{ie}^n = \omega_{ie} \begin{bmatrix} 0 & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} - \quad (7)$$

кососимметричная матрица, определяющая вращение геоцентрической СК относительно инерциальной, заданное в СК «n» (здесь и далее первый подстрочный индекс относится к СК, относительно которой поворачивается СК, обозначаемая вторым подстрочным индексом, а верхний индекс указывает на ту СК, в которой это вращение задается); ω_{ie} – угловая скорость вращения Земли; φ – геодезическая широта;

$$\Omega_{en}^n = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\dot{r}_E \text{tg} \varphi}{R_E + h} & -\frac{\dot{r}_N}{R_N + h} \\ -\frac{\dot{r}_E \text{tg} \varphi}{R_E + h} & 0 & -\frac{\dot{r}_E}{R_E + h} \\ \frac{\dot{r}_N}{R_N + h} & \frac{\dot{r}_E}{R_E + h} & 0 \end{bmatrix} - \quad (8)$$

кососимметричная матрица, определяющая переносную скорость вращения сопровождающей СК «*n*» относительно геоцентрической «*e*»; $\dot{r}_N, \dot{r}_E, \dot{r}_D$ – проекции линейной скорости носителя на оси (*N* – северную, *E* – восточную, *D* – вертикальную) сопровождающей СК; R_N и R_E – радиусы кривизны эллипсоида в плоскости меридиана и первого вертикала соответственно;

$$\dot{r}^n = \begin{bmatrix} \dot{r}_N \\ \dot{r}_E \\ \dot{r}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + h)\dot{\varphi} \\ (R_E + h)\cos\varphi \cdot \dot{\lambda} \\ -\dot{h} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где λ – геодезическая долгота. Здесь и далее верхний индекс у компонент векторов в целях упрощения опускается.

Первый член уравнения (6) определяет ускорение Кориолиса; второй – центробежное ускорение, обусловленное движением объекта относительно Земли. Выше предполагается, что центробежное ускорение, вызванное вращением Земли, уже включено в γ^n .

Матрица направляющих косинусов C_b^n может быть вычислена путем интегрирования уравнения Пуассона, записываемого в виде [44]

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n, \quad (10)$$

где

$$\Omega_{ib}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z^b & \omega_y^b \\ \omega_z^b & 0 & -\omega_x^b \\ -\omega_y^b & \omega_x^b & 0 \end{bmatrix} - \quad (11)$$

кососимметричная матрица, определяющая вращение СК «*b*» относительно инерциальной СК «*i*» в осях СК «*b*» по измерениям $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ от датчиков угловой скорости (ДУС);

$$\Omega_{in}^n = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin\varphi + \frac{\dot{r}_E \operatorname{tg}\varphi}{R_E + h} & -\frac{\dot{r}_N}{R_N + h} \\ -\omega_{ie} \sin\varphi - \frac{\dot{r}_E \operatorname{tg}\varphi}{R_E + h} & 0 & -\omega_{ie} \cos\varphi - \frac{\dot{r}_E}{R_E + h} \\ \frac{\dot{r}_N}{R_N + h} & \omega_{ie} \cos\varphi + \frac{\dot{r}_E}{R_E + h} & 0 \end{bmatrix} - \quad (12)$$

кососимметричная матрица, определяющая вращение сопровождающей СК «*n*» относительно инерциальной СК «*i*» в осях «*n*».

Для определения вектора ВСТ на основе уравнений (4) и (6) можно записать следующее выражение:

$$\delta g^n = \ddot{r}^n - C_b^n f^b + (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) \dot{r}^n - \gamma^n. \quad (13)$$

Уравнение (13) задает как горизонтальные, так и вертикальную компоненты вектора ВСТ. Для вертикальной компоненты из (13) нетрудно получить следующее выражение:

$$\delta g_D = \ddot{r}_D - f_D + (2\omega_{ie} \cos\varphi + \frac{\dot{r}_E}{R_E + h}) \cdot \dot{r}_E + \frac{\dot{r}_N^2}{R_N + h} - \gamma_D. \quad (14)$$

С учетом приведенных соотношений можно следующим образом пояснить принцип работы векторного бесплатформенного гравиметра (рис. 1), входной информацией для которого являются данные от инерциальных датчиков и ГНСС.

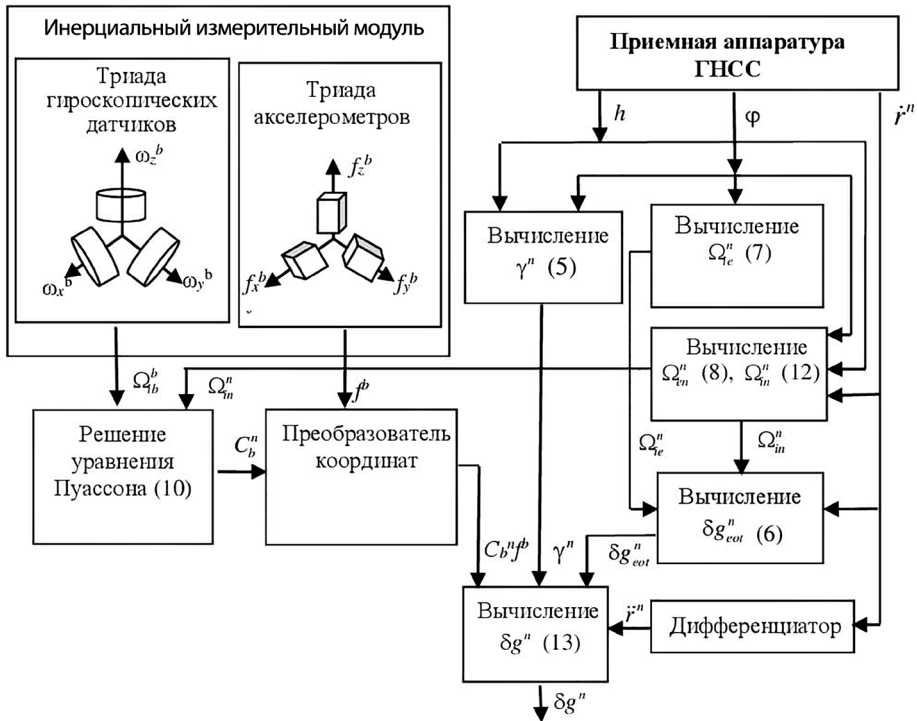


Рис. 1. Структурная схема векторного бесплатформенного инерциального гравиметра

С использованием триады акселерометров в СК, связанной с носителем, измеряются три составляющие f_x^b, f_y^b, f_z^b вектора f^b кажущегося ускорения, а с использованием триады гироскопических ДУС – три составляющие $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ вектора угловой скорости объекта в инерциальном пространстве, определяющие матрицу Ω_b^b . Далее осуществляется преобразование вектора кажущегося ускорения f^b из СК, связанной с объектом, в сопровождающую географическую СК с помощью матрицы направляющих косинусов C_b^n . Эта матрица может вычисляться путем решения уравнения Пуассона по данным об угловой скорости носителя Ω_b^b , полученным от ДУС, и угловой скорости вращения сопровождающей географической СК Ω_m^n . Приемная аппаратура ГНСС выработывает географические координаты и составляющие линейной скорости носителя, необходимые при вычислении поправки Этвеша, вектора нормальной силы тяжести γ^n , при формировании элементов матриц $\Omega_{te}^n, \Omega_{en}^n, \Omega_m^n$ и вычислении $i\dot{\dot{}}^n$. Далее с помощью уравнений (13) или (14) находятся либо все компоненты вектора ВСТ δg^n , либо АСТ δg_D .

Из представленного описания следует, что в состав бесплатформенного векторного гравиметра должны входить:

- триада акселерометров, измеряющих три составляющие кажущегося ускорения f_x^b, f_y^b, f_z^b в СК, связанной с объектом;
- триада гироскопических ДУС, измеряющих три составляющие угловой скорости вращения сопровождающей географической СК относительно инерциального пространства в СК, связанной с объектом;

- высокоточная спутниковая приемная аппаратура, обеспечивающая определение псевдодальностей и псевдоскоростей, по которым вырабатываются параметры движения основания, т.е. географические (геодезические) координаты и составляющие линейных скоростей в сопровождающей географической СК;
- вычислитель, обеспечивающий в том числе определение матрицы преобразования C_b^n от СК, связанной с объектом, к сопровождающей географической СК, и поправки Этвеша.

Принцип работы векторного бесплатформенного инерциального гравиметра описан в предположении, что все используемые выше величины точно известны. Поскольку реально это не так, большое значение имеют методы обработки измерительной информации, получаемой в результате гравиметрической съемки.

Как отмечалось во введении, вопросы, связанные с обработкой измерительной информации в бесплатформенных аэрогравиметрах, остаются за рамками настоящей статьи. Отметим лишь, что в бесплатформенной бортовой гравиметрии используются разнообразные методы обработки информации, которые можно условно разделить на две группы [41, 46]. Так называемые *прямые* методы подразумевают, что вектор ВСТ вычисляется путем формирования разности абсолютных и кажущихся ускорений, измеряемых акселерометрами. В этом случае по имеющимся от спутниковой аппаратуры данным требуется определять \ddot{r}^n [9, 35, 41, 47, 48]. По сути, структурная схема, приведенная на рис. 1, и соответствует этой группе. В *косвенных* методах при определении вектора ВСТ сопоставляются не ускорения, а позиционные и (или) скоростные измерения, полученные по данным ГНСС и инерциальных датчиков, чем и обусловлено название метода [41, 47–50]. Широкое применение здесь получили алгоритмы, основанные на использовании фильтра Калмана (ФК). Специфика тех или иных вариантов построения таких алгоритмов зависит от структуры вектора состояния и правил формирования измерений, используемых в ФК. Например, это могут быть разности координат и (или) скоростей, полученных по данным ГНСС и инерциальных датчиков, – так называемая слабосвязанная схема комплексирования. В некоторых случаях предпочтение отдают сильносвязанному варианту, при котором в качестве измерений в ФК используются разности измеренных и вычисленных значений псевдодальностей и (или) псевдоскоростей [10, 51–53]. При обработке измерительной информации в бесплатформенных инерциальных гравиметрах предполагается также привлечение различного рода дополнительной информации, использование в реальном времени и в режиме постобработки специальных алгоритмов фильтрации и сглаживания промежуточной и измерительной информации, специальных алгоритмов калибровки и компенсации систематических погрешностей инерциальных датчиков, различных математических моделей погрешностей используемых измерителей и моделей оцениваемого полезного сигнала. Важная роль принадлежит алгоритмам получения высокоточной информации по данным ГНСС и задачам синхронизации инерциальных и ГНСС-данных [10].

Из сказанного следует, что бесплатформенный инерциальный гравиметр в сущности представляет собой сложную измерительную систему, содержащую в аппаратной части инерциальную, спутниковую и вычислительную составляющие, а в алгоритмической – составляющую, обеспечивающую необходимые вычисления как на борту объекта, так и в режиме постобработки. Нетрудно заметить, что бесплат-

форменная инерциальная гравиметрическая система по своему составу совпадает с БИНС, интегрированной со спутниковой аппаратурой. По аналогии можно ввести аббревиатуру «БИГС», расшифровывающуюся как «бесплатформенная инерциальная гравиметрическая система».

Специфика БИГС заключается в обязательном наличии высокоточной внешней информации о координатах и скорости движения объекта. Это, как справедливо отмечается в [10, с. 222–245], позволяет упростить алгоритмы идеальной работы по сравнению с алгоритмами, используемыми в БИНС. В частности, можно выделить две самостоятельные задачи – определение горизонтальных составляющих вектора ВСТ и определение АСТ – по аналогии с тем, как в БИНС выделяется вертикальный канал. Заметим, что в БИГС, так же как и в БИНС, требуется начальная информация об ориентации носителя. Следует подчеркнуть, что в бесплатформенном гравиметре инерциальная система не обязана функционировать как навигационная, а может рассматриваться только в качестве регистратора измерений инерциальных датчиков – акселерометров, гироскопических датчиков угловой скорости, синхронизированных с данными ГНСС [10, с. 223]. В то же время необходимо иметь в виду, что при упрощении алгоритмов БИГС эта система в отличие от БИНС, интегрированной с ГНСС, теряет возможность определения навигационных параметров в случае пропадания спутниковых сигналов.

Выше описан принцип работы бесплатформенного векторного гравиметра, однако понятно, что задача векторной гравиметрии может решаться и при использовании платформенных систем. Если в качестве навигационной СК выступает сопровождающая географическая СК, то в этом случае не потребуются перепроектирования кажущихся ускорений, измеряемых акселерометрами, из связанной в географическую СК [10].

И еще одно замечание. Приведенное здесь описание работы векторного инерциального гравиметра обсуждалось без привязки к типу подвижного носителя – ЛА или морскому объекту. Наибольшее развитие в настоящее время получают бесплатформенные аэрогравиметры (БА), обзор которых и представлен в статье. Вместе с тем векторные гравиметры могут быть использованы и на морских объектах, хотя здесь есть своя специфика. Известно, что при измерении АСТ на морских объектах приемлемых точностей можно достичь и без привлечения высокоточной внешней информации для компенсации инерционных ускорений [54]. Обратим внимание, что инерциально-геодезический метод определения горизонтальных составляющих ВСТ [10, с. 168], по сути, можно рассматривать как один из вариантов построения векторного гравиметра, направленного на определение именно этих составляющих вектора ВСТ. В этой связи можно заметить, что вопросы построения БИГС для морских объектов заслуживают специального рассмотрения.

2. Краткая история создания и развития бесплатформенных аэрогравиметров

Как отмечается в ряде работ [11, 15, 55], предложения по построению скалярных инерциальных аэрогравиметров появились в конце 1950-х – начале 1960-х годов [56, 57]. 6 и 7 ноября 1958 года на борту самолета ВВС США KC-135 над авиабазой «Эдвардс» в Калифорнии были проведены первые испытания морского гравиметра

LaCoste&Romberg (LCR), которые показали точность определения АСТ порядка 10 мГал при осреднении на пятиминутном интервале [57]. В 1959–1960 годах начали проводиться летные эксперименты с сильно демпфированными кварцевыми, струнными гравиметрами (СССР) и морским гравиметром LCR (США), размещаемыми в кардановом подвесе. Поскольку приборы того времени не обладали необходимой точностью, целью испытаний было исследование возможностей аэрогравиметрии. Гравиметры работали совместно с фотограмметрическими камерами и (или) доплеровскими радиолокационными системами для определения местоположения и уникальными гипсометрами для измерения высоты. Для повышения точности измерений использовались вертолеты, поскольку они перемещаются с малой скоростью на низкой высоте. В 1965 году были проведены испытания на вертолете ВВС США СНЗЕ, оснащенный морским гравиметром LCR в кардановом подвесе. Местоположение вертолета определялось с помощью радиолокационного слежения, а высота измерялась лазерным высотомером.

Основные трудности аэрогравиметрии на тот момент были вызваны неточностями в позиционировании и определении высоты полета ЛА. И лишь активное развитие во второй половине 1980-х годов спутниковых навигационных систем позволило преодолеть этот основной сдерживающий фактор [57–60]. В то же самое время стали появляться многочисленные исследования, посвященные разнообразным аспектам проектирования и испытаний скалярных бесплатформенных инерциальных аэрогравиметрических комплексов на базе бесплатформенных инерциальных систем (БИНС) (далее – бесплатформенных аэрогравиметров, БА).

Уже в 1986 году по результатам натурных испытаний было показано, что инерциальный измерительный модуль (ИИМ) БИНС может обеспечить погрешность определения вертикальных составляющих вектора силы тяжести или вектора ВСТ от 2,5 до 4 мГал [61]. Измерения выполнялись на наземном транспортном средстве с использованием так называемых ZUPT-коррекций (Zero-Velocity Update) [9, 62, 63]. Этот тип коррекций предполагает периодические остановки (приземления) объекта и привлечение информации о его нулевой скорости, но в аэрогравиметрии может активно применяться лишь в качестве носителей БА – вертолетов и БПЛА [64, 65].

В последние годы наряду с аэрогравиметрическими съемками активно развивается аппаратная составляющая БА с целью повышения точности инерциальных датчиков, совершенствования систем термостатирования, уменьшения весогабаритных характеристик, внедрения методов комплексирования гравиметрических датчиков различных типов и т.д. Значительная работа проводится и в области повышения эффективности алгоритмического обеспечения БА (как скалярных, так и векторных).

Как правило, для создания БА применяются аппаратные средства, выпускаемые продвинутыми в своей области фирмами, такими как Honeywell [66], Litton (в 2001 г. фирма Litton была приобретена компанией Northrop Grumman [67]), SAGEM (в 2005 г. объединилась с компанией Snesma, образовав холдинг SAFRAN [68]), iXblue [69], iMAR [70], ООО НТП «Гравтехнология» [71]. В табл. 1 представлена информация об основных известных в настоящее время скалярных БА и их разработчиках (данных о коммерческих образцах векторных БА авторам обнаружить не удалось) и ряде публикаций, в которых описываются результаты, полученные с использованием этих приборов.

Основные модели БА и их разработчики

Модель	Разработчики	Год создания	Ссылки на источники
Laseref III	Университет Калгари, Канада; Honeywell, США	1995	17, 24, 49, 72–75
LITTON LN-200	Астрономическая обсерватория Университета Порту, Португалия; Litton, США	1997	76, 77
SAGEM Sigma 30	Мюнхенский университет Федеральных вооруженных сил, Германия; SAGEM, Франция	2003	78
SAGS4	Баварская академия наук, Мюнхен, Германия	2005	79
SGA-WZ-01 SGA-WZ-02	Лаборатория инерциальных технологий Национального университета оборонных технологий, Китай	2008	80–84
AIRINS	iXblue, Франция	2010	48
GT-X	ООО НТП «Гравтехнология»; Раменский приборостроительный завод; Лаборатория управления и навигации МГУ, Россия	2011	85
iNAV-RQH	iMAR Navigation gmbH, Reihersbruch, Германия	2013	9, 55, 86–89, 94
iNAT-RQH		2016	
iNAV-FMS		2017	
iCORUS+iDGU-100x			
iCORUS: iCORUS-01* iCORUS-01-wts* iCORUS-02 iCORUS-02-wts iCORUS-03		2020	

Примечание: * БА подпадает под экспортные ограничения; wts – без термостабилизации.

3. Бесплатформенные инерциальные аэрогравиметры

В настоящем разделе рассматриваются БА, результаты испытаний которых использовались для поиска путей их дальнейшего развития и создания более совершенных образцов. Некоторые из описанных БА в настоящее время находятся в эксплуатации.

3.1. Бесплатформенный гравиметр Laseref III (LRF III), Канада

Первый прототип скалярного БА был разработан в Университете Калгари, Канада. Его основу составлял ИИМ Honeywell Laseref III (LRF III) на базе лазерных

гироскопов GG1342 и акселерометров QA2000, характеристики которых представлены в табл. 2 [72].

Таблица 2

Характеристики лазерных гироскопов GG1342 и акселерометров QA2000

Параметр	Гироскопы	Акселерометры
Скорость ухода	0,003 °/ч	–
Смещение нуля	–	10–25 мГал
Нестабильность масштабного коэффициента	1,0 ppm	25–50 ppm
Несоосность	2"	5"
Случайный шум (σ)	0,001 °/√ч	5 мГал

В июне 1995 года были проведены первые летные испытания БА в сильно аномальном в гравитационном отношении районе над Скалистыми горами в Канаде (перепад АСТ от -70 до 100 мГал). Программа испытаний включала 4 галса протяженностью около 250 км. Скорость полета составляла 430 км/ч, что соответствовало пространственному разрешению от 5 до 7 км при использовании фильтра низких частот с частотой среза от $1/90$ Гц до $1/120$ Гц. Высота полета над эллипсоидом в среднем составляла $5,5$ км. Чтобы свести к минимуму воздействие турбулентности воздушных потоков, полеты проходили с 7.00 до 11.00 утра [17, 72].

Результаты испытаний показали, что среднеквадратическая погрешность (СКП) определения АСТ для отдельных галсов составила 3 мГал при пространственном разрешении 5 км и 2 мГал при разрешении 7 км, а СКП результатов измерений при сопоставлении с данными наземной съемки – 3 мГал для обеих уровней пространственного разрешения. Это побудило разработчиков к дальнейшим исследованиям. Появился ряд публикаций, в которых обсуждались результаты обработки данных кампании 1995 года [24, 50], а также последовавших за этим испытаний в сентябре 1996 года [72].

В июне 1998 года Университет Калгари совместно с Датской национальной службой геодезии и кадастра провели аэрогравиметрическую съемку у западного побережья Гренландии, задействовав гравиметры LRF-III и LCR, установленные на борту самолета Twin Otter. Подобное сравнение бесплатформенного и гиростабилизированного гравиметров осуществлялось впервые. Два галса были проложены над районом морской гравиметрической съемки для оценки точности измерения аэрогравиметров. Результаты показали, что оценки АСТ двух аэрогравиметров после устранения линейных трендов согласуются с данными морской съемки на уровне $2-3$ мГал [73].

В итоге был сделан вывод о перспективности комплексирования данных бесплатформенного и гиростабилизированного гравиметров для повышения точности и пространственного разрешения съемки [72–74]. Последние из упомянутых в литературе испытаний бесплатформенного гравиметра LFR III были проведены в 2000 году в окрестностях Оттавы, Канада [75, 76].

3.2. Бесплатформенный аэрогравиметр на базе ИИМ Litton LN-200, Португалия

Астрономическая обсерватория Университета Порту, Португалия, разработала в 1997 году БА на базе недорогого ИИМ тактического класса Litton LN-200. В рабо-

тах [76, 77] представлены результаты аэрогравиметрической съемки в районе Азорских островов, направленной на уточнение модели геоида в этом регионе. Вертикальная составляющая вектора силы тяжести была оценена с точностью 5-10 мГал при пространственном разрешении 10 км. Результаты летных испытаний этого аэрогравиметра описаны в подразделе 4.8, где в том числе сопоставляются данные, полученные с использованием различных гравиметров.

3.3. Бесплатформенный аэрогравиметр на базе ИИМ SAGEM Sigma 30, Германия

Бесплатформенный скалярный аэрогравиметр на базе ИИМ SAGEM Sigma 30 был разработан в начале 2000-х годов в Мюнхенском университете Федеральных вооруженных сил [78]. Его основу составили ИИМ производства французской фирмы SAGEM, включающие триады кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) и маятниковых акселерометров, а также мультиантенную спутниковую аппаратуру (рис. 2). При этом четыре антенны были установлены на фюзеляже и крыльях самолета с фиксированной базовой длиной от 3 до 14 м. Масса БА составляла 70 кг, потребляемая мощность – 150 Вт.



Рис. 2. Компоненты аэрогравиметра на базе ИИМ SAGEM Sigma 30 [78]:
 f – кажущиеся ускорения, ω – угловая скорость, ρ – координаты, θ – углы ориентации ЛА

Авторы работы [78] отмечали, что конфигурация с несколькими антеннами на ЛА существенно повышает надежность информации о полученных ускорениях, облегчает разрешение неоднозначности фазовых измерений и обеспечивает выработку дополнительной по отношению к ИИМ информации об ориентации.

Для подтверждения работоспособности скалярного БА в 2003–2004 годах на самолете Do-128-6 над гравиметрическим полигоном Германии были проведены испытания, в ходе которых продемонстрирована погрешность определения вертикальных компонент вектора ВСТ на уровне от 3 до 5 мГал и горизонтальных компонент на уровне 10-15 мГал с пространственным разрешением 1 км. Средняя скорость самолета составляла 70 м/с при высоте над землей 300 м. Каждый полет начинался и заканчивался калибровочными маневрами, обеспечивающими лучшие условия наблюдения для оценки погрешностей датчиков. В ходе съемки ускорения не превышали $0,2 \text{ м/с}^2$. На испытательном полигоне АСТ были известны с точностью $0,1 \text{ мГал}$ и пространственным разрешением 500 м. Максимальная АСТ составляла 70 мГал [78].

3.4. Бесплатформенный аэрогравиметр SAGS4, Германия

Бесплатформенный скалярный аэрогравиметр SAGS4 (Strapdown Airborne Gravimetry System) разработан Баварской академией наук, Германия, в 2005 году, его схема представлена на рис. 3 [79].

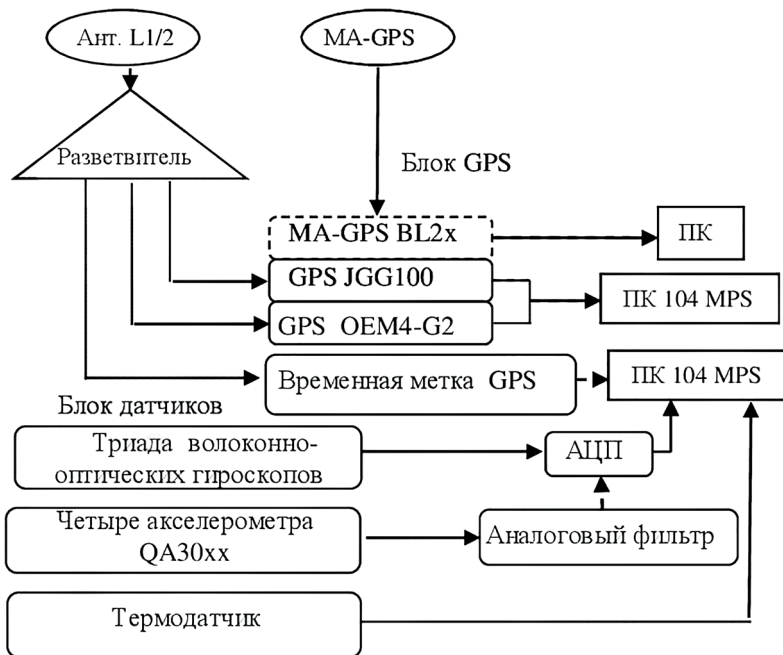


Рис. 3. Схема аэрогравиметра SAGS4 [79]

Вектор полного ускорения измерялся комплектом из четырех акселерометров Q-Flex QA-3000-030 с одним дублирующим акселерометром в вертикальном канале. Решение задачи ориентации осуществлялось по интегрированным данным, вырабатываемым триадой волоконно-оптических гироскопов и мультантенным GPS-приемником (MA-GPS).

В стандартной комплектации ИИМ были использованы амортизаторы для его виброизоляции, представляющие собой комбинацию эластомера и воздушного демпфера. Общий вес аэрогравиметра SAGS4 составляет около 30 кг. Обслуживание оператором в полете не предусматривалось. В 2005 году планировалась настройка терморегулирования, после чего БА должен был быть откалиброван и запущен в эксплуатацию. Однако после 2006 года упоминания о развитии или эксплуатации гравиметра SAGS4 отсутствуют.

3.5. Бесплатформенный аэрогравиметр SGA-WZ, Китай

Как отмечается в [80], первый китайский бесплатформенный скалярный аэрогравиметр SGA-WZ был разработан в Лаборатории инерциальных технологий Национального университета оборонных технологий (National University of Defense Technology – NUDT) в 2008 году. Бесплатформенный гравиметр SGA-WZ состоит из двух блоков (рис. 4) – блока чувствительных элементов и блока обработки и управления [81, 82].

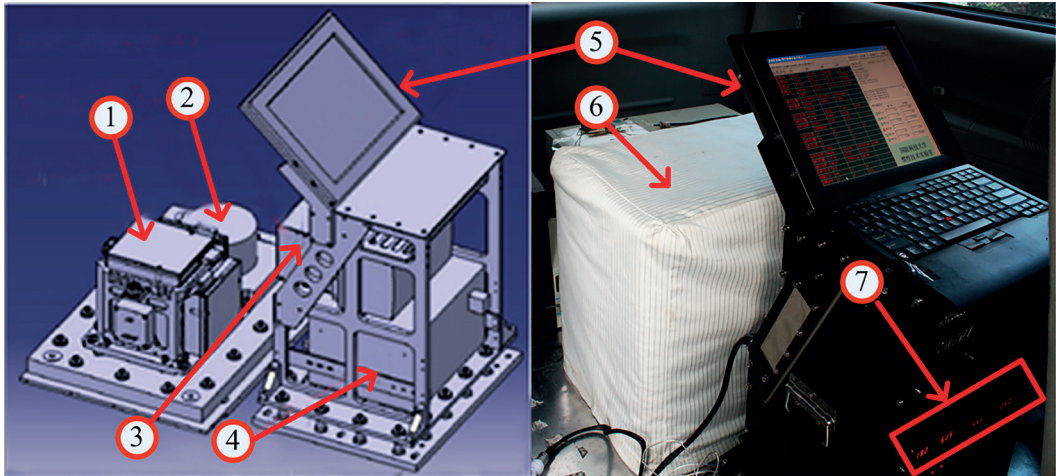


Рис. 4. 3D-модель гравиметра SGA-WZ без корпуса (слева) и внешний вид гравиметра (справа) [82]

Как указано на рис. 4, в блок чувствительных элементов входят триады лазерных гироскопов (1) и акселерометров (2), установленные на антивибрационной основе. Триады акселерометров и гироскопов разнесены в пространстве с целью избежать воздействия вибрационной подставки лазерных гироскопов. Температура стабилизируется за счет модулей управления (7), используемых для ее регулирования внутри защитной термооболочки (6), закрывающей инерциальные чувствительные элементы.

Блок обработки и управления состоит из устройства управления (3), источника бесперебойного питания (4), компьютера для записи всех данных и контроля состояния работающих приборов (5). Все инерциальные данные записываются с частотой 2 кГц, а данные ГНСС с двухчастотного приемника – с частотой 1 или 2 Гц.

В табл. 3 и 4 приведены характеристики гироскопов и акселерометров [81].

Для проверки характеристик гравиметра SGA-WZ первоначально проводились лабораторные испытания, которые в частности показали, что смещение нуля вертикального (Z) акселерометра за 104 дня составило 60 мГал, СКП показаний при учете квадратичной модели скорости смещения нуля варьировалось от 0,3 мГал до 0,6 мГал [81, 83]. Далее в 2007, 2009 и 2010 годах проводились дорожные и летные испытания. Из летных испытаний только последние были успешными. Они выполнялись на борту самолета Cessna 208 Grand Caravan, управление которым осуществлялось с помощью автопилота, в хорошую погоду, чтобы свести к минимуму эффекты турбулентности. Высота полета составляла порядка 400 м, средняя скорость – 60 м/с. Результаты испытаний показали, что СКП определения АСТ на повторных галсах составляет 1,6 мГал с пространственным разрешением 4,8 км. Разработчики отметили, что погрешности построения вертикали слишком велики для определения горизонтальных компонент вектора ВСТ с приемлемой точностью [80].

В 2012 году испытания БА SGA-WZ были проведены с участием представителей Датского технического университета (Technical University of Denmark – DTU) в Гренландии в сложных условиях полета над регионами гор и фьордов с АСТ, превышающими несколько сотен мГал, а также в более благоприятных условиях над морем. Полеты выполнялись на постоянных высотах: 2000 м над сушей и 360 м над морем. Скорость полета составляла порядка 70 м/с. Результаты определения АСТ сопостав-

лялись с данными морской и аэрогравиметрической съемок, выполненных ранее в этом районе с использованием гравиметров LCR. Испытания показали, что СКП определения АСТ не превышает 1 мГал при пространственном разрешении 6 км в условиях сильно аномального ГПЗ. Было отмечено, что основной проблемой остается долговременная стабильность показаний БА, влияющая на систематическую погрешность определения АСТ и зависящая прежде всего от температурной стабильности инерциальных датчиков [81, 82].

Таблица 3

Характеристики гироскопов гравиметра SGA-WZ

	Скорость ухода, °/ч		Масштабный коэффициент	
	Нестабильность	Повторяемость	Повторяемость (1σ)	Нелинейность (1σ)
X	0,0033	0,00044	$8,7 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$
Y	0,0032	0,00038	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$
Z	0,0029	0,00157	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4

Характеристики акселерометров гравиметра SGA-WZ

Параметр	X	Y	Z
Диапазон, g	±10	±10	±10
Смещение нуля, мкг	8,1	9,7	2,8
Нестабильность масштабного коэффициента, ppm	23,3	19,9	5,5
Температурный коэффициент, мкг/°C	8,4	-3,6	11,5

Для гравиметра SGA-WZ была разработана трехуровневая система терморегулирования. Каждый уровень имеет свой собственный слой теплоизоляции, нагревательный элемент, датчики температуры и модуль управления [84]. Новая модель аэрогравиметра с улучшенной системой терморегулирования получила название SGA-WZ-02. Сама система терморегулирования выполнена в виде компактной структуры (рис. 5), что значительно снижает ее объем и энергопотребление.

В работе [84] отмечается, что тепловой анализ температурного поля с помощью программы ANSYS позволил выбрать новые точки измерения температуры в системе управления, оптимизировать компоновку нагревательного слоя и выбрать новый теплоизоляционный слой. Результаты лабо-

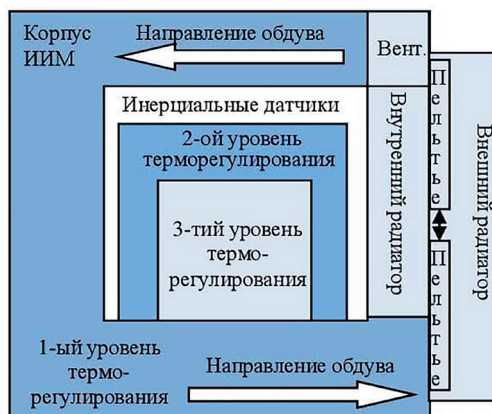


Рис. 5. Структура трехуровневой системы терморегулирования гравиметра SGA-WZ-02 [84]

раторных и летных экспериментов гравиметра SGA-WZ-02 совместно с гиросtabilизированным гравиметром GT-2A, изложенные в работе [84], оказались значительно лучше, чем у предыдущей модели гравиметра: СКП определения АСТ была уменьшена в 2 раза: с 1,5 мГал для SGA-WZ до 0,75 мГал для SGA-WZ-02 при пространственном разрешении 4,8 км.

3.6. Бесплатформенный аэрогравиметр GT-X, Россия

Бесплатформенный скалярный аэрогравиметр GT-X построен на основе лазерного гироскопа 3DOF, четырех маятниковых акселерометров А-17 с горизонтальной ориентацией осей чувствительности и гравиметрического датчика АК-8, аналогичного используемому в гиросtabilизированных гравиметрах серии GT (рис. 6). В состав гравиметра GT-X также входит термостат для блока акселерометров и амортизатор [85].

Гравиметр GT-X создан тремя компаниями:

- ООО НТП «Гравтехнология» [71], которая разработала конструкцию и бортовое программное обеспечение;
- Раменским приборостроительным заводом [88], создавшим программное обеспечение лазерного гироскопа и изготовившим опытный образец гравиметра;
- Лабораторией управления и навигации МГУ [101], разработавшей программное обеспечение постобработки данных гравиметра.

На основе анализа многочисленных данных аэрогравиметрической съемки с использованием гравиметров серии GT разработчиками были сформированы требования к ИИМ гравиметра GT-X, которые представлены в табл. 5 [85].

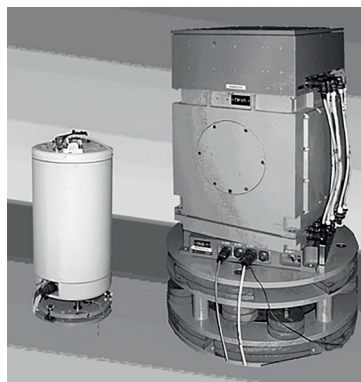


Рис. 6. Российский бесплатформенный аэрогравиметр GT-X [85]

Таблица 5

Требования, предъявляемые к ИИМ гравиметра GT-X

Параметр	Значение
СКП вычисления горизонта, "	10
Нестабильность скорости ухода лазерного гироскопа, °/ч	0,02
Нестабильность масштабного коэффициента гравиметрического датчика	10^{-4}
Нестабильность смещения нуля гравиметрического датчика, мГал	0,5
Нестабильность масштабного коэффициента горизонтального акселерометра	5×10^{-4}
Нестабильность смещения нуля горизонтального акселерометра, мГал	0,5

К особенностям построения гравиметра GT-X можно отнести следующие. В его состав входят две пары горизонтальных акселерометров, что позволило минимизировать погрешность определения АСТ, обусловленную эффектом кросс-каплинга, и устранить проблему пространственных смещений пробной массы. Для крепления инерциальных датчиков используется особая резонансная конструкция с противо-

весом, позволяющая исключить влияние вибрационной подставки лазерных гироскопов на показания гравиметра. Во время съемки выполняется предполетная и послеполетная калибровки геометрических и инструментальных погрешностей гравиметра с помощью специальной системы наклона вокруг трех осей. Характеристики гравиметра GT-X приведены в табл. 6 [85].

Таблица 6

Характеристики гравиметра GT-X

Параметр	Значение
Динамический диапазон, g	± 1
Потребляемая мощность, Вт	35
Рабочая температура, °C	+10 ... +50
Габариты, мм	$\varnothing 240 \times 450$
Вес, кг	22

Летные испытания опытного образца гравиметра GT-X проводились на борту самолета АН-26 на четырех коротких галсах в спокойных условиях полета. Оценка точности измерений производилась в сравнении с данными гравиметра GT-2А. Разность АСТ после уравнивания составила менее 3 мГал. Эта величина может быть принята за оценку текущей точности гравиметра GT-X [85].

3.7. Серия бесплатформенных аэрогравиметров фирмы iMAR, Германия

Фирма iMAR Navigation gmbH (далее – iMAR), Германия, разработала серию инерциальных навигационных систем iNAV и iNAT, построенных на кварцевых акселерометрах и гироскопических датчиках различных типов: лазерных, волоконно-оптических и микромеханических [86]. Эти датчики составляют основу перечисленных инерциальных навигационных систем ИИМ и используются фирмой iMAR для построения БА.

В 2013 году iMAR выпустила первый бесплатформенный скалярный гравиметр на базе ИИМ iNAV-RQH-1003. Наиболее важные функциональные компоненты этого БА представлены на рис. 7 [9].

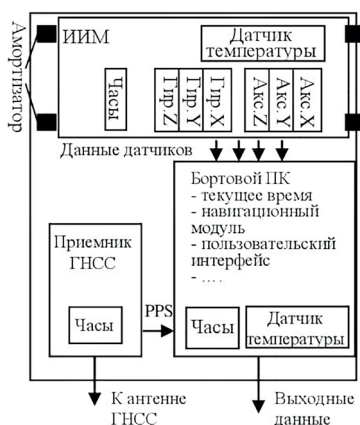


Рис. 7. Внешний вид и составные части гравиметра на базе ИИМ iNAV-RQH-1003 (показаны только значимые компоненты) [9]

Шесть инерциальных датчиков фирмы Honeywell, США, объединены в ИИМ, который также содержит датчик температуры и часы. Подробности о внутренней конструкции ИИМ, в частности о положении инерциальных датчиков и датчика температуры, в работе [9] не приводятся. ИИМ крепится к корпусу через амортизаторы, которые смягчают механические удары и высокочастотную вибрацию.

Одночастотный приемник ГНСС используется для дополнения данных ИИМ временными метками, внутренняя передача которых представляет собой комбинацию сигнала PPS (импульс в секунду – pulse per second) и навигационных данных в потоковом формате, где содержится информация о дате и времени.

Миниатюрная плата бортового ПК предназначена для сбора всей информации, в том числе инерциальных данных с меткой времени и навигационных решений в реальном времени. Эта плата также позволяет формировать данные о температуре ИИМ и данные от ее датчика температуры. Отмечается, что вывод данных о температуре ИИМ имеет решающее значение для тепловых калибровок. Габариты ИИМ iNAV-RQH-1003 составляют 20×20×35 см, вес – 12,5 кг, потребляемая мощность – менее 40 Вт. Характеристики инерциальных датчиков приведены в табл. 7 [9].

Т а б л и ц а 7

Характеристики инерциальных датчиков iMAR

Параметр	Акселерометры	Гироскопы
Модель	Honeywell Q-Flex QA-2000	Honeywell GG1320A
Тип	маятниковый кварцевый	кольцевой лазерный
Диапазон измерения	$\pm 20g$	$\pm 400 \text{ }^\circ/c$
Нелинейность масштабного коэффициента	<100 ppm	<5 ppm
Смещение нуля / скорость ухода	<25 мкг	<0,003 $^\circ/ч$
Случайный шум	<8 мкг/ $\sqrt{Гц}$	<0,002 $^\circ/\sqrt{ч}$

В период с октября 2013 года по январь 2016 года были проведены пять аэрограмметрических съемок в разных районах с БА на базе ИИМ iNAV-RQH-1003. Анализ данных показал, что может быть достигнута точность определения АСТ порядка 1 мГал и менее [9, 87].

В августе 2016 года БА iNAT на базе ИИМ протестирован на борту вертолета Eurocopter AS350 в Гренландии. Это был первый случай испытаний БА на вертолете при съемке с огибанием рельефа местности. СКП определения АСТ составила 2 мГал при пространственном разрешении 4,5 км [55].

БА фирмы iMAR постоянно совершенствуются с целью повышения точности и пространственного разрешения измерений [86]. По мнению ряда авторов [9, 89], основной проблемой БА является обеспечение стабильности смещения нуля акселерометров, которая зависит прежде всего от изменений температуры и напрямую влияет на точность определения составляющих вектора ВСТ. В литературе описаны различные стратегии решения этой проблемы [48, 90–92]: маневры самолета (например, вращение вокруг

осей крена или тангажа); применение повторных или внешних измерений (в том числе невязок в точках пересечения галсов, глобальных моделей ГПЗ); специальные методы калибровки ИИМ. Каждая из упомянутых стратегий имеет свои «плюсы» и «минусы». В качестве альтернативы тепловым калибровкам и поправкам, применяемым к акселерометрам, в работе [9] рекомендуется использовать ИИМ с внутренней системой термостабилизации или теплоизолированным корпусом. Фирма iMAR также пошла по этому пути и разработала блок стабилизации температуры iTempStab.

Блок iTempStab представляет собой теплоизоляционный корпус со встроенными модулями Пельтье. Этот блок через несколько часов прогрева стабилизирует температуру ИИМ iNAT с точностью более $0,1^{\circ}\text{C}$. Подробно алгоритм действия iTempStab описан в [89].

В работе [93] отмечается, что, хотя термостабилизация и повышает точность определения составляющих вектора ВСТ (особенно в длинноволновой части спектра), наличие такого блока ставит под сомнение преимущества БА перед традиционными гиросtabilizированными гравиметрами. Дополнительный температурный блок увеличивает габариты, вес и энергопотребление БА. Тем не менее БА с блоком термостабилизации находят достаточно широкое применение. Показано, что блок стабилизации температуры эффективно ограничивает смещение нуля акселерометров и улучшает оценку длинноволновой составляющей вектора ВСТ.

В рамках аэрогравиметрической съемки в Турции в 2017–2018 годах были исследованы возможности системы термостабилизации iTempStab. СКП определения АСТ в точках пересечения галсов съемки составляла около 3,6 мГал. После установки блока iTempStab она снизилась до 0,8 мГал. Сравнение с данными наземной съемки показало уменьшение СКП определения АСТ с 2,19 до 0,94 мГал [89].

Важно отметить, что гиросtabilizированные гравиметры по-прежнему имеют лучшую долговременную стабильность показаний по сравнению с бесплатформенными гравиметрами [93].

Одна из последних разработок фирмы iMAR – это серия БА iCORUS, которые в большей степени отвечают современным требованиям, предъявляемым к аэрогравиметрическим комплексам (рис. 8).

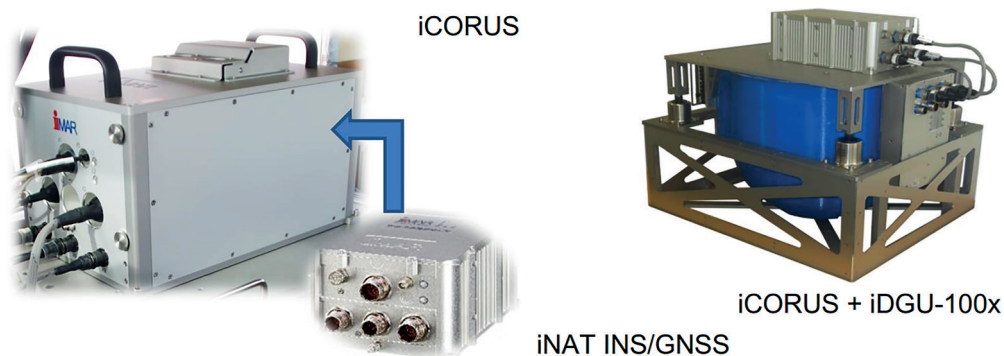


Рис. 8. Серия БА iCORUS [94]

Существует версия БА iCORUS с малым весом и небольшими размерами, предназначенная для применения, например, в БПЛА. Возможна совместная работа ИИМ с блоком iDGU-100x, обеспечивающим компенсацию систематических погрешностей

определения АСТ, обусловленных смещением нуля инерциальных датчиков БА. Как заявлено в [94], после удаления линейного смещения погрешность измерения АСТ с 1,5 мГал может быть снижена до 0,5-0,8 мГал.

К настоящему времени существуют следующие варианты БА: iCORUS-01 – гравиметр на основе КЛГ; iCORUS-01-wts – гравиметр без термостабилизации; iCORUS-02 – гравиметр на основе КЛГ; iCORUS-02-wts – гравиметр без термостабилизации; iCORUS-03 – гравиметр на основе волоконно-оптического гироскопа. Первые две модели БА подпадают под экспортные ограничения [94].

3.8. Совместные испытания аэрогравиметров

В этом подразделе описаны некоторые БА, которые подробно не обсуждаются в литературе, но упоминаются в ряде работ, посвященных совместному использованию различных аэрогравиметров.

В 2010 году над островом Мадейра, Португалия, были проведены совместные испытания трех БА: на базе ИИМ iNAV-FMS фирмы iMAR, ИИМ Litton LN-200 (подраздел 3.2), а также ИИМ iXblue AIRINS, Франция. Основные характеристики инерциальных датчиков приведены в табл. 8 [48].

Т а б л и ц а 8

Основные характеристики инерциальных датчиков сопоставляемых БА

Датчики	Параметр	ИИМ		
		iXblue	iNAV-FMS	Litton LN-200
Акселерометры	Случайный шум, мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$	15	50	110
	Нестабильность смещения нуля, мкг	100	1500	1500
Гироскопы	Случайный шум, $^{\circ}/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$	0,09	6,00	9,00
	Нестабильность скорости ухода, $^{\circ}/\text{ч}$	0,01	0,75	3,00

Испытания проходили на самолете ATR 42. Аэрогравиметры были размещены на единой монтажной плите вблизи центра масс самолета. Частота дискретизации данных составляла 100 Гц для ИИМ iXblue, 400 Гц для ИИМ iNAV-FMS и 200 Гц для ИИМ Litton LN-200.

СКП определения АСТ по данным двух полетов вычислялась в четырех вариантах:

- для каждого ИИМ путем сравнения результатов измерений на повторных галсах;
- для каждого ИИМ путем сравнения результатов измерений в точках пересечения галсов;
- при использовании результатов ИИМ более высокого качества для оценки точности двух других ИИМ;
- для каждого ИИМ при сравнении с редуцированной на топографию местности и высоту съемки спутниковой моделью ГПЗ EIGEN-6C4.

Анализировалось также пространственное разрешение измерений. При этом в режиме постобработки применялся фильтр низких частот с различными постоянными времени – 17, 60, 90 и 120 с.

Результаты оценки точности определения АСТ представлены в табл. 9 [48].

Результаты сопоставления БА

ИИМ	СКП определения АСТ, мГал (σ)	Постоянная времени фильтра, с			
		17	60	90	120
iXblue	по повторным галсам	2,1	1,9	1,6	1,5
	по пересечениям галсов	2,1	2,3	2,5	2,8
	—	—	—	—	—
	по сравнению с моделью EIGEN-6C4	4,4	4,5	4,5	4,5
iNAV-FMS	по повторным галсам	4,3	4,2	4,2	4,1
	по пересечениям галсов	5,0	4,9	4,8	4,8
	по сравнению с данными ИИМ iXblue	5,4	5,4	5,5	5,5
	по сравнению с моделью EIGEN-6C4	3,4	3,3	3,0	3,0
Litton LN-200	по повторным галсам	4,8	4,7	4,7	4,6
	по пересечениям галсов	4,7	4,7	4,8	5,1
	по сравнению с данными ИИМ iXblue	4,5	4,5	4,5	4,3
	по сравнению с моделью EIGEN-6C4	3,5	3,4	3,1	3,1

Меньшую СКП определения АСТ обеспечил ИИМ iXblue, для которого СКП по повторным галсам составила 2,1 и 1,6 мГал для пространственного разрешения 1,7 и 5,0 км соответственно. Обработка данных ИИМ iNAV-FMS была затруднена из-за нелинейного дрейфа в показаниях гравиметра, однако результаты этих испытаний продемонстрировали перспективность использования ИИМ фирмы iMAR для решения задач бесплатформенной аэрогравиметрии. ИИМ Litton LN-200 тактического класса показали точность порядка 4,5 мГал при пространственном разрешении 5 км.

4. Тенденции развития бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров

К современным тенденциям развития БА можно отнести поиск путей создания коммерческого образца векторного БА с необходимыми точностными характеристиками. Одним из основных препятствий при разработке такого гравиметра является погрешность решения задачи ориентации, которая, в свою очередь, определяется погрешностями гироскопических датчиков. Погрешность ориентации в 1" эквивалентна погрешности определения горизонтальных компонент и составляет 5 мГал [36, 37], в то время как та же погрешность ориентации для вертикальной составляющей составляет всего 5 мкГал. В работах [102, 103] отмечается возможность достижения точности определения горизонтальных компонент на уровне 5 мГал при реализации специальных методов обработки результатов, полученных при неоднократном прохождении района съемки.

Разработчики аэрогравиметров работают над уменьшением массогабаритных характеристик БА с целью их использования на более широком классе ЛА, в частности на БПЛА. Привлечение БПЛА дает возможность повысить точность и разрешающую способность аэрогравиметрической съемки благодаря следующим особенностям:

- малая скорость и низкая высота полета, создающие предпосылки для повышения пространственного разрешения измерений;
- ZУРТ-коррекции, позволяющие компенсировать погрешности инерциальных датчиков БА и повысить точность измерений.

Эти особенности повышают конкурентоспособность аэрогравиметрической съемки с БПЛА по сравнению с наземной гравиметрической съемкой в силу ее большей производительности.

Работа [95] посвящена вопросам применения БА на борту БПЛА. На основе спектрального анализа погрешностей ИИМ и ГНСС исследовано влияние скорости и динамики полета на точность определения составляющих вектора ВСТ. При этом рассматривались два класса ИИМ – навигационный и тактический. В исследовании показано, что для ИИМ навигационного класса низкая скорость БПЛА может представлять собой преимущество при восстановлении коротких длин волн (<5 км) вектора ВСТ. Это особенно существенно при определении АСТ из-за меньшего влияния погрешностей ориентации. Для ИИМ тактического класса точности низкая скорость БПЛА является недостатком, поскольку ограничивает восстановление коротких и средних волн (<30 км) аномального ГПЗ. В части динамики полета проанализировано влияние фугоидного движения. Отмечено, что низкая скорость БПЛА приводит к короткому по сравнению с самолетами тяжелой авиации фугоидному периоду, который составляет около 13 с. Это позволяет определить компоненты вектора ВСТ с разрешением менее 1 км. Заметим, что в [96] разработана основанная на спектральном анализе методика сопоставления различных алгоритмов определения компонент вектора ВСТ, позволяющая, среди прочего, выявлять влияние динамики полета на точность их оценивания.

В статье [65] приводится информация о создании БА на базе БИНС навигационного класса iNAV-RQH фирмы iMAR и приемной аппаратуры ГНСС фирмы Novatel, установленных на беспилотный вертолет (рис. 9), характеристики которого представлены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Характеристики беспилотного вертолета

Параметр	Значение
Вес БПЛА	9 кг
Максимальный взлетный вес	30 кг
Вес батарей	5–10 кг
Полезная нагрузка	15 кг
Максимальный рабочий диапазон	40 км
Максимальная крейсерская скорость	85 км/ч
Максимальная автономность	1 ч

Предварительные результаты испытаний такого БА показали, что точность определения составляющих вектора ВСТ в точках пересечения галсов оказывается равной приблизительно 4 мГал для вертикальной составляющей и 6-11 мГал для горизонтальных составляющих с пространственным разрешением 0,5 км. При использовании режима ZUPT-коррекции также оценивалась повторяемость результатов измерений, которая составила 2-3 мГал для вертикальной составляющей вектора ВСТ [65].



Рис. 9. БА на беспилотном вертолете [65]

В работе [97] приведены результаты обработки данных БА, полученных компанией АО НПП «Аэрогеофизика» [104] в ходе экспериментов на БПЛА БАС-200. Приводятся результаты измерений при четырехкратном прохождении галса (рис. 10). Как отмечают авторы, СКП определения АСТ составила $\pm 0,50$ мГал.

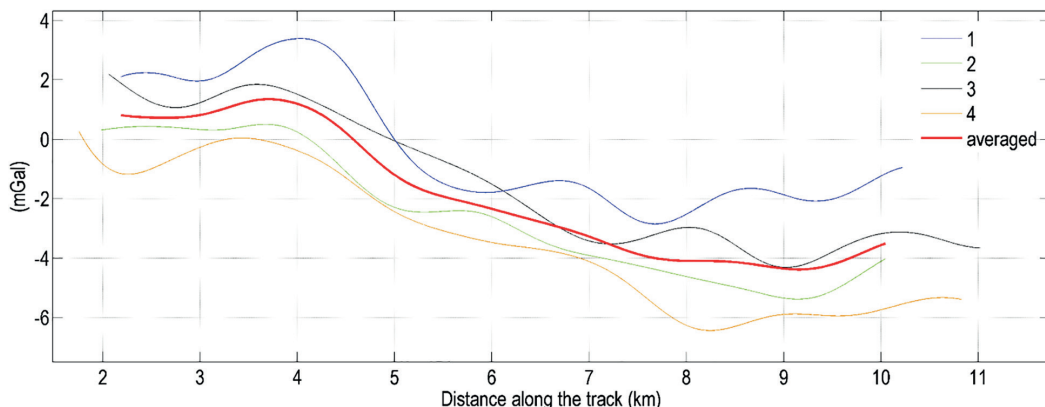


Рис. 10. Результаты определения АСТ на повторном галсе с использованием БПЛА БАС-200 [97]

Еще к одной тенденции развития БА можно отнести их комплексирование с традиционными гиросtabilизированными гравиметрами [98]. С одной стороны, такой подход лишает бесплатформенные комплексы их главного преимущества, с другой – появляется возможность осуществления съемки с повышенным разрешением и высокой точностью в сложных турбулентных условиях полета, в том числе и при огибании рельефа местности. Этот режим необходим при выполнении комплексных аэрогеофизических работ: магниторазведки, гамма-спектрометрии, электроразведки.

Первые попытки такого комплексирования были предприняты Датской национальной службой геодезии и кадастра и Университетом Калгари. В июне 1998 года было проведено совместное испытание трех гравиметрических систем – бесплатформенной системы ИНС/GPS Laseref III, гиросtabilизированного гравиметра LCR S-типа и ортогональной триады акселерометров QA 3000 Q-Flex. В работе [74] представлены результаты и анализ этих испытаний, сопоставлены методы измерения и модели погрешностей аэрогравиметрических систем. Показано, что комплексирование данных БА и гиросtabilизированного гравиметра обеспечило высокий динамический диапазон и повышенное пространственное разрешение съемки [34, 73, 98].

В настоящее время фирма iMAR ведет исследования в этом направлении. Аэрогравиметры семейства iCORUS разработаны в облегченном варианте для использования на БПЛА с учетом возможности совместной работы с блоком iDGU-100x, повышающим точность измерений [94].

В октябре–ноябре 2020 года компания АО «ГНПП «Аэрогеофизика» (Россия) выполнила аэрогравиметрическую съемку на самолете Cessna 208B, задействовав два гравиметра: гиростабилизированный GT-3 (ООО НТП «Гравтехнология», Россия) и бесплатформенный производства фирмы iMAR, характеристики которого приведены в табл. 11 [99].

Т а б л и ц а 11

Характеристики БА фирмы iMAR

Параметр	Значение
Погрешность измерения АСТ, мГал	<1,5
Скорость ухода гироскопов, °/ч	<0,001
Смещение нуля акселерометров, мкг	<12
Динамический диапазон гироскопов, °/с	±395
Динамический диапазон акселерометров, g	±20
Энергопотребление, Вт	<150
Вес, кг	14

Аэрогравиметрическая съемка включала 48 галсов общей протяженностью 12700 км и была выполнена в течение 12 рабочих вылетов. Средняя скорость полета составляла 70 м/с, а высота относительно эллипсоида WGS84 – 680 м. В результате обработки данных съемки отмечено, что в целом АСТ, полученные двумя гравиметрами, схожи, и главные отличия относятся к самым высокочастотным составляющим АСТ. СКП определения АСТ составила около 0,9 мГал для двух типов гравиметров.

Продолжением работ в АО «ГНПП «Аэрогеофизика» стало применение БА для съемки в режиме огибания рельефа местности. В 2021 году в таком режиме были выполнены работы, дополненные аэрогравиметрической съемкой [97]. Скорость полетов изменялась в пределах 150-180 км/ч, продолжительность была до 6 ч. Общий перепад высоты полета на галсах съемки, продиктованный высотой рельефа местности, составлял порядка 900 м, а диапазон зарегистрированных БА ускорений – 2300 Гал со среднеквадратическим отклонением по галсам съемки ±153 Гал. Оцененная по внутренней сходимости СКП определения АСТ составила ±0,52 мГал [100]. В целом результаты исследований показали, что включение в состав аэрогеофизического комплекса БА, способного выполнять высокоточные измерения в условиях полета с огибанием рельефа местности, существенно повышает достоверность интерпретации данных и геологическую эффективность аэрогеофизических работ без значительного увеличения затрат на выполнение съемки [99, 100].

Заключение

1. Разработка комплексов технических средств, способных обеспечить решение задач аэрогравиметрии на новом техническом и экономическом уровне с привлече-

нием современных достижений в области бесплатформенных и спутниковых навигационных систем, средств электроники, информатики и вычислительной техники актуальна и перспективна.

2. Бесплатформенная инерциальная гравиметрическая система и БИНС, интегрированная с ГНСС, по составу аппаратуры практически идентичны. Отличия заключаются лишь в требованиях к точности инерциальных чувствительных элементов, знанию ГПЗ и к составу и точности приемной спутниковой аппаратуры. Эти системы, несомненно, отличаются по набору выходных данных, который определяется их различным назначением. Вместе с тем представляется целесообразным создание такой системы, которая будет способна в зависимости от условий использования выполнять функции обеих систем. И такая тенденция, на взгляд авторов, прослеживается.

3. Отсутствие систем стабилизации в бесплатформенных гравиметрах позволяет уменьшить стоимость, энергопотребление, массу и габариты гравиметров, что открывает возможности для применения БА на более широком классе летательных аппаратов, в частности на БПЛА. Использование БПЛА обеспечивает гибкую систему гравиметрической съемки повышенной точности и детальности, а также позволяет выполнять измерения в режиме огибания рельефа местности, необходимого при выполнении комплексных аэрогеофизических работ.

4. Векторные гравиметры имеют важные преимущества перед скалярными, поскольку создают предпосылки непосредственно по их показаниям определять отклонения отвесной линии, высоты геоида, вторые производные геопотенциала, благодаря которым, в свою очередь, можно выявить резкие изменения в структуре гравитационного поля.

5. Смещение нуля акселерометров является доминирующим источником погрешностей определения компонент вектора ВСТ. Разрабатываются различные стратегии для решения этой проблемы: маневры самолета, устранение линейных смещений с использованием повторных или внешних измерений. Важнейшей задачей уменьшения смещения нуля является создание точных средств термоконтроля и термостабилизации. При построении термостабилизации необходимы поиски компромисса для достижения высокой точности стабилизации при минимальном росте габаритов и энергопотребления гравиметра.

6. Погрешность гироскопических датчиков дополнительно ограничивает точность определения горизонтальных компонент вектора ВСТ. Погрешность ориентации в 1" эквивалентна погрешности определения горизонтальных компонент и составляет 5 мГал. Оценки точности определения горизонтальных составляющих вектора ВСТ, которые в значительной степени зависят от точности решения задачи ориентации, сильно разнятся, а наиболее оптимистичные оценки составляют 5-10 мГал. При этом отмечается, что достижение таких точностей возможно лишь при реализации специальных методов обработки результатов, полученных при неоднократном прохождении района съемки.

7. Отдельную проблему составляет получение эталонных значений АСТ вдоль траектории полета в ходе испытаний БА, в связи с чем необходимо тщательно подходить к выбору места (аномальность и изученность гравитационного поля) и времени их проведения (сведение к минимуму турбулентности и влияния атмосферы на сигналы ГНСС).

8. Многие страны, включая США, Канаду, Германию, Китай, Данию, Португалию, Россию, вкладывают значительные средства в развитие аэрогравиметрии, в частности в развитие БА. В настоящее время главенствующее положение на рын-

ке БА занимает немецкая фирма iMAR, имеющая в своем активе серию не только ИИМ, на основе которых могут быть созданы БА, но и БА iCORUS, отвечающих современным требованиям к измерителям силы тяжести с ЛА.

9. Серия БА iCORUS обеспечивает точность определения АСТ лучше 1,5 мГал при использовании гироскопических датчиков со скоростью ухода не хуже $0,003^\circ/\text{ч}$, случайным шумом не более $0,002^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ и акселерометрических датчиков со смещением нуля меньше 25 мкг и случайным шумом менее $8 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$. В сочетании с блоком iDGU-100x может быть обеспечена погрешность определения АСТ менее 1 мГал. Существует версия гравиметра iCORUS с небольшим весом и размерами для применения на борту БПЛА.

Авторы выражают признательность рецензентам А.А. Головану и Ю.А. Литмановичу за ценные замечания, позволившие существенным образом улучшить содержание статьи.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда №18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шимбирев Б.П. Теория фигуры Земли. М.: Недра, 1975. С. 432.
2. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. М.: Недра, 1978. 325 с.
3. Делинжер П. Морская гравиметрия / пер. с англ. М.: Недра, 1982. 312 с.
4. Пантелеев В.Л. Основы морской гравиметрии. М.: Недра, 1983. 256 с.
5. Торге В. Гравиметрия / пер. с англ. М.: Мир, 1999. 429 с.
6. Seiber, G. Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications, Berlin, New York, De Gruyter, 2003, 610 p., <https://doi.org/10.1515/9783110200089>.
7. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. Физическая геодезия / пер. с англ. Ю.М. Неймана, Л.С. Сугаиповой; под редакцией Ю.М. Неймана. М.: Изд-во МИИГАиК, 2007. 426 с.
8. Бровар Б.В. и др. Геодезия и гравиметрия / под ред. Б.В. Бровара. М.: Научный мир, 2010. 572 с.
9. Becker, D., *Advanced Calibration Methods for Strapdown Airborne Gravimetry*, Technische Universität Darmstadt, Ph.D. Thesis, 2016.
10. *Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли* / под общ. ред. Пешехонова В.Г.; науч. ред. Степанов О.А. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
11. Jensen, T.E., *Airborne Strapdown Gravity Measurements for Geodesy and Geophysics*, Technical University of Denmark, 2018.
12. Молев В.П. Методика и техника наземной гравиметрической съемки: для студентов направления подготовки 05.03.01 «Геология» очной формы обучения: учебно-методическое пособие. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2019. 32 с.
13. Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н., Железняк Л.К. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли в Мировом океане: оценки точности и перспективы практического применения // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 166–169.
14. *Гравиразведка и магниторазведка. Термины и определения.* ГОСТ 24284-80.
15. Болотин Ю.В., Голован А.А. О методах инерциальной гравиметрии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Математика, механика. 2013. № 5. С. 59–67.
16. Schwarz, K.P., Inertial surveying and geodesy, *Re. Geoph.*, 1983, 21(4), 878–890.
17. Wei, M., Schwarz, K.P., Flight Test Results From a Strapdown Airborne Gravity System, *J. Geod.*, 1998, 72, 323–332.
18. Пантелеев В.Л. Проблемы инерциальной гравиметрии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1997. №26. С. 113–122.

19. **Пантелеев В.Л., Левицкая З.Н.** Основные задачи инерциальной векторной гравиметрии. Известия высших учебных заведений // Геодезия и аэрофотосъемка. 2000. №1. С. 77–91.
20. **Пантелеев В.Л.** Фильтрация в задачах инерциальной гравиметрии. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 52 с.
21. **Kwon, J.H., Airborne Vector Gravimetry Using GPS/INS.** Report No.453, Geodetic Science and Surveying Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210-1275, April 2000.
22. **Тювин А.В., Афонин А.А., Сулаков А.С.** Особенности использования функционально-избыточных блоков акселерометров в бесплатформенных навигационно-гравиметрических комплексах // Труды МАИ. 2016. №91.
23. **Schwarz, K.P., Geoid profiles from an integration of GPS satellite and inertial data,** Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, Anno XLVI, 1987, no.2, 117–131.
24. **Jekeli, C., Kwon, J.H., Results of Airborne Vector (3-D) gravimetry,** *Geoph. Res. Lett.*, 1999, 26(23): 3533–3536.
25. **Jekeli, C., Kwon, J., Geoid Profile Determination by Direct Integration of GPS/INS vector gravimetry,** *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B10), DOI: 10.1029/2001JB00626.
26. **Vasco D.W., Resolution and variance operators of gravity and gravity gradiometry,** *Geophysics*, 1989, 54(7), 889–899.
27. **Pawlowski, R., Gravity gradiometry in resource exploration,** *The Leading Edge*, 1998, vol. 17, no.1, 51–52.
28. **Jekeli, C., A Review of Gravity Gradiometer Survey System Data Analysis,** *Geophysics*, 1993, vol. 58, no.4, 508–514.
29. **Zlotnikov, D., Superior Detective Work: The Promise of Airborne Gravity Gradiometry,** Earth Explorer, Energy Report, June 2011, pp. 5–7.
30. **Евстифеев М. И.** Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2016. Т.24. №3 (94). С. 96–114. DOI 10.17285/0869-7035.2016/24.3.096-114.
31. **Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.** Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов (обзор) // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. №3. С. 235–246.
32. **Jekeli, C., Theoretical Fundamentals of Airborne Gradiometry,** Airborne Gravity for Geodesy Summer School, 23–27 May 2016.
33. **Veryaskin, A.V., Gravity, Magnetic and Electromagnetic Gradiometry Strategic technologies in the 21st century,** IOP Publishing Ltd, 2021. (Second Edition).
34. **Hein, G.W., Progress in Airborne Gravimetry: Solved, Open and Critical Problems.** In: Proc. of the IAGG Symposium on Airborne Gravity Field Determination, *IUGG XXI General Assembly Boulder, Colorado, USA, July 2–14 1995*, pp. 3–11.
35. **Kwon, J.H., Jekeli, C., A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS,** *J. Geod.*, 2001, 74: 690–700, doi: 10.1007/s001900000130.
36. **Hannah, J., Airborne Gravimetry: a Status Report.** Prepared for the Surveyor, General Land Information, Otago University, New Zealand, 2001.
37. **Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А.** Уравнения аэрогравиметрии // Алгоритмы и результаты испытаний. М.: Изд-во МГУ, 2002. 120 с.
38. **Harlan, R.B., Eotvos corrections for airborne gravimetry,** *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73 (14), 4675–4679, doi:10.1029/JB073i014p04675.
39. **Groves, P., Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems,** Second Edition, Artech House. Boston, London, 2013, 800 p.
40. **Селиванова Л.М., Шевцова Е.В.** Инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. Ч. 1: Одноканальные инерциальные навигационные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 46 с.
41. **Johann, F., Becker, D., Becker, M., Forsberg, R., Kadir, M., The direct method in strapdown airborne gravimetry: A Review,** *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2019, 144(5), <https://doi.org/10.12902/zfv-0263-2019>.
42. **Андреев В.Д.** Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
43. **Britting, K.R., Inertial navigation systems analysis,** Wiley & Sons, New York, 1971.
44. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2016. 394 с.
45. **Ишлинский А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 670 с.

46. Johann, F., Becker, D., Becker, M., Ince, E.S., Multi-Scenario Evaluation of the Direct Method in Strapdown Airborne and Shipborne Gravimetry, *International Association of Geodesy Symposia*, 2020, Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/1345_2020_127.
47. Jekeli, C., Garcia, R., GPS Phase Accelerations for Moving-Base Vector Gravimetry, *Journal of Geodesy*, 1997, 71: 630–639, doi: 10.1007/s001900050130.
48. Ayres-Sampaio, D., Deurloo, R., Bos, M. et al., A Comparison Between Three IMUs for Strapdown Airborne Gravimetry, *Surv. Geophys.*, 2015, 36, 571–586, <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9323-5>.
49. Bruton, A.M., Schwarz, K.P., Airborne Gravity Estimation using Adaptive Filters, *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS97)*, Banff, Canada, June 3–6 1997, pp. 605–612.
50. Jekeli, C., *Inertial Navigation Systems With Geodetic Applications*, De Gruyter, Berlin, New York, 2001, doi:10.1515/9783110800234.
51. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ «Электронприбор», 2009. 496 с.
52. Stepanov, O.A., Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems, In: Nebylov, A., Watson, J., Eds., *Aerospace Navigation Systems*, 2016, Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., pp. 244–298.
53. Степанов О.А., Кошаев Д.А., Моторин А.В. Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации // Гироскопия и навигация. 2015. № 3 (90). С. 95–101. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.095-101.
54. Кошаев Д.А., Моторин А.В., Степанов О.А. Анализ эффективности использования спутниковых измерений при определении аномалий силы тяжести на море // Сборник материалов XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2019. С. 282–287.
55. Jensen, T.E., Forsberg, R., Helicopter Test of a Strapdown Airborne Gravimetry System, *Sensors*, 2018, 18, 3121, doi:10.3390/s18093121.
56. Lloyd, G. Thompson, D., Airborne Gravity Meter Test, *Journal of Geophysical Research*, 1959, 64.4, pp. 488–488, doi: 10.1029/JZ064i004p00488.
57. Lloyd, G., Thompson, D., and Lucien, J., LaCoste, B., Aerial gravity measurements, *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65.1, pp. 305–322, doi: 10.1029/JZ065i001p00305.
58. Brozena, J.M., Mader, G.L., Peters, M.F., Interferometric Global Positioning System: Three-dimensional positioning source for airborne gravimetry, *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(B9), 12153–12162, doi:10.1029/JB094iB09p12153.
59. Schwarz, K.R., Cannon, M.E., Wong, R.V.C., A comparison of GPS Kinematic Models for the Determination of Position and Velocity Along a Trajectory, *Man. Geod.*, 1989, 14, pp. 345–353.
60. Kleusberg, A., Peyton, D., and Wells, D., Airborne gravimetry and the Global Positioning System, *IEEE Symposium on Position Location and Navigation. A Decade of Excellence in the Navigation Sciences*, Las Vegas, NV, USA, 1990, pp. 273–278, doi: 10.1109/PLANS.1990.66188.
61. Forsberg, R., Vassiliou, A., Schwarz, K., Wong, R., Inertial gravimetry – comparison of Kalman filtering-smoothing and post-mission adjustment techniques, *Bulletin geodesique*, 1986, 60 (2), 129–142. <https://doi.org/10.1007/BF02521013>.
62. Дмитриев С.П. Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 1997. 208 с.
63. Лобусов Е.С., Фомичёв А.В. Исследование режима ZUPT-коррекции для бесплатформенной инерциальной навигационной системы наземного подвижного объекта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. №6. С. 15–24.
64. Glennie, C. and Schwarz, K.P., Airborne Gravity by Strapdown INS/DGPS in a 100 km by 100 km Area of the Rocky Mountains, *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS97)*, Banff, Canada, June 3–6 1997, pp. 619–624.
65. Lin, C.A., Chiang, K., Dongkai Dai, W., Kuo, C.Y., Integration of INS and GNSS for gravimetric application with UAS, *ISPRS TC I Midterm Symposium “Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications”*, 10–12 October 2018, Karlsruhe, Germany.
66. Honeywell [Электронный ресурс] URL: <https://www.honeywell.com/us/en> (Дата обращения 09.01.2023).
67. Northrop Grumman [Электронный ресурс] URL: <https://www.northropgrumman.com> (Дата обращения 15.12.2022).
68. SAFRAN [Электронный ресурс] URL: <https://www.safran-group.com> (Дата обращения 15.12.2022).

69. iXblue [Электронный ресурс] URL: <https://www.ixsea.com> (Дата обращения 10.10.2022).
70. iMAR [Электронный ресурс] URL: <https://www.imar-navigation.de> (Дата обращения 08.09.2022).
71. ООО НПТ «Гравтехнология» [Электронный ресурс] URL: <https://www.ooo-npt-gravtekhнология> (Дата обращения 02.09.2022).
72. Bruton, A., *Improving the Accuracy and Resolution of SINS/DGPS airborne gravimetry*, Ph.D. thesis, The University of Calgary, 2002.
73. Glennie, C.L., Schwarz, K.P., Bruton, A.M., Forsberg, R., Olesen, A.V., Keller, K., A Comparison of Stable Platform and Strapdown Airborne Gravity, *J. Geod.*, 2000, 74:383–389, <https://doi.org/10.1007/s001900000082>.
74. Glennie, C.L., An analysis of airborne gravity by strapdown INS/DGPS, Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, UCGE Report No. 20125, 1999.
75. Bruton, A., Hammada, Y., Ferguson, S., Schwarz, K., Wei, M., Halpenny, J., A Comparison of Inertial Platform, damped 2-axis platform and Strapdown Airborne Gravimeter, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, 2001, pp. 542–550.
76. Tomé, P., Integration of Inertial and Satellite Navigation Systems for Aircraft Attitude Determination, Ph.D. thesis, Faculty of Sciences of the University of Porto, 2002.
77. Bastos, L., Tomé, P., Cunha, T., Fernandes, M.J., Cunha, S., Gravity Anomalies from Airborne Measurements — Experiments Using a Low Cost IMU Device, In: Sideris, M.G. (Eds) *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000. International Association of Geodesy Symposia*, 2001, vol. 123, Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-662-04827-6_42
78. Kreye, Ch., Hein, G.W., Zimmermann B. Evaluation of Airborne Vector Gravimetry Using GNSS and SDINS Observations, *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2006, pp. 447–461, https://doi.org/10.1007/3-540-29522-4_29.
79. Boedecker, G., Stürze, A., SAGS4 – Strapdown Airborne Gravimetry System Analysis, In Flury, J., Rummel, R., Reigber, C., Rothacher, M., Boedecker, G., Schreiber, U. (Eds) *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2006, pp. 463–478, https://doi.org/10.1007/3-540-29522-4_30.
80. Cai, S., Wu, M., Zhang, K. et al. The first airborne scalar gravimetry system based on SINS/DGPS in China. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56, 2198–2208, <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4726-y>.
81. Huang, Y., Olesen, A.V., Wu, M., Zhang, K., SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter, *Sensors*, 2012, 12 (7), 9336–9348, doi:10.3390/s120709336.
82. Zhao, L., Forsberg, R., Wu, M., Olesen, A.V., Zhang, K., Cao, J., A Flight test of the strapdown airborne gravimeter SGA-WZ in Greenland, *Sensors*, 2015, 15, 13258–13269; DOI:10.3390/s150613258.
83. Cai, S., Zhang, K., Wu, M., Huang Y. Long-term stability of the SGA-WZ strapdown airborne gravimeter, *Sensors*, 2012, 12, 11091–11099, doi:10.3390/s120811091.
84. Cao, J., Wang, M., Cai, S., Zhang, K., Cong, D., Wu, M., Optimized design of the SGA-WZ strapdown airborne gravimeter temperature control system, *Sensors*, 2015, 15, 29984–29996, doi:10.3390/s151229781.
85. Бержицкий В.Н., Ермаков М.А., Ильин В.М., Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А., Гавров Е.В., Рекунов Д.А., Федоров А.Е., Габелл А., Олсон Д., Шабанов А.В. Бескарданный авиационный гравиметр GT-X // Тр. Межд. симп. «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на подвижных и неподвижных основаниях». СПб., 2010.
86. Hoss, M., Dreyer, A., von Hinueber, E.L., Urli, R., Lapeyrade F. Innovative Inertial Measurement Data Acquisition and Processing for Aircraft Surveying up to Airborne Gravimetry, *The European Test and Telemetry Conference – ETTC*, 2020, doi: 10.5162/ettc2020/1.3.
87. Becker, D., Becker, M., Olesen, A.V., Nielsen, J.E., Forsberg, R., () Latest results in strapdown airborne gravimetry using an iMAR RQH unit, *4th IAG symposium on Terrestrial Gravimetry*, 2016, 19–25.
88. Раменский приборостроительный завод [Электронный ресурс] URL: <https://rpz.kret.tech> (Дата обращения 09.01.2023).
89. Simav, M., Becker, D., Yildiz, H., Hoss, M., Impact of temperature stabilization on the strapdown airborne gravimetry: a case study in Central Turkey, *Journal of Geodesy*, 2020, 94, 41, <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01369-5>.
90. Glennie, C.L., Schwarz, K.P., A Comparison and Analysis of Airborne Gravimetry Results from two Strapdown Inertial/DGPS Systems. In: *Journal of Geodesy*, 1999, vol. 73, no. 6, pp. 311–321, doi: 10.1007/s001900050248.
91. Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih H.C. Data Reduction in Scalar Airborne Gravimetry: Theory, software and case study in Taiwan, *Computers & geosciences*, 2006, 32 (10), 1573–1584, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.015>.

92. **Deurloo, R.**, Development of a Kalman Filter Integrating System and Measurement Models for a Low-cost Strapdown Airborne Gravimetry System, Ph.D. thesis, Faculty of Sciences of the University of Porto, 2011.
93. **Jensen, T.E., Olesen, A.V., Forsberg, R., Olsson, P.-A., Josefsson, Ö.**, New Results from Strapdown Airborne Gravimetry Using Temperature Stabilization, *Remote Sens.*, 2019, 11, 2682, <https://doi.org/10.3390/rs11222682>.
94. **iCORUS** [Электронный ресурс] URL: <https://imar-navigation.de/downloads/iCORUS.pdf>. (Дата обращения 28.07.2022).
95. **Deurloo, R., Bastos, L., Bos, M.**, On the use of UAVs for Strapdown Airborne Gravimetry, In: Kenyon S, Pacino MC, Marti U (Eds) *Geodesy for planet Earth, International Association of Geodesy Symposia*, 2012, vol. 136, Springer, Berlin, pp. 255–261, doi:10.1007/978-3-642-20338-1_31.
96. **Bolotin, Yu.V., Vyazmin, V.S.**, Spectral Analysis of the Airborne Vector Gravimetry Problem, *Journal of Mathematical Sciences*, 2021, vol. 253, no. 6, pp. 778–795, doi: 10.1007/s10958-021-05269-7.
97. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В., Бровкин Г.И., Контарович О.Р.** Технологии и результаты обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра в площадных съемках с облетом рельефа на разных носителях // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 157–160.
98. **Jensen, T.E., Nielsen, J.E., Olesen, A.V., Forsberg, R.**, Strapdown Airborne Gravimetry Using a Combination of Commercial Software and Stable-Platform Gravity Estimates, In: Vergos, G., Pail, R., Barzaghi, R. (Eds) *International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016. International Association of Geodesy Symposia*, 2017, vol. 148, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/1345_2017_9.
99. **Бровкин Г.И., Контарович О.Р., Голован А.А., Вязьмин В.С.** Результаты первой в России аэрогравиметрической съемки с бесплатформенным гравиметром // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки: «ГеоЕвразия-2021. Георазведка в современных реалиях». Том II. ООО «ГеоЕвразия». Тверь: Издательство ООО «ПолиПРЕСС», 2021.
100. **Бабаянц П.С., Бровкин Г.И., Контарович О.Р., Вязьмин В.С., Голован А.А.** Методические особенности современных аэрогравиметрических съемок // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 154–156.
101. **Лаборатория управления и навигации МГУ** [Электронный ресурс] URL: <http://NavLab.ru> (Дата обращения 09.01.2023).
102. **Senobari, M.S.**, New results in airborne vector gravimetry using strapdown INS/DGPS, *J. Geod.*, 2010, 84, 277–291, doi:10.1007/s00190-010-0366-6.
103. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В.** Новые алгоритмы бескарданной аэрогравиметрии: проверка на экспериментальных данных // XXVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2021. С. 59–66.
104. **АО «ГНПП «Аэрогеофизика»** [Электронный ресурс] URL: <https://www.aerogeo.ru> (Дата обращения 18.12.2022)

Peshkhonov, V.G., Stepanov, O.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia; ITMO University, St. Petersburg, Russia), **Rozentsvein, V.G.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC), **Krasnov, A.A., and Sokolov, A.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University)
State-of-the-Art Strapdown Airborne Gravimeters: Analysis of the Development, *Гироскопия и Навигация*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 3–35.

Abstract. The paper analyzes the development of strapdown inertial airborne gravimeters, which have significant advantages over gyrostabilized gravimeters in terms of size, power consumption and cost and substantially expand the capabilities of gravimetric survey.

Technical solutions are described that make implementation of strapdown airborne gravimeters possible. The trends in their development are discussed, including integration of data from strapdown and gyrostabilized gravimeters.

Key words: Earth's gravitational field, gravity disturbance vector, gravity anomaly, strapdown airborne gravimeter, vector airborne gravimeter, scalar airborne gravimeter, inertial measurement unit, global navigation satellite systems.

Материал поступил 25.11.2022