

УДК 681.5.08

Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов. (Обзор)

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 09.10.2016

Принята к печати 16.11.2016

На основании анализа открытых литературных источников рассматриваются основные этапы создания гравитационных градиентометров для измерений неоднородности гравитационных полей с различных подвижных носителей, в том числе в условиях невесомости. Анализируется роль этих приборов в современной науке и технике. Описываются основные физические принципы, позволившие создать приборы, которые реально используются в настоящее время. Также описываются основные параметры этих приборов, характеризующие их качество.

Цель данного исследования состояла в том, чтобы установить основные проблемы, которые приходится решать при создании этих приборов и которые препятствуют их широкому внедрению в различные области науки и техники, сформулировать основные тенденции и состояние их разработки в настоящее время. Показывается, что существующие приборы являются слишком дорогими, тяжелыми и массивными, чтобы иметь возможность их широко применять как в условиях действия силы тяжести, так и в условиях невесомости. Описывается стремление разработчиков создавать более простые, надежные и малобюджетные приборы, в первую очередь предназначенные для использования на микроспутниках, созданию которых уделяется все большее внимание. Делается вывод, что разработки гравитационных градиентометров на основе технологий микромеханических электронных систем в настоящее время не могут преодолеть проблемы, связанные с уровнем шума, свойственные подобным приборам.

Данное исследование в некоторой степени является обоснованием для следующей работы авторов, в которой будут изложены новые принципы построения гравитационных градиентометров, которые, возможно, позволят решить некоторые из проблем, описанных ниже.

Ключевые слова: гравитационный градиентометр, физические принципы, гибридный градиентометр, внутренние шумы, микроспутники.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@mail.ru

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@mail.ru

Для цитирования:

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.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

For citation:

Gilavdary I., Riznookaya N.
[Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 235–246(in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)

Gilavdary I., Riznookaya N.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 09.10.2016

Accepted for publication 16.11.2016

Abstract

The main steps of creating the gravity gradiometers for the measurement of inhomogeneously of gravitational fields on different mobile carriers, including in conditions of space, are considered on the basis of the analysis of the open literature. The role of these devices in modern science and technology is described. There are the basic physical principles which allowed to create devices that are actually used at the moment. The basic parameters of these devices characterizing their quality are also described.

The aim of this study is to establish the basic problems that have to be solved to create these instruments, as well as obstacles to their widespread adoption in the various areas of science and technology and to formulate the basic tendencies and state of development at the moment. It is shown that the existing devices are too expensive, heavy and massive to be used widely on the Earth and in space. Here is described the desire of developers to create more simple, reliable and low-budget devices, which primarily intended for using in micro satellites is described here. It is concluded that the development of gravity gradiometer based on micro-mechanical and electromechanical technologies currently can not overcome the problems associated with noises inherent such instruments.

This study in some ways is the rationale for the following work of authors, which sets out the principles of the new gravity gradiometer, which may help to solve some of the problems are described here.

Keywords: gravity gradiometers, physical principles, hybrid gradiometers, internal noises, microsatellites.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@mail.ru

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@mail.ru

Для цитирования:

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.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

For citation:

Gilavdary I., Riznookaya N.
[Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 235–246 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Принцип действия и области применения гравитационных градиентометров для подвижных объектов

Гравитационный градиентометр (ГГ) для подвижных объектов – уникальный прибор, разработка которого активно началась с конца 1950-х гг. и продолжается по настоящее время. Начало этой работы положило NASA, которое поставило задачу создания методов и устройств изучения гравитационного поля Земли на низкоорбитальных спутниках, а также гравитационных полей других небесных тел (см. [1–4], [5 и имеющиеся там литературные ссылки]). Подобные устройства незаменимы при исследованиях внутреннего строения Луны и планет, где измерения силы тяжести с борта орбитальных аппаратов в принципе невозможны.

В дальнейшем ГГ стали разрабатывать для измерений непосредственно на поверхности Земли с борта различных носителей, где действие силы тяжести оказывается определяющим при выборе конструкции прибора. В этом случае ГГ используют для измерений небольших локальных изменений гравитации, вызванных изменениями плотности или глубины залегающих масс. Полученная информация может быть использована для исследований природных ресурсов, геотермальных полей, обнаружения водоносных горизонтов, подземных туннелей и пустот, а также в системах инерциальной навигации подводных лодок [6, 7], кораблей, самолетов [8–15, 63–65, 67].

Существующие ГГ содержат подвижную массу (ПМ), удерживаемую внутри прибора в упругом подвесе. Принцип действия этих приборов состоит в измерении вращения ПМ относительно корпуса под действием моментов сил гравитации или ее смещения под действием сил гравитации.

Неоднородность гравитационного поля описывают компонентами тензора гравитационного потенциала (ТГП). Всего существуют 9 компонент ТГП. Если вектор гравитации представлен своими компонентами g_x, g_y, g_z , то компоненты ТГП будут представлены компонентами $\Gamma_{xx}, \Gamma_{yy}, \Gamma_{zz}, \Gamma_{xy}, \Gamma_{xz}, \Gamma_{yz}$, где, например, $\Gamma_{xy} = \partial g_x / \partial y$, и три последние компоненты симметричны по своим индексам [16]. В свободном пространстве сумма $\Gamma_{xy} + \Gamma_{yx} + \Gamma_{zz} = 0$, поэтому пять из этих девяти компонент независимы между собой. Γ_{zz} считают наиболее полезной компонентой и называют вертикальным градиентом [17], Γ_{xz} и Γ_{yz} считают

горизонтальными градиентами, Γ_{xy} и $(\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy})/2$ рассматривают как параметры кривизны эквипотенциальной поверхности [10]. Эти компоненты определяют размеры, форму, ориентацию, а также плотность и глубину залегания геологических структур [16–19]. В частности, компонента Γ_{zz} определяет изопахиты (*isopach* – линия одинаковой мощности пласта) и позволяет найти плотность породы; остальные компоненты определяют контуры залегания пласта [18].

Первый ГГ изобрел венгр Р. Этвеш в 1896 г. [10, 20–22]. В простейшем виде ГГ Этвеша, называемый вариометром, представлял собой коромысло в форме гантели, подвешенное в горизонтальном положении на вертикальной тонкой упругой нити (торсионе) длиной около 30 см и диаметром 0,02 мм. Модели вариометра представлены на рисунках 1 и 2.

Проекция на ось торсиона момента силы M_z , обусловленной неоднородностью гравитационного поля и действующей на ПМ, определяется формулой:

$$M_z = (I_y - I_x) \left[\frac{1}{2} (\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx}) \sin 2(\varphi - \varphi_0) + \Gamma_{xy} \cos 2(\varphi - \varphi_0) \right], \quad (1)$$

где φ_0 – начальный угол ориентации ПМ в плоскости вращения; φ – угол поворота ПМ под действием M_z ; I_x и I_y – главные моменты инерции ПМ.

В случае тонкой плоской пластины имеем:

$$\frac{I_x - I_y}{I_z} = 1 - 2 \frac{h^2}{l^2 + h^2} \approx 1 - 2 \left(\frac{h}{l} \right)^2. \quad (2)$$

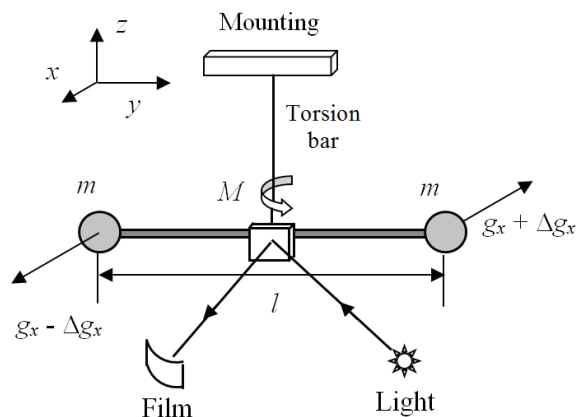


Рисунок 1 – Модель вариометра Этвеша с подвижной массой в форме гантели

Figure 1 – Model of the Eötvös's variometer with a proof mass in the form of a dumbbell

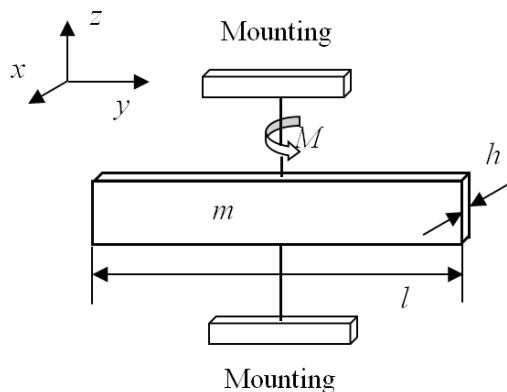


Рисунок 2 – Модель вариометра Этвеша с подвижной массой в форме пластины

Figure 2 – Model of the Eötvös's variometer with a proof mass in the form of a plate

Если ввести параметр $G = (I_x - I_y)/I_z$ который можно назвать «гантельность», при $h \ll l$ из формулы (2) имеем $G \approx 1$. Отсюда получают соотношение, характерное для ГГ, а именно:

$$I_x - I_y = GI_z \approx I_z. \quad (3)$$

Из формулы (1) видно, что, измерив разность углов $\varphi - \varphi_0$ при нескольких значениях угла φ_0 , можно найти разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} . При непрерывном вращении корпуса вариометра с угловой скоростью ω , когда $\varphi = \omega t$, из формул (1) и (3) получим:

$$M_z(t) \approx I_z \left[\frac{1}{2} (\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx}) \sin 2\omega t + \Gamma_{xy} \cos 2\omega t \right]. \quad (4)$$

В этом случае разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} можно измерить, разделив соответствующие фазы сигнала $M_z(t)$.

В качестве единицы значения компоненты ТГП используют величину «Этвеш»: $1 E_0 = 10^{-9} \text{ с}^{-2}$. Погрешность ГГ Этвеша составляет, примерно, $1 E_0$. При этом каждое измерение требует не менее 20 мин вследствие длительного успокоения крутильных колебаний гантели [20, 22–24], и измерения должны проводиться в комфортных условиях при практически полном отсутствии вибраций основания [6]. Этот прибор обладает уникальной чувствительностью, и его модификации до сих пор используют в различных тонких физических экспериментах [10, 21, 24–26]. Однако он не может работать на подвижном основании.

Единица неоднородности гравитационного поля $1 E_0$ чрезвычайно мала. При неоднородно-

сти гравитационного поля, равной $1 E_0$, величина g изменяется на одну миллионную часть на расстоянии 10 км. Силы или моменты сил, связанные с неоднородностью гравитационного поля, очень малы. Поэтому ГГ должны иметь высокую чувствительность. Среди гравиинерциальных приборов, разработанных для измерений в условиях действия силы тяжести, наибольшей чувствительностью обладают приборы, имеющие торсионные подвесы. Это касается и угловых, и линейных акселерометров с упругими подвесами.

Основные проблемы создания гравитационных градиентометров на подвижном основании и принципы их решения

Основной проблемой, которую приходится решать при разработке ГГ, является разделение сил инерции и сил гравитации. ГГ могут быть построены по схеме разнесенных линейных акселерометров или по схеме углового акселерометра [27]. В схемах ГГ с линейными акселерометрами частично эту проблему удастся решить путем вращения корпуса прибора ($1/4$ Гц), что позволяет разделить силы гравитации и инерции по частоте [1, 2, 5, 8, 10, 27]. В этом случае влияние поступательных ускорений, перпендикулярных оси вращения, устраняют за счет суммирования сигналов идентичных акселерометров, установленных диаметрально противоположно на вращающемся диске. Для устранения влияния угловых ускорений диска устанавливают вторую пару таких же акселерометров, так что обе пары образуют крест, и вычитают друг из друга сигналы обеих пар [1]. Кроме того, вращение корпуса ГГ позволяет перенести частоту полезного сигнала в ту область, где тепловые шумы становятся меньше полезного сигнала. История ротационных ГГ начинается примерно с 1963 г. [8, 1 и имеющиеся там ссылки на литературу].

Второй проблемой, возникающей при создании ГГ, является разработка системы съема информации о перемещениях ПМ под действием полезного сигнала. В ГГ, работающих при комнатных температурах, обычно используют емкостные датчики с внешним возбуждением, обеспечивающие высокую чувствительность при минимальных размерах и энергопотреблении [6, 28]. Здесь выходным сигналом является электрическое напряжение. Как было показано

выше, ГГ с одной осью вращения измеряет разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} . Для непосредственного измерения всех компонент ТГП прибор должен содержать три одноосных блока, оси вращения которых взаимно перпендикулярны. В корпорации *Lockheed Martin* разработаны действующие ротационные ГГ: трехосный прибор *FTG* (или *Air-FTG*, если он предназначен для измерений на самолете) и одноосный прибор *AGG* (который также предназначен для измерений на самолете). Работа трехосного прибора *FTG* иллюстрируется на рисунке 3 [8, 61, 62]. Здесь на вращающихся дисках показаны по две пары линейных акселерометров. Выходные сигналы в каждом из диаметрально противоположных акселерометров складывают, и затем эти суммарные сигналы вычитают. Например, для диска с осью вращения вокруг вертикальной оси z в обозначениях рисунка имеем:

$$a_1 + a_2 - (a_3 + a_4) = -D(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})\sin(2\Omega t) + 2D \Gamma_{xy} \cos(2\Omega t). \quad (5)$$

Для диска с осью вращения вокруг горизонтальной оси x имеем:

$$a_1 + a_2 - (a_3 + a_4) = -D(\Gamma_{yy} - \Gamma_{zz})\sin(2\Omega t) - 2D \Gamma_{yz} \cos(2\Omega t). \quad (6)$$

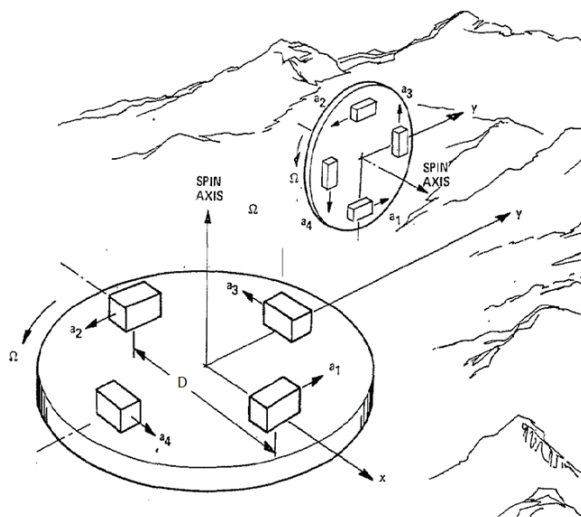


Рисунок 3 – Расстановка линейных акселерометров на вращающемся диске в приборе *FTG* [8, 61, 62]

Figure 3 – Positioning of the linear accelerometers on the rotating disc in *FTG* instrument [8, 61, 62]

На рисунке 4 показана сборка всех трех дисков в карданном подвесе прибора *Air-FTG* [29].



Рисунок 4 – Сборка всех трех дисков в карданном подвесе прибора *Air-FTG* [29, 61]

Figure 4 – Assembling of all three discs of *Air-FTG* in gimbals [29, 61]

На рисунке 5 показан прибор *Air-FTG* в сборке [78].

В целом эти приборы являются дорогими и сложными. Один экземпляр *FTG* стоил \$ 5 млн, на его изготовление уходило от одного до полутора лет [7]. Весь проект разработки прибора *FTG* «поглотил» более \$ 400 млн [29, 30]. В приборе *FTG* диаметр вращающегося диска равен 15 см, в приборе *AGG* этот диаметр вдвое больше [10], и на этом диске установлены четыре дополнительных акселерометра, что позволило повысить чувствительность прибора.

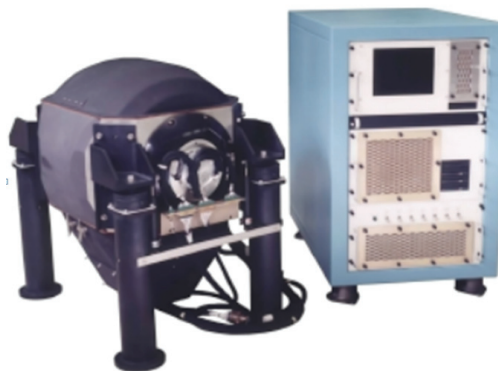


Рисунок 5 – Прибор *Air-GTG* на амортизаторах и с блоком электроники [78]

Figure 5 – *Air-GTG* device is on the shock absorbers and his electronic unit [78]

FTG непосредственно измеряет все компоненты ТГП, в том числе и компоненту Γ_{zz} . Для *AGG* значение Γ_{zz} оценивают теоретически методом эквивалентных источников [17]. В этом случае считают, что погрешность в оценке компоненты Γ_{zz} примерно вдвое превосходит погрешности измеряемых горизонтальных компонент

[17]. При коммерческом использовании в качестве подвижного носителя ГГ обычно используют самолет, летящий со скоростью 55–65 м/с на высоте 80 м [10, 17, 31]. Также проводились испытания *AGG* на вертолете при скорости 30 м/с на высоте 25–60 м и на аэростате при скорости 16 м/с и высоте 80 м [10].

Шумы и пространственное разрешение действующих гравитационных градиентометров

Важнейшими характеристиками мобильных ГГ являются среднеквадратичное значение шума N_{RMS} , пространственная длина волны $\lambda_c/2$ [10, 17]. Чем меньше значение λ_c тем более тонкие геологические структуры могут быть обнаружены [32]. Достижение малых значений этих величин, помимо инструментальных решений, в значительной степени обеспечивается апостериорной обработкой сигналов ГГ, их частотной и пространственной фильтрацией. Первая величина определяется АЧХ прибора и интервалом частот, в котором проводится измерение. Вторая величина определяется по имеющимся наземным гравитационным данным, подвергнутых гармоническому анализу [32]. Значение λ_c можно оценить следующим образом: при скорости 55 м/с и частоте среза НЧ фильтра 0,18 Гц (это типичное значение, используемое при обработке результатов), имеем $\lambda_c = 55/0,18 \approx 300$ м, тогда стандартное разрешение ГГ $\lambda_c/2 \approx 150$ м [17]. Величины N_{RMS} и λ_c не являются независимыми, но связаны между собой соотношением $N_{RMS} \sqrt{\lambda_c} = C$ [17]. Здесь константу C выражают в единицах [Ео·км^{1/2}] и называют плотностью амплитудного шума [17]. Это интегральный показатель, который позволяет сравнивать качество ГГ. Из приведенного равенства видно,

что попытка улучшить пространственное разрешение прибора за счет уменьшения λ_c неизбежно приведет к увеличению шумовой составляющей.

В литературе отмечается, что алгоритмы обработки сигналов мобильных ГГ постоянно совершенствуются, благодаря чему заявляемая погрешность мобильных ГГ из года в год уменьшается [10, 17, 33]. Поэтому приводимые в литературе данные о погрешностях приборов трудно сравнивать, как для каждого прибора в отдельности, так и при сравнении приборов между собой. В [10] и [17] для *AGG* приведено среднеквадратичное значение шума при измерении вертикальной компоненты при $\lambda_c = 300$ м, равное 7,6 и 4,6 Ео, соответственно. В свою очередь, в [32] и [34] приведено, что в *FTG* «пороговое значение» этой же компоненты для объектов с размерами до 300 м находилось в интервале от 2 Ео до 3 Ео или от 3 до 4 Ео, соответственно. В [35] приведен подробный анализ шумов *AGG* и *FTG*, где «сравнение выполнялось целиком на публикациях действующих операторов».

Дополнительно к сказанному о ротационных ГГ отметим, что в [36] сообщалось, что корпорации *Lockheed Martin* и *Neos* совместно разработали новую модификацию ГГ – прибор «*FTG* плюс», «чувствительность которого в 20 раз и пропускная способность в 10 раз превосходят существующий ГГ». Сведения о конструкции этого ГГ приведены не были. Возможно, этот прибор не является ротационным.

Европейским космическим агентством (*ESA*) в рамках программы *GOCE* для глобальных исследований гравитационного поля Земли в условиях невесомости разработан уникальный по чувствительности и точности электростатический ГГ (ЭГГ) [37, 73]. На рисунке 6 показана внутренняя компоновка спутника *GOCE* [77].

На рисунках 7 и 8 показаны соответственно ЭГГ и несущий его спутник.

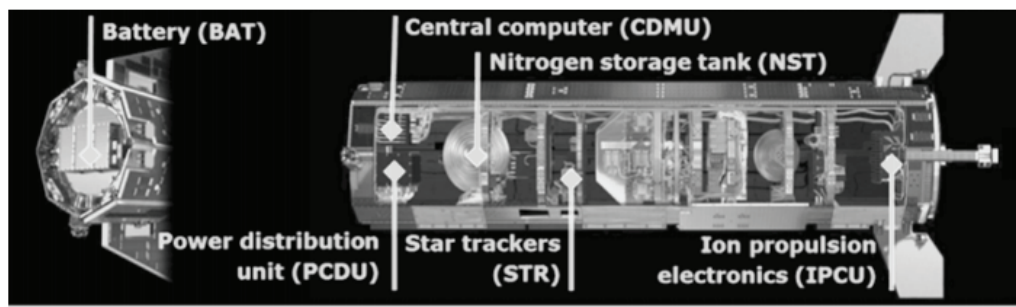


Рисунок 6 – Внутренность спутника *GOCE*, несущего ЭГГ (ЭГГ находится в центре) [77]

Figure 6 – The interior of the *GOCE* spacecraft, carrying the Electrostatic Gravity Gradiometer (EGG) (EGG is in the center) [77]

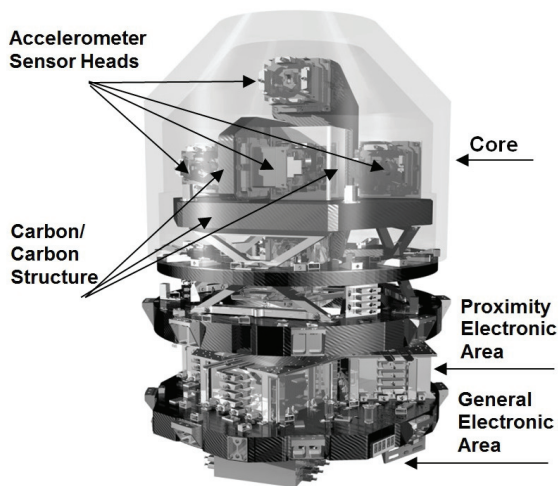


Рисунок 7 – Электростатический ГГ [43, 73]

Figure 7 – Electrostatic Gravity Gradiometer (EGG) [43, 73].

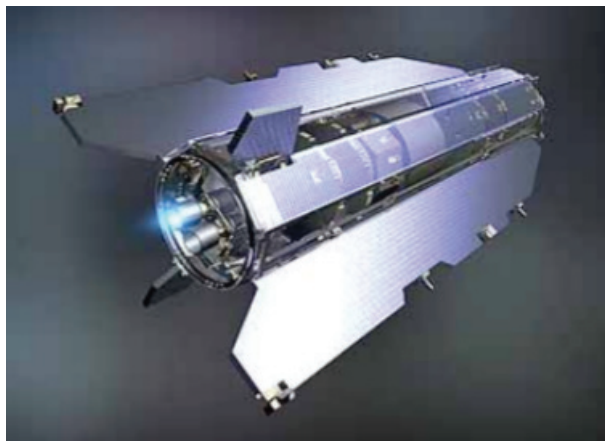


Рисунок 8 – Спутник, несущий ЭГГ [38]

Figure 8 – Spacecraft carrying the EGG [38]

Цель программы *GOCE* заключалась в том, чтобы при дискретности около 100 км достигнуть погрешности измерений аномалий гравитации 1 мГал и формы земного геоида 2 см. ЭГГ был вмонтирован в космический аппарат, запущенный на низкую (около 260 км) околоземную орбиту 17 марта 2009 г. Он успешно проработал до 10 ноября 2013 г. Длина аппарата составляла около 5,3 м, диаметр – около 1 м. Вес всей конструкции был около 1100 кг [38, 39].

ЭГГ содержит три пары неподвижных линейных акселерометров, разработанных фирмой *ONERA* [37], расположенных попарно по осям ортогональной системы координат. В акселерометрах каждая ПМ находилась в состоянии невесомости и удерживалась вблизи заданного положения электростатическим полем с помощью цепей следящих обратных связей. Перемещения

ПМ под действием внешних сил измерялись емкостными датчиками. Работа этого ГГ требовала контроля движения всего аппарата системой *GSM* и системами слежения с Земли. Равномерное движение и отсутствие вращения аппарата обеспечивалось с помощью корректирующих ионных двигателей [39, 40]. Время измерения полезного сигнала была около 10 с, что с учетом скорости спутника обеспечивало дискретность измерений 80–100 км [38, 39, 41].

В ЭГГ емкостные датчики смещения ПМ были построены на основе резонансных емкостных мостовых схем, питающихся от внешних генераторов на частоте 100 кГц [42, 43, 68, 69]. При ожидаемой чувствительности $2 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ акселерометры показали рекордную для настоящего времени чувствительность порядка $(3,1-6,7) \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ в интервале частот от 0,004 до 0,1 Гц. В этом интервале частот шумы ЭГГ не превышали 24 мЕо/Гц^{1/2} [37, 44]. Отметим, что вся миссия *GOCE* стоила около € 350 млн [39, 45].

Вследствие неидеальности подшипников и различного рода небалансов, принудительная ротация корпуса ГГ увеличивает шумы на входе ротационных ГГ и уменьшает их чувствительность [46, 70]. Продольные и поперечные вибрации основания также приводят к возбуждению сигналов, не отличимых от полезного сигнала (псевдоградиентов) [10, 47]. Поэтому в самых последних разработках ГГ ротацию корпуса стараются исключить. В условиях действия силы тяжести это удастся сделать в схемах ГГ с угловыми акселерометрами. Здесь ПМ имеет форму, близкую к форме сбалансированной гантели. В таких ГГ влияние поступательных ускорений сводится к минимуму. Тепловые шумы здесь подавляют путем помещения угловых акселерометров в сосуд с жидким гелием (с температурой около 4 К). Такая «холодная» технология позволила увеличить чувствительность и пространственное разрешение ГГ. Однако использование жидкого гелия создает свои дополнительные проблемы и не позволяет уменьшить вес и размеры прибора [10]. «Холодные» ГГ разработали канадская фирма *GEDEX*, Университет Западной Австралии (*UWA*) и университет Мериленд при поддержке рудодобывающей корпорации *Rio Tinto Exploration* и алмазодобывающей корпорации *De Beers*. В этом приборе датчики смещения (поворота ПМ) построены по технологии СКВИД. «Холодные» ГГ могут работать на подвижных основаниях только при

условии их изоляции от вибраций основания с помощью уникальных стабилизированных платформ [26]. Характерное отличие «холодных» ГГ от «теплых» ГГ заключается в том, что в первом случае измерение смещения ПМ связывается с измерением тока, в то время как во втором – с измерением напряжения [26].

Цель разработок «холодных» ГГ состояла в достижении погрешности 1 Ео при времени измерения 1 с , что в условиях полета на самолете позволяло проводить измерения через каждые 60 м [48]. В проекте *GEDEX* градиентометр получил название *HD-AGG (High Definition AGG)*. В проекте *UWA* – название *VK1* [31, 49]. Разработка и испытания этого прибора до 2002 г. описаны в [67]. Проектные шумы этих ГГ составляли $1 \text{ Ео/Гц}^{1/2}$ в интервале частот от $0,001$ до 1 Гц [9, 16]. Считается, что с такими ГГ можно «охотиться» за узкими кимберлитовыми трубками, которыми богата Канада и которые содержат алмазы высокого качества [46]. В *GEDEX* также считают, что их ГГ позволяют заглянуть внутрь Земли на глубину до $12\text{--}15 \text{ км}$ [46, 48]. Разработка проекта *HD-AGG* стоила *GEDEX* более $\$ 88 \text{ млн}$ [48].

На рисунке 9 показан макет прибора *HD-AGG*, вмонтированный в кабину самолета вместе с изолирующей платформой [9]. На рисунке 10 показан макет прибора *VK1*, также вмонтированный в кабину самолета вместе с изолирующей платформой [49].

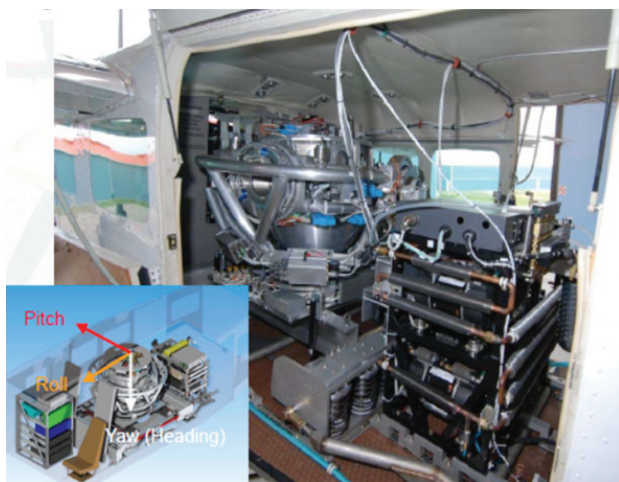


Рисунок 9 – Макет прибора *HD-AGG*, установленный в самолете. В левом нижнем углу показан этот прибор вместе с изолирующей платформой [9]

Figure 9 – The *HD-AGG* model is installed in the aircraft. The device is shown with an insulating platform in the left corner lower [9]



Рисунок 10 – Сосуд Дьюара с жидким гелием и прибором *VK1* установлен на стабилизированной платформе, которая вмонтирована в кабину самолета *Cessna 208* [49]

Figure 10 – The Dewar vessel with liquid helium and with *VK1* device is mounted on a stabilized platform, which is built into the cockpit of the *Cessna 208* [49]

«Теплые» ГГ, построенные на основе линейных акселерометров, и «холодные» ГГ, построенные на основе угловых акселерометров, обладают одним общим недостатком: все они тяжелые и громоздкие. Кроме того, ГГ с линейными акселерометрами имеют специфический недостаток: они содержат от шести (*GOCE*) до двенадцати (*FTG*) акселерометров, у которых масштабные коэффициенты и их нелинейности должны подгоняться под значения этих параметров одного из акселерометров. Положение акселерометров и направление их осей чувствительности также должны контролироваться. В частности, в ГГ *GOCE* в каждом из акселерометров должны контролироваться 12 параметров. Работа всей электростатической системы обеспечивается 36 цепями обратных связей [42], шумы которых воздействуют на ПМ акселерометров и ограничивают чувствительность ЭГГ [43].

Проблемы создания малогабаритных и дешевых гравитационных градиентометров

В настоящее время в связи с появлением микро- и наноспутников возникла потребность в разработке ГГ, малогабаритных, более простых и более дешевых, предназначенных для исследования гравитационных полей планет и астероидов [50, 71, 75, 76]. В той же *GEDEX* разрабатывают-

ся не криогенные ГГ, способные работать в космосе [51, 52].

Разработка малогабаритных и недорогих ГГ, в первую очередь, связывалась с появлением технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) [50, 72]. На рисунке 11 показаны два из возможных вариантов конструкции такого монолитного ГГ с зазорами переменной толщины, позволяющими их использовать в качестве дифференциального конденсатора [27].

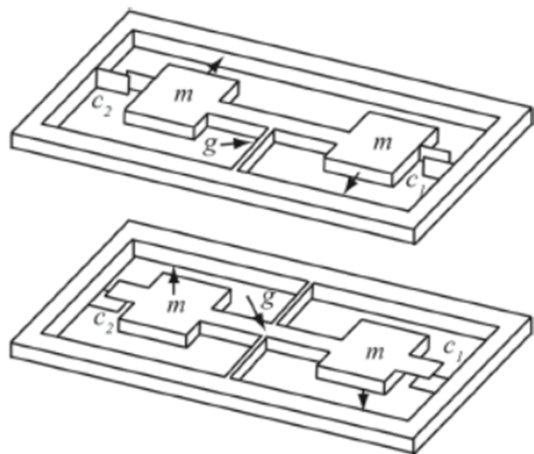


Рисунок 11 – Два из возможных вариантов конструкции монолитного МЭМ ГГ [79]

Figure 11 – Two possible construction options of a monolithic MEMS GG [79]

Однако на этом пути возникла своя проблема. Известно, что по мере уменьшения размеров прибора имеет место возрастание дрейфа нуля [53]. Также именно в микро-ГГ отношение шум/сигнал растет, если масса и размеры ПМ уменьшаются [54–56]. В частности, известно, что при уменьшении размеров токопроводящих элементов растет и $1/f$ – шум [74]. Кроме того, более тесная компоновка элементов в микроприборах должна приводить к увеличению взаимного влияния его элементов. В частности, должна возрасти роль паразитных емкостей. Действительно, в этих приборах должны использоваться емкостные датчики смещения ПМ. Однако в известных схемах эти датчики действуют совместно с радиочастотными генераторами, обеспечивающими их работу. При наличии паразитных емкостей сигналы этих датчиков проникают в выходные цепи и усиливают шумы приборов, ограничивая их чувствительность [57, 58].

Также эти переменные сигналы могут выпрямляться в нелинейных электрических элементах выходных цепей, после чего их уже

нельзя будет отличить от полезных сигналов. По-видимому, по этим причинам в печати отсутствует информация о натуральных испытаниях микроградиентометров, построенных на основе интегральных технологий.

В настоящее время сложилось мнение, что преодолеть шумовой порог можно в ГГ, у которых ПМ имеет по возможности большие размеры. Поэтому разработчики обратили внимание на гибридные конструкции, в которых отдельная ПМ крепится к кремниевой основе с интегрированной системой съема информации [59]. В этом случае ПМ может иметь массу от 100 до 200 грамм. В целом для измерений в околоземном пространстве такой «гибрид» должен иметь массу 1 кг, объем 1 дм³ и чувствительность 0.001 Ео/Гц^{1/2}. В таких ГГ рабочая частота может быть ниже 0.04 Гц, и резонансная частота может быть 1 Гц, чтобы обеспечить время измерения 1 с [50, 60]. Считается, что для целей «планетологии» достаточно иметь ГГ с чувствительностью 1 Ео/Гц^{1/2} [66].

Заключение

Существующие реально действующие гравитационные градиентометры очень сложны и дороги. Это уникальные приборы, впитавшие в себя практически все достижения конструкторской мысли и технологий. В частности, в приборе *FTG* линейные акселерометры должны работать в диапазоне нагрузок до 6 порядков в условиях, когда отношение шум/сигнал может достигать 11 порядков. Операторы, работающие с этими приборами, считают, что все они – и «теплые», и «холодные» – слишком тяжелые и объемные.

Потребность создания компактных, дешевых и надежных гравитационных градиентометров с указанными выше параметрами обсуждается достаточно давно. Однако сведения об удачных попытках реализации таких гравитационных градиентометров в известной авторам литературе отсутствуют. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время имеется некий «застой» в разработке подобных приборов. Разработчики микроэлектромеханических гравитационных градиентометров затрачивают много усилий в стремлении разработать подвесы подвижной массы, удовлетворяющие противоречивым требованиям: подвес должен быть максимально тонким, чтобы обеспечить высокую чувствительность прибора, и он же должен быть до-

статочны прочным и надежным, чтобы работать в условиях действия силы тяжести или чтобы выдержать испытания на Земле, если речь идет о гравитационных градиентометрах, работающих в невесомости. По-видимому, это противоречие до сих пор решить не удалось, и здесь требуются нетрадиционные решения. Кроме того, здесь требуются решения, позволяющие достигнуть приемлемого отношения шум/сигнал.

Некоторые из таких возможных таких решений будут предложены в следующей статье авторов.

References

1. Forward, R.L. Review of artificial satellite gravity gradiometer techniques for geodesy. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics*, 1974, vol. 1, pp. 157–192.

2. Forward R.L., Lemmen R.M., Lowe R.W., Peterson R.W., Tonai I., Williams W.E. Rotating gravity gradiometer study. *Hughes research laboratories*. Malibu, 1976, p. 174.

3. Paik H.J., Leung J.S., Morgan S.H., Parker J. Global gravity survey by an orbiting gravity gradiometer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1988, vol. 69, no. 48, pp. 1601–1611.

4. Forward R.L., Bell C.C., Lahue P.M., Mallove E.F., Rouse D.W. Development of a rotating gravity gradiometer for earth orbit applications (AAFE). Available at: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730023608.pdf> (accessed 19.12.2015).

5. Forward R., Bell C., Morris J. Rotating gravitational sensors. Available at: http://www.gravityresearchfoundation.org/pdf/awarded/1965/forward_bell_morris.pdf (accessed: 19.12.2015).

6. Bell R.E. Gravity Gradiometry. *Scientific American*, 1998, pp. 74–79.

7. Beachy D. Bell Geospace Inc. takes a high-tech look at mining, oil and gas sites. *Houston Business Journal. News. Measuring up*, Jan 2, 2005.

8. Metzger E.H. Development Experience of a Moving Base Gravity Gradiometer and Discussion of Future Applications. *Proceedings of 14th Annual Gravity Gradiometry Conference*, Colorado Springs, 1986, 392 p.

9. Carroll K.A. Detectability of Natural Resource Structures by a Low-Noise Airborne Gravity Gradiometer System. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2009, vol. 1, pp. 8.

10. Dransfield M. Airborne gravity gradiometry in the search for mineral deposits. *Proceedings of exploration*, 2007, vol. 7, pp. 341–354.

11. Araya A., Kanazawa T., Shinohara M., Yamada T., Fujimoto H., Iizasa K., Ishihara T. A gravity gradiometer to search for submarine ore deposits. *Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011*

Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC), 2011, pp. 1–3.

12. Gravity Gradiometry. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/gravity-gradiometry.html> (accessed: 19.12.2015).

13. Welker T.C., Pachter M., Huffman R.E. Gravity gradiometer integrated inertial navigation. *Control Conference*, 2013, pp. 846–851.

14. Using Gravity to Detect Underground Threats. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/mst/features/2010/100714-using-gravity-to-detect-underground-threats-.html> (accessed: 19.12.2015).

15. Lockheed martin gravity systems. Cutting-Edge Resource and Exploration Technologies. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/LM-Gravity-Systems-brochure.pdf> (accessed: 19.12.2015).

16. Anecchione M., Moody M., Carroll K., Dickson D., Main B. Benefits of a high performance airborne gravity gradiometer for resource exploration. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 2007, pp. 889–893.

17. Christensen A.N., Dransfield M.H., Van Galder C. Noise and repeatability of airborne gravity gradiometry. *First break*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 55–63.

18. Murphy C.A. Exploring prospects with FTG Gravity. *9-th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. Hyderabad*, 2012, p. 141.

19. Mataragio J. Exploring for Gold and Geothermal Systems in the Great Basin Using Full Tensor Gravity Gradiometry. *GRC Transactions*, 2012, vol. 36, pp. 1009–1012.

20. Süß F. The small original Eötvös – torsion balance. Budapest, 1928, 13 p.

21. Miller A.H. The Theory and Operation of the Eötvös Torsion Balance with Plates I, II, III. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1934, vol. 28, pp. 1–31.

22. Bell R.E., Hansen R.O. The rise and fall of early oil field technology: The torsion balance gradiometer. *The Leading Edge*, 1998, vol. 17, no. 1, pp. 81–83.

23. Fischbach E. Geophysical Tests for Intermediate-Range Forces. Purdue univ lafayette in, 1993.

24. Adelberger E.G., Gundlach J.H., Heckel B.R., Hoedl S., Schlamminger S. Torsion balance experiments: A low-energy frontier of particle physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2009, vol. 62, no. 1, pp. 102–134.

25. Tomarken S. Gravitational Torsion Balance. Available at: <http://www.hep.vanderbilt.edu/~johnswe/classes/225a/cavmain.pdf> (accessed 19.10.2016).

doi: org/10.1063/1.4944709

26. Steiner G. Gravitational torsion balance. Houston, 1925, 17 p.

27. Liu H., Pike W.T., Dou G. A seesaw-lever force-balancing suspension design for space and terrestrial gravity-gradient sensing. *Journal of Applied Physics*, vol.

119, no 12, p. 124508. doi: org/10.1063/1.4944709

28. Van Essen M.C. Capacitive MEMS-based sensors: Thermo-mechanical stability and charge trapping. Enschede, University of Twente, 2009, 229 p.

29. Rogers M. An Investigation into the Feasibility of using a Modern Gravity Gradient Instrument for Passive Aircraft Navigation and Terrain Avoidance. Air Force Institute of Technology, Ohio, 2009, 165 p.

30. Streland A. Going deep: a system concept for detecting deeply buried facilities from space. Air War College, 2003, 64 p.

31. Grujic M. Data processing requirements for an 1 Eo/ $\sqrt{\text{Hz}}$ AGG system. *22nd International Geophysical Conference and Exhibition*. Brisbane, 2012, pp. 1–4.

32. Murphy C.A., Brewster J., Robinson J. Evaluating Air-FTG survey data: bringing value to the full picture. *Preview*, 2007, vol. 126, pp. 24–28.

33. Dransfield M. Advances in airborne gravity gradiometry at Fugro Airborne Surveys. *EGM 2010 International Workshop Adding new value to Electromagnetic, Gravity and Magnetic Methods for Exploration*. Capri, 2010, 5 p.

34. Murphy C.A. Exploring prospects with FTG. *9 Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics*, Hederabat, 2012, p. 141.

35. Dransfield M.H., Christensen A.N. Performance of airborne gravity gradiometers. *The Leading Edge*, 2013, vol. 32, no. 8, pp. 908–922.

doi: org/10.1190/tle32080908.1

36. NEOS and Lockheed Martin to Develop ‘New Generation’ Sensor. *NEOS press release*, July 6, 2016. Available at: http://www.neosgeo.com/wp-content/uploads/2016/08/NEOS_Release_FTG-Plus-Sensor_160706.pdf (accessed 19.10.2016).

37. Christophe B., Marque J-P., Foulon B. Accelerometers for the ESA GOCE mission: one year of in-orbit results. *GPHYS SYMPOSIUM*. Paris, 2010, 26 p.

38. Drinkwater M.R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., Floberghagen R., Kern M., Fehringer M. The GOCE gravity mission: ESA’s first core Earth explorer. *Proceedings of the 3rd international GOCE user workshop*. Noordwijk, 2006, pp. 6–8.

39. GOCE. Fact and figures. *European space agency*. Available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Facts_and_figures (accessed 19.10.2016).

40. Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer. *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_Field_and_Steady-State_Ocean_Circulation_Explorer (accessed 19.10.2016).

41. Douch K., Foulon B., Christophe B., Panet I. A new planar electrostatic gravity gradiometer for airborne surveys. *Journal of Geodesy*, 2013, vol. 89, no 12, pp. 1216–1219.

42. Marque J.P., Christophe B., Liorzou F., Bodovillé G., Foulon B., Guérard J., Lebat V. The ultra sensitive accelerometers of the ESA GOCE mission. *The*

59th International Astronautical Congress, Glasgow, 2008. Available at: <http://onera-windtunnel.com/dmph/goce/IAC-08-B1.3.7.pdf> (accessed 19.07.2016).

43. Silvestrin P. Control and navigation aspects of the new Earth observation missions of the European Space. *Annual Reviews in Control*, 2005, vol. 29, no. 2, pp. 247–260. doi: org/10.1016/j.arcontrol.2005.05.004

44. Christophe B., Marque J-P., Foulon B. Accelerometers for the ESA GOCE mission: one year of in-orbit results. Available at: https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=14168&name=DLFE-678.pdf (accessed 19.07.2016).

45. Schiermeier Q. Gravity mission to launch. *Nature*, 2009, vol. 458. Available at: <http://www.nature.com/news/2009/090311/full/458133a.html> (accessed 19.10.2016). doi: org/10.1038/458133a

46. Buckler G. Eye in the sky spots diamonds in the rough. *The Globe and Mail*, Mar. 13, 2009. Available at: <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/eye-in-the-sky-spots-diamonds-in-the-rough/article17993239> (accessed 19.10.2016).

47. Wermuth M.K. Gravity Field Analysis from the Satellite Missions CHAMP and GOCE. Technische Universität München, 2008, 100 p.

48. Drennan R. Ready to market. *Mississauga News*, Jan 30, 2015. Available at: <http://www.mississauga.com/news-story/5295543-ready-to-market> (accessed 19.10.2016).

49. Anstie J. Preparation for flight testing the VK1 gravity gradiometer. *Airborne Gravity 2010*, 2010, pp. 5–12.

50. Flokstra J. Gravity Gradient Sensor Technology for future planetary missions. Enschede, University of Twente, 2005, 12 p.

51. Carroll K. Gravity gradiometry for lunar surface exploration. *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, 2011. Available at: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1108.pdf> (accessed 19.10.2016).

52. Spencer H. Lunette: Lunar Farside Gravity Mapping by Nanosat. *19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2005. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1635&context=smallsat> (accessed 19.10.2016).

53. Allen J. Micro-System Inertial Sensing Technology Overview. Albuquerque, New Mexico, 2009, 32 p.

54. Tutorial: Noise in micromechanical systems. MEMS material. Available at: <http://www.kaajakari.net/~ville/research/tutorials/tutorials.shtml> (accessed 19.10.2016).

55. Li J., Fang J., Du M., Dong H. Analysis and fabrication of a novel MEMS pendulum angular accelerometer with electrostatic actuator feedback. *Microsystem technologies*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 9–16. doi: org/10.1007/s00542-012-1630-x

56. Yazdi N., Ayazi F., Najafi K. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1640–1659.

57. Cuperus R. MEMS based gravity gradiometer for Space Application. Available at: <https://escies.org/download/webDocumentFile?id=7188> (accessed 19.10.2016).
58. De Simone A. Design and realization of a setup for mechanical tests on a MEMS based micro gravity-gradiometer. Delft, Delft University of Technology, 2008, 89 p.
59. Selig A. Development of a Micro-gradiometer for Planetary Gravity Field Mapping. Available at: http://jupiter-europa.cesr.fr/static_pages/presentations/Berlin/SRON_gravity.pdf (accessed 19.10.2016).
60. Ghose K. MEMS Inertial Sensor to Measure the Gravity Gradient Torque in Orbit. *Pour l'obtention du grade de docteur ès sciences école polytechnique fédérale de Lausanne*, 2012, no. 5231. Available at: http://infoscience.epfl.ch/record/169608/files/EPFL_TH5231.pdf (accessed 19.10.2016).
61. Murphy C.A. The Air-FTG airborne gravity gradiometer system. *ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop*, 2004, pp. 7–14.
62. Metzger E.H., Jirdtano A., Affleck C. Satellite borne gravity gradiometer study. Buffalo, NASA Goddard space flight center, 1976, 62 p.
63. Gerber M.A. Gravity gradiometry-something new in inertial navigation. *Astronautics Aeronautics*, 1978, vol. 16, pp. 18–26.
64. Richeson J.A. Gravity gradiometer aided inertial navigation within non-GNSS environments. ProQuest, 2008, 438 p.
65. Jekeli C. Precision free-inertial navigation with gravity compensation by an onboard gradiometer. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 704–713. doi: org/10.2514/1.15368
66. Flokstra J., Cuperus R., Wiegerink R.J., van Essen M.C. MEMS based gravity gradiometer for future planetary missions. *Cryogenics*, 2009, vol. 49, issue 11, pp. 665–668. doi: org/10.1016/j.cryogenics.2008.12.019
67. Matthews R. Mobile Gravity Gradiometry. Western, University of Western, 2002, 429 p.
68. Touboul P., Willemenot E., Foulon B., Josselin V. Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: synergy and evolution. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 321–327.
69. Lenoira B., Lévy A., Foulon B., Lamineb B., Christophea B., Reynaudb S. Electrostatic accelerometer with bias rejection for gravitation and Solar System physics. *Advances in Space Research*, 2011, vol. 48, pp. 1248–1257. doi: org/10.1016/j.asr.2011.06.005
70. Berman D. Effects of Mechanical Imperfections on Performance of a Rotating Gravity Gradiometer. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1968, vol. 5, no. 10, pp. 1193–1198.
71. Stibrany P., Carroll K.A. The microsat way in Canada. *Proc. 11th CASI Conference on Astronautics*, 2001, 10 p.
72. Gravity gradient earth sensor experiment on rexus 11. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/187717/files/ghose%20ESA%20Thun%202013.pdf> (accessed 12.11.2016).
73. Allasio A., Muzi D., Vinai B., Cesare S., Catastini G., Bard M., Marque J.P. GOCE: space technology for the reference Earth gravity field determination. *Proceedings of the European Conference for AeroSpace Sciences*, 2009, 13 p.
74. Vasilescu G. Electronic noise and interfering signals: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2006, 709 p.
75. Carroll K.A. Near-Term Lunar Surface Gravimetry Science Opportunities. *Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group*, Maryland, 2015, 31 p.
76. Carroll K.A., Spencer H., Zee R.E. An Asteroid Lander/Rover for Asteroid Surface Gravity Surveying. *30-th Annual AIAA/USU Conference on small satellites*, 2016. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3408&context=smallsat> (accessed 12.11.2016).
77. Steiger C., Romanazzo M., Emanuelli P. P., Floberghagen R., Fehringer M. The Deorbiting of ESA's Gravity Mission GOCE–Spacecraft Operations in Extreme Drag Conditions. *Proceedings SpaceOps, Pasadena, USA*, 2014, 12 p.
78. McBarnet, A. Gravity gradiometry has graduated! OE Digital. Saturday, 01 June 2013, <http://www.oedigital.com/geoscience/item/3201-gravity-gradiometry-has-graduated> (accessed 12.11.2016).