## УДК 629.7.05 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГРАВИГРАДИЕНТОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ТОРСИОННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ А.И. Сорока<sup>1</sup>, В.Ф. Фатеев<sup>1</sup>, В.В. Попадьёв<sup>2</sup>

1 – ФГУП "ВНИИФТРИ" (E-mail: fateev@vniiftri.ru) 2 - ФГБУ "ЦГКиИПД" (E-mail: azyas@mail.ru)

В работе представлены основные направления разработок и путей дальнейшего развития гравитационно-градиентных измерительных систем (ГГИС), построенных на основе торсионных механических колебательных систем. Рассмотрены оригинальные схемы построения ротационной ГГИС на базе приоритетных исследований научной школы академика РАН А.А.Красовского кафедры 37 ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского[1], с использованием уникального технологического достижения ВНИИФТРИ торсионных подвесов Ф.М.Федченко [2] и научного задела ВКА им. А. Ф. Можайского [3], ЦНИИГАиК [4,5], ЦНИИ машиностроения [6] и других организаций. Ротационные ГГИС имеют следующие преимущества: высокое быстродействие: от 0,1 до 0,001 с, повышенную чувствительность измерений: от 0,0005 до 0,01-0,1 этвеш (1 этвеш =  $10^{-9}c^{-2}$ ), рациональный динамический диапазон измерений: от 80 до 140 дБ и уникальную помехозащищенность от широкополосных бортовых линейных и угловых ускорений (помех). Определены перспективы создания ГГИС на базе торсионных наноэлектромеханических систем (НЭМС) [7], включающих оптронные автокомпенсационные МЭМС [8-10] с технологией вложения систем [11] и гравичувствительные биоэлектрические резонаторы [12]. В дальнейшем предполагается разработка ряда оригинальных технических решений, программного обеспечения и создание новой системы автоматизированного проектирования торсионных ГГИС. В перспективе будут определены направления разработки промышленных технологий изготовления, сборки, отладки, лабораторно-стендовых и натурных испытаний основных узлов, блоков, агрегатов и контроллеров ГГИС различного применения с метрологической обеспеченностью достижимой погрешности измерений вторых производных гравитационного потенциала в зависимости от условий эксплуатации (бортовые авиационно-космические, наземно-морские и другие) в пределах 0,001 -5 этвеш [13].

Ключевые слова: гравиградиентометрия, торсионные нано-электромеханические системы.

В начале 70-х годов прошлого века в СССР и США практически независимо зарегистрированы изобретения одновременно И были профессора А.А. Красовского [1] и Роберта Форварда из фирмы Хьюз Эйеркрафт [4] принципиально нового способа измерения и конструктивные схемы бортового ротационного гравитационного вариометра (РГВ). В отличие от известных гравитационных вариометров Роланда Этвеша [4], в которых реализован метод измерения вторых производных гравитационного потенциала с помощью крутильных весов Ш. Кулона – Г. Кавендиша с временем измерения в заданном азимуте порядка 0,5-1,0 часа, в заявленных конструкциях РГВ реализован новый метод измерения гравитационных градиентов с торсионной механической гантелеобразной колебательной системой и временем измерений в десятые, сотые и тысячные доли секунды.

На рис. 1 показана конструктивная схема РГВ А.А. Красовского, где гантель размещена в сферическом роторе на газовом сферическом подшипнике в сферическом статоре, размещенном на борту летательного аппарата. Съем полезного сигнала - оптический с использованием фотоэлектрических умножителей и синхронного детектирования полезных сигналов.



Рис. 1. РГВ по Авторскому свидетельству СССР №31025 от 23.05.1964 г. Автор – А.А. Красовский, академик РАН

На рис. 2 (а, б, в) представлены первые лабораторные макеты Р. Форварда в виде гантелей с пьезоэлектрическим титанатово-бариевым преобразователем полезного сигнала и его синхронным детектором.



Рис. 2. а) макет РГВ 1966 г., б) макет РГВ 1967 г., в) макет РГВ 1968 г.

По доступным материалам экспериментальных исследований лабораторных макетов И промышленно изготовленных образцов гравитационного вариометра Р. Форварда можно отметить, что основной трудностью их реализации явилась проблема биений подшипников ротора и нестабильность характеристик пьезоэлектрических датчиков полезного сигнала. С начала 2000-х годов в фирме Хьюз Эйркрафт работы были прекращены в связи со сменой владельца и тематики исследований фирмы.

В ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского по реализации изобретений РГВ А.А. Красовского работали слушатели: В.И. Долгополов, Г.О. Крылов и В.М. Халтобин. В 1966 г. к ним присоединился инженер астрономогеодезист Сорока А.И.

На рис. 3, 4 представлены конструктивные схемы РГВ Красовского А.А., усовершенствованные Сорокой А.И. торсионным подвесом гантелей Ф.М.Федченко [2], световолоконным датчиком полезного сигнала [10] и способом коррекции собственных частот спаренных гантелей РГВ В.Ф.Фатеева[3].

Альманах современной метрологии, 2015, №3



Рис. 3. Лабораторный макет РГВ (1968 г.) с чувствительностью измерений ~300 этвеш 1 – гантелеобразный чувствительный элемент РГВ, 2 – световолоконный жгут системы съема полезного сигнала, 3 – механический фильтр помех, 4 – торсионный подвес



Рис. 4. Лабораторный макет с двумя ортогональными гантелями РГВ (1972 г.) с чувствительностью измерений ~60 этвеш

В результате экспериментальных исследований лабораторных макетов РГВ [6,10], показавших удовлетворительную чувствительность измерений от 300 до 60-20 этвеш (1 этвеш = 10<sup>-9</sup>·с<sup>-2</sup>) на базе опытного завода ВВС начаты работы по созданию промышленного образца бортового РГВ по авторскому свидетельству на изобретение Сороки А.И. (№ 90608 от 1973 г.).

На рис. 5 представлена блок-схема экспериментального образца РГВ-4 (1988 г.), модернизированного в течение 2001-2007 гг. в виде РГВ-5 и РГВ-6 на Раменском приборостроительном конструкторском бюро под руководством главного специалиста А.И. Сороки.



Рис. 5. Блок-схема экспериментального образца РГВ-4 (1988 г.) 1, 2 – спаренные гантели из тугоплавких сплавов, 3 – световолоконный жгут, 4 – торсионный подвес, 5 – световолоконный коллектор, 6 – излучающие светодиоды, 7 – дифференциальный фотоприемник

На рис. 6 представлена стендовая установка с экспериментальным образцом РГВ-5 и эталонным грузом кубической формы (плечо куба – 10 см) из свинца и вольфрамового сплава, задающими тарированный гравиградиентный сигнал на вход РГВ-5.

На основе проведенных научно-экспериментальных и опытноисследовательских работ были уточнены основные элементы и блоки оригинальной системы автоматизированного проектирования РГВ различного назначения и доказана работоспособность экспериментальных образцов РГВ с чувствительностью измерений в 0, 1 этвеш, их пригодность для дальнейшей опытно-конструкторской доработки.



Рис. 6 Экспериментальный образец РГВ-5 на лабораторной установке для тарировки входного сигнала от эталонных кубических масс с контролем вертикального и горизонтального гравитационного градиента с помощью микрогравиметра ГАГ-3М ИФЗ РАН (2005 г.)

В конце 70-х годов прошлого века рядом фирм США (С.S. Draper Laboratory, Hughes Aircraft, Bell Aerospace/Textron) были созданы экспериментальные образцы гравитационных вариометров, которые прошли удовлетворительные лабораторные и стендовые испытания. В 1982 г. бортовой гравиградиентный модуль фирмы Bell Aerospace/Textron, разработанный для подводных лодок и измеряющий полный тензор вторых производных потенциала силы тяжести, прошел успешные морские испытания, а в 1987 г. - известный цикл лётно-воздушных испытаний на военно-транспортном самолете C-130 [10, 13].

## Статус и перспективы дальнейшего развития торсионной аэрокосмической гравиградиентометрии

В 1985 г. по инициативе профессора ВВИА им. Н.Е. Жуковского, академика РАН А.А. Красовского и его ученого секретаря А.И. Сороки была принята отечественная национальная программа развития гравитационной градиентометрии в интересах народного хозяйства, обороны и научных исследований В реализации программы были задействованы академические и промышленные НИИ и КБ, учебные ВУЗы. За прошедшие годы были проведены разработки бортовых ГГИС нескольких типов:

1) статического на одной гантели (аналог крутильных весов Кавендиша) (ЦНИИ «Электроприбор»);

2) статического на акселерометрах в криостате (ЦНИИ «Электроприбор»);

3) динамического (ротационного) на двух гантелях с емкостной системой съема информации (РПКБ, МАИ, ИПМ РАН);

4) динамического (ротационного) на двух гантелях с оптической системой съема информации (ВВИА им. Н.Е. Жуковского, МИЭиА).

В ходе исследований были разработаны макетные образцы ТГВ 1-го, 3-го и 4-го типов. Но к 90-му году выполнение программы прекратилось по известным обстоятельствам.

В 2000-е годы в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского совместно с ОАО РПКБ и другими соисполнителями был выполнен ряд НИОКР по созданию промышленных образцов ТГВ на базе ротационных гравитационных вариометров (РГВ) с использованием 2-х ортогональных гантелей и/или 8-ми попарно включённых акселерометров.

В результате проведенных лабораторно-стендовых и полигонных испытаний экспериментальных образцов 2-х экз. РГВ-4, 3-х экз. РГВ-5 и 2-х установлена их разрешающая РГВ-6 была способность экз. И чувствительность измерений в пределах 0,5 - 0,1 этвеш (1 этвеш =  $10^{-9}c^{-2}$ ). Погрешность стендовых и полевых измерений была достигнута в пределах 10-15 этвеш (рис.6, рис.7), что соответствует уровню аналогичных разработок РГВ американской фирмы Textron 1999-2000 гг. при проведении лётных испытаний ИХ модернизированного гравиразведочного геофизического комплекса FTG [4,13].



№ п/п	Тип/ год	Высота/ Диаметр, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Масса, кг	Области применения
1	РГВ-4 1988	370	200	420 мм	16	Суша - море
2	РГВ-5 1997	150	350	н∖д	9	Авиация
3	РГВ-6 2005	102	150	н∖д	~1	Космос, БЛА

Рис.7 Основные параметры отечественных РГВ

В течение 2004-2010 гг. за рубежом получено 42 патента на технологии и конструкции различных ГГИС, проведено 7 научных конференций и семинаров, опубликовано 190 научных статьей и докладов. На доводку до уровня погрешности измерений 3-5 этвеш 3-х типов ГГИС и разработку 5 новых типов ГГИС за рубежом реализовано инвестиций в объёме ~ 50 млн. долларов. Ежегодно осуществляется детальная гравиградиентометрическая профильная съёмка с погрешностью 3-5 этвеш общей длиной ~3000 км и стоимостью ~ 53 млн. долларов. В перспективе до 2025 г. ожидается увеличение инвестиций от 83 до 130 млн. долларов на доводку и разработку новых типов ГГИС (криогенных, на атомных интерферометрах и других) с бортовой погрешностью измерений ~1 этвеш и пространственным разрешением меньше 100 м [13].

Альманах современной метрологии, 2015, №3

Серьезным научно-технологическим барьером в развитии акселерометрических гравиградиентных систем авиационно-космического применения является необходимость обеспечения приемлемого уровня соотношения на входе измерительных систем полезный сигнал/суммарная инерциальная помеха от линейных и угловых ускорений бортового носителя. Так, для орбитального акселерометрического гравиградиентометра с разрешающей способностью в 0,001 этвеш требуется обеспечить чувствительность спаренных акселерометров, разнесенных на базу 10-20 см друг от друга, порядка  $10^{-11} - 10^{-12}g$ , т.е. в динамическом диапазоне 240 дБ. При этом возникают многочисленные конструкторско-технологические и юстировочно-метрологические проблемы [7]. На основе практического опыта аттестации электростатических акселерометров во Франции типа КАКТУС, СУПЕР КАКТУС, ГРАДИО, АРИСТОТЕЛЬ И других отрабатываются методы аттестации И калибровки масштабных коэффициентов акселерометров индивидуально изобретательно. И Например, в известных проектах Франции ГРАДИО, АРИСТОТЕЛЬ, GEO STEP и других для калибровки акселерометров в условиях, близких к состоянию невесомости, используются дополнительные эталонные массы и методы угловой раскрутки бортового носителя (тарировка центробежными ускорениями) [4, 7]. Широкий динамический диапазон акселерометрических орбитальных ГГИС обеспечивается, по мнению разработчиков, путем использования сверхпроводящих пружин-подвесов пробных тел [13] СКВИДов - квантовых магнитометров для съема полезного сигнала в диапазоне 240-280 дБ (см. проекты с участием Пэйка (США) – GRAVSET- В (~ 25 млн. долл.), GG/PEGASUS и GG/SPARTAN-400 (50-60 млн. долл.), MINI STEP (50 млн. долл.), Quick STEP (130 млн. долл.), STEP (~ 500 млн. долл.), GEO STEP, GOCE (~ 200 млн. евро) и в России ЦНИИ «Электроприбор» (Жернаков О.А.), НПОМаш (Зайцев Е.А.) и др. [7,13]. Другим решением является попытка уменьшить динамический диапазон акселерометрического орбитального ГГИС путем разнесения акселерометров на большую базу друг от друга, например, А.А. Красовский (~20 м), итальянский проект TSS-1 и TSS-2 соответственно 10-20 км и 120 км, патент США №4099010 (100-200км), НПОМаш (1 – 2) км.

Представляют интерес предложения по построению орбитальных акселерометрических гравиградиентных измерительных систем ИФЗ РАН -В.В. Дубовского и В.Н.Леонтьева [4] с использованием их высокочувствительных орбитальных акселерометров с разрешением ~ 10<sup>-10</sup>g, установленных на концах жёсткой базы длинной 3-5 м в корпусе космического аппарата и/или на концах сверхпрочного троса типа проектов TSS-1, TSS-2. Оригинальны предложения сотрудников ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского В.Н. Рябченко и В.Е. Петрова для расширения динамического диапазона гравиинерциальных измерителей с использованием теории вложений, с помощью которой синтезируется на Альманах современной метрологии, 2015, №3

выходе измерителя посткомпенсатор диапазона и погрешностей измерений [11]. Появилось сообщение об экспериментальных работах [7,13] по использованию атомных интерферометров для измерения ускорения силы тяжести с разрешением ~10<sup>-10</sup> g, т.е. с параметрами, близкими к электростатическим акселерометрам типа КАКТУС и СУПЕР КАКТУС, но без механических колебательных систем. В России появились предложения по усовершенствованию акселерометрических гравиградиентных систем [4]. В ЦНИИМаш Д.И. Попков предлагает увеличить диапазон акселерометров, выполнив их двухканальными с положительной обратной связью от центробежных сил при вращении платформы с разнесенными на 20 см акселерометрами на частоте вращения 10-20 Гц. Аналогичные схемы «Дельфин» рассматривались В ШНИИ (A.A. Голован). ЦНИИ «Электроприбор» (Б.А. Блажнов), в ВА РВСН им. Петра Великого (В.С.Морозов) и другие.

## Гантельные торсионные ГГИС и проекты их реализации

В конструктивных схемах бортовых вращающихся датчиков (РГВ) вторых производных гравитационного потенциала (Красовский А.А., авторское свидетельство СССР № 31025 от 23.05.1964 г. [1] и № 43076 от 8.07.1967 г; Форвард Р.Л., патент США № 3273397 от 5.06.1964г; Бел К. патент США № 3564921 от 2.02.1968 г.[4]) используется способ измерения гравитационного поля с помощью крутильных весов Ш. Кулона (Кавендиш Г. – 1798г., Этвеш – 1888 г.), установленных на равномерно вращающемся основании (Килхлинг К. – 1926 г.) [4]. Принципиальное отличие указанных РГВ от существующих наземных гравитационных вариометров типа Е-60, Z-40, S-20 и вращающихся вариометров Килхлинга состоит в том, что в них для целей измерения и выделения сравнительно слабого полезного гравитационного сигнала используются резонансные свойства торсионной механической колебательной системы, установленной с этой целью на равномерно вращающемся основании. Резонансный принцип работы модуляционных РГВ позволяет изготовить их механическую измерительную систему почти в 1000 раз жестче и прочнее, чем у существующих наземных дрейф нуль-пункта прибора и одновременно приборов, исключить обеспечить высокую чувствительность и малое время измерения ГГИС.

В первых двух конструктивных решениях бортового РГВ (авт. свид. № 31025 от 23.05.1964 г. и патент США № 3273397 от 5.06.1964 г.) были показаны принципиальные возможности получения высокой чувствительности и точности бортовых измерений вторых производных гравитационного потенциала с этими измерителями, частично решались вопросы съема полезной информации РГВ с вращающегося основания при помощи оптических и пьезоэлектрических измерителей микроперемещений и намечались меры борьбы с пульсациями скорости вращения основания крутильной системы прибора.

Последующие из известных конструктивных решений бортовых датчиков вторых производных гравитационного потенциала (авт. свид. № 43076 от 8.07. 1967г. и патент США № 3564921 от 2.02.1968 г.) были направлены на устранение методических и конструктивных погрешностей работы РГВ, связанных с необходимостью устранения влияния на их полезный сигнал пульсаций скорости вращения и всевозможных линейных и угловых ускорений основания крутильной системы прибора, или так называемых инерционных помех.

Оригинальный способ и конструктивная схема РГВ были предложены в работах [3, 4, 11] для повышения точности и надёжности измерений ГГИС в условиях действия на неё инерционных помех и помех, вызванных угловыми ускорениями вращения ротора РГВ. Указанная цель достигается путем учета и дальнейшего исключения из полезного сигнала РГВ инерционных помех и помех от неравномерности скорости вращения ротора прибора, информация о которых получается в специальном оптронном датчике инерционных помех, регистрирующем суммарные перемещения сдвоенных гантелей чувствительного элемента прибора относительно корпуса ротора РГВ. При этом сигнал от оптронного датчика инерционных помех после обработки в специальном аналоговом или цифровом фильтре вычитается из разностного и удвоенного по амплитуде полезного сигнала и поступает на индикаторное устройство выходного сигнала РГВ. Согласно разработанной технологии выделения и оптимальной фильтрации суммарноразностного полезного сигнала РГВ были синтезированы экспериментально исслелованы оригинальные РГВ с криогенными, электростатическими волоконно-оптическими И двухгантельными чувствительными элементами с быстродействием от 0,001 с до 5-50 с и разрешающей способностью в 0,0001- 0,1 этвеш соответственно для обоснованных проектов космической съёмки гравиградиентного поля Земли [4, 11], астероидов и томографии удельной плотности естественных и искусственных небесных тел, орбитального прогноза землетрясений, цунами и других.

В целом отечественная бортовая гравиградиентометрия по уровню технических решений соответствует лучшим зарубежным образцам типа успешного проекта ЕКА GOCE и частично рассекреченного РГВ фирмы Bell Aerospace [4]. Однако по темпам практической реализации мы отстаём примерно на 15 лет, а по уровню финансирования [13] на два-три порядка. Можно констатировать, что после 1993 и 1996 гг. за рубежом увеличилась интеллектуальная (патентная) и инновационная активность по разработке ряда аэрокосмических и геофизических проектов с использованием гравиградиентометров [4,13]. Причём бортовых количество технических решений в аэро-морской и наземно-скважинной гравиразведке с использованием торсионных РГВ существенно превышает прикладные, например, космическо-мониторинговые применения [4, 13] (см. патентные Альманах современной метрологии, 2015, №3

фонды МПК G 01 V 7/00 – 7/16 США, ФРГ, Англии, Франции, Канады, КНР, Японии, Индии и другие).

Разработки бортовых гравиградиентометров И измерительных комплексов в последнее десятилетие носят конкурентный характер [4,13]. Национальные космические агентства Германии, Франции, Италии, Китая, Японии и других стран имеют зачастую амбициозные и дорогие проекты космического гравиградиентного мониторинга Земли, Луны, спутников планет, астероидов и другие, которые по сравнению с отечественным бюджетным финансированием проектов космических экспериментов и программ выглядят достаточно перспективными. С целью обеспечения конкурентоспособности И инвестиционной привлекательности отечественных проектов орбитальных гравиградиентных определений различного назначения целесообразно повысить изобретательский уровень, обеспечить комплексный системный подход к выбору оптимальных технических решений и проявить определенную осторожность в возможном дублировании дорогих зарубежных проектов.

В целом можно отметить, что современные и перспективные ГГИС представляют собой новый информационный канал о плотностной неоднородности окружающих естественных и искусственных объектов, процессов и природно-техногенных явлений. В дальнейшем предполагается перспективных ГГИС по технологии МЭМС разработка [7] c использованием оптронных автокомпесационных измерителей с посткомпесатором динамических характеристик (рис. 8) технологии учётом биологических НЭМС вложения систем [8-11] с [12] гравичувствительных элементов шишковидной железы (рис. 9).

Схема АКИМВ с ШИМ ТВС	Технические характеристики	Конструкция ДУУ с ШИМ
По А.С. № 851136 и Потенту РФ № 30208		и ТВС
	Диапазон измерений ДУУ, в $1/c^2 - 0.01 - 100$ ; Чувствительность, в $1/c^2 - 0.05$ ; Относительная точность, в $\% - 0.01 - 1.00$ ; Время регулирования, в с – 0.004; Собственная частота, в Гц – 540; Частота микроконтроллера, в мГц – 200- 300; Диапазон рабочих температур, 60 - +60° С; Масса углового акселерометра, в г – 54; Габариты ДУУ, в мм – 38х48х60; Виброперегрузки, в g – 5 – 12; Рабочий ресурс наработки, в час – 1000.	

Рис.8 Автоколебательный измеритель механических величин с широтно-импульсной модуляцией и динамической посткомпенсацией полезного сигнала с применением технологии вложения систем



Рис.9 Общая схема взаимодействия кристаллов CaCO3 с гравиградиентным полем типа Био NEMS

Проект МКА с ГГИС на 8-ми РГВ-6 (рис. 10, 11) был разработан на базе выполненной НИР (ответственный исполнитель главный специалист РПКБ – Сорока А.И.) при активном участии трёх дипломников МГТУ им. Н.Э.Баумана, направленных впоследствии на работу в РКК «Энергия» и ИКИ РАН. Программа предстоящих конструкторско-технологических, метрологических, эксплуатационных и алгоритмических разработок по реализации ГГИС на базе торсионных РГВ, атомных интерферометров, современных технологий МЭМС перспективных НЭМС, криогенных и биологических гравиградиентометров **представлена в проектах** с федеральным бюджетным финансированием.



Рис.10 Компоновка отечественного МКА с ГГИС (2009 г.) для детальной съемки АГПЗ проект типа GOCE



Рис. 11. Проект отечественного МКА с ГГИС на базе РГВ-6 для детальной съёмки АГПЗ типа GOCE

Проблемы, которые возможно решать с использованием орбитальных гравитационно-градиентных измерений ГПЗ: разведка месторождений полезных ископаемых; отслеживание динамики таяния льдов на ледниках и полярных областях; снабжение систем управления РН и КА новой математической моделью ГПЗ; повышение устойчивости СНС «ГЛОНАСС» на основе прогноза траектории движения навигационных спутников по данным гравиградиентной съёмки Земли и др.

## Литература

- 1. Красовский А.А., Румянцев Е.А., Сучков А.И., Вавилов Ю.А. Одноканальные двумерные измерительные и управляющие системы / Труды Военно-воздушной инженерной академии имени проф. Н.Е. Жуковского, вып. 1207, М.: 1967, 345 с.
- 2. Сорока А.И., Федченко Ф.М., Бобрышев В.С. Способ изготовления торсионного подвеса. Авторское свидетельство СССР №360547, кл. МКИ G01С19/22 от 30.03.1970, опубл. 28.11.1972 г., БИ №36.
- 3. Фатеев В. Ф., Сорока А.И Способ измерения гравитационного градиента. Авторское свидетельство СССР №1108892, кл. МКИ G01С19/22 от 02.09.1982, зарегистрировано в Госреестре 15.04.1984 г.
- 4. Гравиметрия и геодезия / Отв. редактор д.т.н. Бровар Б.В. М.: Научный мир, 2010, 572 с.

- 5. Попадьёв В.В. Совершенствование коллакационных методов решения задач физической геодезии. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. МГУГиК (МИИГАиК). Москва, 2012, 202с.
- 6. Сорока А.И., Рябченко В.Н. Разработка орбитального гравитационного градиентометра. Математическое моделирование характеристик полезного сигнала и основных помех орбитального гравитационного градиентометра. / Сб. ЦНИИ Машиностроения Росавиакосмоса России // "Труды рабочей группы при Координационном научно-техническом Совете Российского космического агентства по фундаментальным проблемам гравитации и космическим гравитационным экспериментам (Секция №9)" / Ред. Лукьященко В.И., Королев: 1997, с. 22-38.
- 7. Сорока А.И., Попадьев В.В. Перспективы создания тензорных гравитационно-градиентных измерительных систем на базе МЭМС и НЭМС технологий / Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, Москва, 27 – 30 января 2015 г., с. 506-507.
- 8. Красовский А.А., Сорока. А.И., Черкашин В.В. Преобразователь механических величин. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 851136 от 7.01.1980 г. Бюллетень изобретений, № 28, 1981.
- 9. Сорока А.И., Черкашин B.B. Автокомпенсационный измеритель механических моментов, сил и ускорений. Методика расчета автокомпенсационных измерителей угловых ускорений / В сб. Научнометодические материалы по математическим моделям и измерителям навигационных систем летательных аппаратов. Под ред. A.A. Красовского. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1983, с.96-129.
- 10. Сорока А.И. Методика определения чувствительности и рабочих диапазонов оптронно-световодных датчиков микроперемещений / В сб. "Научно-методические материалы по проектированию систем управления полетом летательных аппаратов. Под ред. А.В. Лебедева. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1976, с. 65-94.
- 11. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006, 720 с.
- 12. Дейнего В.Н., Капцов В.А., Сорока А.И. Влияние света и физических полей на риск дисгармонизации синтеза мелатонина в шишковидной железе // Научно-практический журнал "Анализ риска здоровью", № 2, 2014, с. 30-41.
- 13. Daniel J. DiFrancesco. The Gravity Quest. Lockheed Martin USA, p. 44-48. Title of paper, In R. J. L. Lane (editor), Airborne Gravity, 2010 - Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity, 2010, Workshop: Published jointly by Geoscience Australia and the Geological Survey of New South Wales, Geoscience Australia Record 2010/23 and GSNSW File GS2010/0457.