



*Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-54009 от 30 апреля 2013 г.
Рецензируемое научное издание*

Главный редактор С.И. Донченко, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия:

Зам. гл. редактора А.Н. Щипунов, д.т.н.

Зам. гл. редактора М.В. Балаханов, к.ф.-м.н.

И.Ю. Блинов, д.т.н.

В.М. Боровков, д.т.н.

О.В. Денисенко, д.т.н.

В.И. Добровольский, к.т.н.

И.М. Малай, д.т.н.

В.Н. Некрасов, д.т.н.

В.Г. Пальчиков, д.ф.-м.н.

В.И. Пустовойт, д.ф.-м.н., академик РАН

В.А. Тищенко, к.ф.-м.н.

В.П. Ярына, д.т.н.

Редакционная группа:

Г.А. Мирошникова

О.И. Обухова

Д.В. Студенова

М.Е. Якобсон



*The publication is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, information technology and mass communications (Roskomnadzor).
Certificate of registration of PI No. FS77-54009 dated April 30, 2013
Peer-reviewed scientific publication*

Chief Editor S.I. Donchenko, Doctor of Technical Science, Professor

Editorial board:

Deputy Chief Editor A.N. Shchipunov, Doctor of Technical Sciences

Deputy Chief Editor M.V. Balakhanov, Candidate of Physical
and Mathematical Sciences

I.Yu. Blinov, Doctor of Technical Sciences

V.M. Borovkov, Doctor of Technical Sciences

O.V. Denisenko, Doctor of Technical Sciences

V. I. Dobrovolsky, Candidate of Science

I. M. Malay, Doctor of Technical Sciences

V.N. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences

V.G. Palchikov, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences

V. I. Pustovoit, Doctor of Physics and
Mathematical Sciences, Academician
of the Russian Academy of Sciences

V.A. Tishchenko, Candidate of Physical and
Mathematical Sciences

V.P. Yaryna, Doctor of Technical Sciences

Editorial staff:

G.A. Miroshnikova

O.I. Obukhova

D.V. Studenova

M.E. Jacobson



Точная наука немыслима без меры

Д.И. Менделеев

Альманах современной метрологии, 2020, № 4(24)

Al'manac of modern metrology, 2020, № 4(24)

Выходит с октября 2014 г.

Issued since October 2014.

Решением ВАК с июля 2019 г. включён в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук».

ISSN 2313-8068

Очередной номер «Альманаха современной метрологии» 4 (24) представлен как тематический, посвящённый проблемам создания бесшовных комплексных систем навигации, включающих в свой состав бесплатформенные инерциальные навигационные системы, НАП ГЛОНАСС, а также корреляционно-экстремальные системы навигации, использующие результаты измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли.

Представленные статьи охватывают следующие направления:

- методы и средства комплексной навигации с использованием гравитационного и магнитного полей Земли;
- методы и средства подготовки гравитационных и магнитных карт;
- новые измерительные технологии в гравиметрии;
- измерительные технологии в гравитационно-волновой астрономии;
- метрологическое обеспечение гравиметрических и магнитометрических измерений.

Статьи отражают последние достижения науки и техники и представляют несомненный интерес для специалистов в данной области.

Номер подготовлен по итогам II научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии».

The next issue of the "Almanac of modern metrology" "4 (24) is presented mainly as a thematic one, devoted to the problems of creating complex navigation systems, including strapdown inertial navigation systems, GLONASS, as well as correlation-extreme navigation systems using the results of measuring the parameters of the Earth's gravitational and magnetic fields.

The presented articles cover the following areas:

- methods and means of integrated navigation using the gravitational and magnetic fields of the Earth;
- methods and means of preparing gravity and magnetic maps;
- new measuring technologies in gravimetry;
- measuring technologies in gravitational-wave astronomy;
- metrological support of gravimetric and magnetometric measurements.

The articles reflect the latest achievements of science and technology and are of undoubted interest for specialists in this field.

The issue was prepared following the results of the II Scientific and Technical Conference "Navigation in through the Earth's gravitational and magnetic fields. New technologies".



©ФГУП «ВНИИФТРИ», 2020

©FSUE VNIIFTRI, 2020



СОДЕРЖАНИЕ**Предисловие главного редактора**

С.И. Донченко. Новые технологии навигации на основе геофизических полей	11
--------------------------------------------------------------------------------	----

I. Фундаментальные исследования

В.И. Пустовойт, Н.А. Тестоедов, В.Ф. Фатеев, С.С. Донченко, В.Е. Косенко. Космическая лазерная интерферометрическая гравитационная антенна на основе космических аппаратов, расположенных на орбитах ГЛОНАСС	15
Л.Н. Жерихина, Г.Н. Измайлов, В.В. Озолин. Возможности использования эффектов ОТО в космической навигации	24
Ю.Б. Новожилов, А.В. Давыдов, Ю.Н. Исаев, М.М. Коротков, В.В. Мигачев. Гравитационная гамма-резонансная спектрометрия долгоживущих ядерных изомеров и возможности её применения для изучения тонких гравитационных эффектов	35
Г.А. Вишнякова, К.С. Кудеяров, К.Ю. Хабарова, Н.Н. Колачевский. Высокостабильная оптическая волоконная линия длиной 940 км между институтами МРQ и РТВ для задач релятивистской геодезии	47
В.Ф. Фатеев, Р.А. Давлатов, В.П. Лопатин. Возможности использования системы ГЛОНАСС для формирования гравиметрической многоспутниковой системы	65

II. Исследование характеристик навигационных систем

Т.В. Сазонова. Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли	86
В.Т. Минлигареев, А.В. Алексеева, Ю.М. Качановский, В.В. Трегубов. Картографическое и программное обеспечение перспективных магнитометрических навигационных систем	97
Е.А. Рыбаков. Исследование системы навигации по гравитационному полю Земли при движении по различным маршрутам	104

III. Развитие систем навигации

Л.И. Августов, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава Этапы развития и состояние отечественных разработок систем глобальной автономной навигации	112
О.В. Денисенко, В.И. Пустовойт, И.С. Сильвестров, В.Ф. Фатеев. Проблемы развития бесшовной ассистирующей технологии навигации в ГНСС ГЛОНАСС на основе измерений параметров геофизических полей	127
В.Б. Пудловский. Навигация по сигналам ГЛОНАСС с использованием сверхминиатюрного рубидиевого стандарта частоты	161
В.Ф. Фатеев, Д.С. Бобров, Ю.В. Гостев, Е.А. Рыбаков, М.Н. Карапетян, Р.А. Давлатов, А.О. Долгодуш, Ю.В. Москвитин. Макет системы навигации по геофизическим полям Земли	173

IV. Результаты гравитационных измерений. Цифровые технологии

М.М. Мурзабеков, В.Ф. Фатеев, Д.С. Бобров, Р.А. Давлатов, В.П. Лопатин. Создание многослойных гравиметрических карт на основе данных измерений уклонений отвесной линии и ускорения силы тяжести	185
В.Ф. Фатеев, Р.А. Давлатов, Д.С. Бобров, М.М. Мурзабеков, Е.А. Рыбаков, В.П. Лопатин, А.О. Долгодуш. Разработка аппаратно-программного комплекса «Цифровая земля Подмосковья»	201
В.Ф. Фатеев, Р.А. Давлатов, Д.С. Бобров, М.М. Мурзабеков, Е.А. Рыбаков, В.П. Лопатин. Справочный документ «Цифровая база КВНО»	212
Д.С. Бобров. Методы подготовки опорных навигационных гравиметрических карт на основе данных о рельефе местности	218

V. Прецизионные гравитационные и магнитные измерения

А.В. Белоненко, С.М. Попов, В.Н. Руденко. Прецизионное измерение гравитационного смещения радиочастот околоземных космических аппаратов	236
А.А. Ключиков. Предварительная обработка градиентометрических измерений проекта GOCE	245

Л.Ф. Витушкин, Е.П. Кривцов, В.В. Наливаев, О.А. Орлов Колокация абсолютного баллистического и относительного криогенного гравиметров во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	255
Д.И. Беляков, В.Я. Шифрин, Е.П. Кривцов, А.Е. Шилов. Состояние эталонной базы ВНИИМ в области метрологического обеспечения измерений магнитной индукции	260
В.Т. Минлигареев, Ю.А. Усс. Использование биомиметического полупроводникового сенсора в исследовании слабых магнитных полей	272
Д.С. Бобров, В.П. Лопатин. Результаты экспериментальных исследований по оценке непреливных вариаций ускорения свободного падения	276

VI. Измерительные средства в гравиметрии

В.Н. Руденко, М.В. Кувшинский, С.И. Орешкин, С.М. Попов, К.В. Руденко, И.С. Юдин. Криогенные Фабри-Перо резонаторы с зеркалами на подложках различных оптических материалов	285
В.К. Милюков, А.С. Жамков, В.Е. Жаров, О.А. Ивлев, И.М. Нестерин, В.К. Сысоев. Космический комплекс для измерения гравитационного поля Земли: перспективы реализации проекта	296
В.К. Милюков. Новые измерительные технологии в космическом детекторе гравитационных волн TIANQIN	316
И.В. Балакирева, П.С. Ананьев, М.Л. Восканов, А.А. Раков, В.И. Павлов, Н.П. Хатырев, И.Ю. Блинов. О возможности применения оптических резонаторов с модами шепчущей галереи в мобильных гравиметрах и акселерометрах	337
В.П. Митрофанов. Проблемы детектирования гравитационных волн и создания гравиметров нового поколения	349
В.А. Виноградов, К.А. Карпов, А.В. Турлапов. Квантовые гравиметры на ультрахолодных атомах	364
Е.А. Лавров, Р.А. Давлатов, С.С. Донченко, П.Г. Харламов, Ю.В. Гостев, Д.А. Соколов, Е.А. Карауш. Лазерный интерферометр для измерения смещений пробных масс, вызванных воздействием гравитационных сил	377
Ю.В. Гостев, А.И. Сорока. Гравитационный вариометр тензорного типа с торсионным кардановым подвесом его чувствительного элемента	391

А.И. Сорока. Модуляционный гравитационный вариометр с чувствительным элементом на неконтактном подвесе, Фабри-Перо интерферометром и системой оптимальной обработки сигналов	397
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CONTENTS
Preface of the Chief Editor

S. I. Donchenko. New navigation technologies based on geophysical fields	11
---------------------------------------------------------------------------------	----

I. Fundamental research

V.I. Pustovoit, N.A. Testoedov, V.F. Fateev, S.S. Donchenko, V.E. Kosenko. Space laser interferometric gravitational antenna on the basis of spacecrafts located in GLONASS orbits	15
L.N. Zherikhina, G.N. Izmailov, V.V. Ozolin. Possibilities for using GR effects in space navigation	24
Yu.B. Novozhilov, A.V. Davydov, Yu.N. Isaev, M.M. Korotkov, V.V. Migachev. Gravitational gamma-resonance spectrometry of long-lived nuclear isomers and possibility of its application for studying fine gravitational effects	35
G.A. Vishnyakova, K.S. Kudeyarov, K.Yu. Khabarova, N.N. Kolachevsky. High stability optical fiber 940 km line between MPQ and PTB institutes for tasks relativistic geodesy	47
V.F. Fadeev, R.A. Davlatov, V.P. Lopatin. Possibilities for using the GLONASS system to forming gravimetric multi-satellite system	65

II. Study of the characteristics of navigation systems

T.V. Sazonova. Experimental studies of accuracy characteristics of correlation-extreme navigation systems by the Earth's magnetic field	86
V.T. Minligareev, A.V. Alekseeva, Yu.M. Kachanovsky, V.V. Tregubov. Cartographic software of perspective magnetometric navigation systems	97
E.A. Rybakov. Features of gravity navigation systems while moving along various routes	104

III. Navigation system development

L.I. Avgustov, G.I. Gerasimov, G.I. Djandjgava. Stages of development and state of domestic developments of global autonomous navigation systems	112
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

O.V. Denisenko, V.I. Pustovoi, I.S. Silvestrov, V.F. Fateev. Development problems of seamless assisting navigation technology in GLONASS GNSS on the basis of measurements of geophysical field parameters	127
V.B. Pudlovsky. Navigation by GLONASS signals using subminiature rubidium frequency standard	161
V.F. Fateev, D.S. Bobrov, Yu.V. Gostev, E.A. Rybakov, M.N. Karapetyan, R.A. Davlatov, A.O. Dolgodush, Yu.V. Moskvitin. Layout of the system on geophysical potential of the Earth	173

IV. Results of gravitational measurements. Digital technology

M.M. Murazbekov, V.F. Fateev, D.S. Bobrov, R.A. Davlatov, V.P. Lopatin. Development of multilayer gravimetric maps on the basis of measurement data of plumb line deviation and gravity acceleration	185
V.F. Fateev, R.A. Davlatov, D.S. Bobrov, M.M. Murazbekov, E.A. Rybakov, V.P. Lopatin, A.O. Dolgodush. Development of hardware software complex, «Digital land of the Moscow region»	201
V.F. Fateev, R.A. Davlatov, D.S. Bobrov, M.M. Murazbekov, E.A. Rybakov, V.P. Lopatin. Reference document TPNS digital base.	212
D.S. Bobrov. Gravimetric navigational maps preparation methods Based on the relief data	218

V. Precision gravitational and magnetic measurements

A.V. Belonenko, S.M. Popov, V.N. Rudenko. Precision measurement of gravitational displacement of radio frequencies of near-Earth spacecrafts	236
A.A. Kluykov. Preprocessing of gradiometric measurements of the GOCE project	245
L.F. Vitushkin, E.P. Krivtsov, V.V. Nalivaev, O.A. Orlov. Collocation of absolute ballistic and relative cryogenic gravimeters at the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM)	255
D.I. Belyakov, V.Ia. Shifrin, E.P. Krivtsov, A.E. Shilov. State of VNIIM reference base in the field of metrological support of magnetic induction measurements	260
V.T. Minligareev, Yu.A. Uss. Use of biomimetical semiconductor sensor in the study of weak magnetic fields	272

D.S. Bobrov, V.P. Lopatin. Results of experimental studies evaluating continuous rotation of free fall acceleration	276
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

VI. Measuring instruments in gravimetry

V.N. Rudenko, M.V. Kuvshinskii, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, K.V. Rudenko, I.S. Yudin. Cryogenic Fabry-Perot resonators with mirrors on substrates of various optical materials	285
V.K. Milyukov, A.S. Zhamkov, V.E. Zharov, O.A. Ivlev, I.M. Nesterin, V.K. Sysoev. Space constellation for measuring the earth's gravitational field: the prospects for the implementation of the project	296
V.K. Milyukov. New measuring technologies in space-based gravitational waves detector TIANQIN	316
I.V. Balakireva, P.S. Ananov, M.L. Voskanov, A.A. Rakov, V.I. Pavlov, N.P. Khatyrev, I.Yu. Blinov. Possibility of applying the optical resonators with whispering gallery modes in mobile gravimeters and accelerometers	337
V.P. Mitrofanov. Problems of detecting gravitational waves and development of new generation gravimeters	349
V.A. Vinogradov, K.A. Karpov, A.V. Turlapov. Quantum gravimeters on ultracold atoms	364
E.A. Lavrov, R.A. Davlatov, S.S. Donchenko, P.G. Kharlamov, U.V. Ghostev, D.A. Sokolov, E.A. Karaush. Laser interferometer for measurement of proof mass displacements caused by action of gravitational forces	377
Yu.V. Gostev, A.I. Soroka. Gravitational variometer of tensor type with a torsion gimbal suspension of its sensitive element	391
A.I. Soroka. Modulation gravitational variometer with a sensitive element on a non-contact suspension, Fabry-Perot interferometer and optimal signal processing system	397