

◆ СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ◆

УДК 528.56
DOI 10.17285/0869-7035.0018

В. Г. ПЕШЕХОНОВ, А. В. СОКОЛОВ, Л. К. ЖЕЛЕЗНЯК,
А. Д. БЕРЕЗА, А. А. КРАСНОВ

ВКЛАД НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОЗДАНИЕ МОБИЛЬНЫХ ГРАВИМЕТРОВ

Представлены основные этапы создания в ЦНИИ «Электроприбор» гравиметров для измерения силы тяжести с борта подвижных носителей. Описаны технические решения, позволившие достичь высокой точности измерений. Обсуждаются актуальные области применения мобильных гравиметров.

Ключевые слова: сила тяжести, гравиметр, гравиметрическая съемка.

Введение

Знание гравитационного поля Земли (ГПЗ) необходимо для таких направлений фундаментальной науки, как изучение фигуры Земли и ее глубинного строения, а также для решения широкого круга прикладных задач – от геологоразведки до навигации. Особый интерес представляют локальные неоднородности гравитационного поля на акватории Мирового океана.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Железняк Леонид Кириллович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН» (Москва).

Береза Анна Денисовна. Главный конструктор изделия «Чета-АГТ» (в настоящее время на пенсии).

Краснов Антон Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Специфика локальной морской съемки заключается в том, что измерения проводятся с морских мобильных платформ (судов, подводных лодок), движение и качка которых порождают помехи (инерционное ускорение), на пять десятичных порядков превышающие полезный сигнал. Измерения гравитационного поля необходимы с погрешностью не более 1 мГал (10^{-6} ускорения силы тяжести), а при умеренной качке помеха достигает 100–150 Гал. Гравитационные и инерционные ускорения физически неразделимы, и на измерительную ось гравиметра проецируется их сумма. Задача снижения до приемлемого уровня инерционной помехи – ключевая в разработке морских гравиметров.

Методы морской гравиметрии

Первые измерения ГПЗ на море проводились с помощью маятниковых гравиметров по методу Ф.А. Венинг-Мейнеса (1923 г.). Для снижения влияния горизонтальных ускорений маятниковая система состояла из двух идентичных физических маятников, расположенных в одной плоскости и качающихся в противофазе. Тем не менее при каждом измерении гравитационного поля для фильтрации помех, порожденных низкочастотной качкой, необходимо осреднение порядка 10^3 периодов маятника, и поэтому маятниковые гравиметры невозможно применять для непрерывного измерения на движущемся судне. В настоящее время маятниковые гравиметры используются для создания опорных гравиметрических пунктов – береговых и донных.

Морская гравиметрическая съемка производится с помощью относительных гравиметров, определяющих изменение силы тяжести по отношению к ранее определенному ее значению на опорном пункте. Принцип действия относительного гравиметра (далее – гравиметра) основан на измерении перемещения пробного тела при изменении силы тяжести. По существу, этот принцип соответствует принципу построения вертикального акселерометра в навигации. Выделение полезного сигнала гравиметра производится путем удержания измерительной оси в направлении истинной вертикали и частотной фильтрации суммарного сигнала, основанной на различии частотных спектров сигнала и помех. Точность гравиметра снижают три эффекта: эффект Этвеша, эффект Гаррисона и кросс-каплинг эффект. Последний – только для гравиметров крутильного типа.

Для устранения эффекта Этвеша необходимо иметь высокоточное навигационное обеспечение гравиметрической съемки, эффекта Гаррисона – высокоточную гироскопическую стабилизацию вертикали гравиметра на качке, т.е. использовать современные навигационные технологии. Кросс-каплинг эффект определяется конструктивными особенностями и точностью изготовления деталей и узлов чувствительного элемента гравиметра. Используемые для этого технологии сродни гироскопическим. Неслучайно поэтому в нашей стране в создании морских гравиметров с самого начала активную роль стали играть разработчики навигационной техники, а в настоящее время эта роль стала определяющей.

Морские гравиметры, созданные в СССР

Разработка отечественных морских гравиметров началась в пятидесятые годы прошлого века [1]. Для этой цели в Институте физики Земли Академии наук (ИФЗ) была

создана аэрогравиметрическая лаборатория. Под руководством профессора Е. И. Попова был разработан гравиметр аэрогравиметрической лаборатории (ГАЛ), в основу конструкции которого были положены две идеи – схема с упругой системой подвеса пробного тела, предложенная датским ученым Норгардом (1940 г.), и сильное демпфирование упругой системы вязкой жидкостью.

Упругая система гравиметра (УСГ) ГАЛ выполнена в виде демпфированной двойной кварцевой системы крутильного типа. Конструктивно УСГ состоит из двух одинаковых систем из особо чистого кварца, развернутых на 180° друг относительно друга. Мерой действующего ускорения является изменение угла поворота $\Delta\varphi$ рычага, на котором закреплена пробная масса M (рис. 1). Угол $\Delta\varphi$ определяется с помощью зеркала, закрепленного на кварцевой нити, и оптической системы съема угла поворота зеркала. Использование в качестве материала УСГ кварца (за рубежом применяется специальный сплав) обусловлено технологичностью его обработки, соответствием закону Гука вплоть до полного разрушения, положительным термопластичным коэффициентом. Благодаря этим свойствам кварцевая система имеет прогнозируемое смещение нуля-punkта и обладает рядом преимуществ перед другими типами УСГ, прежде всего по помехоустойчивости и точности.

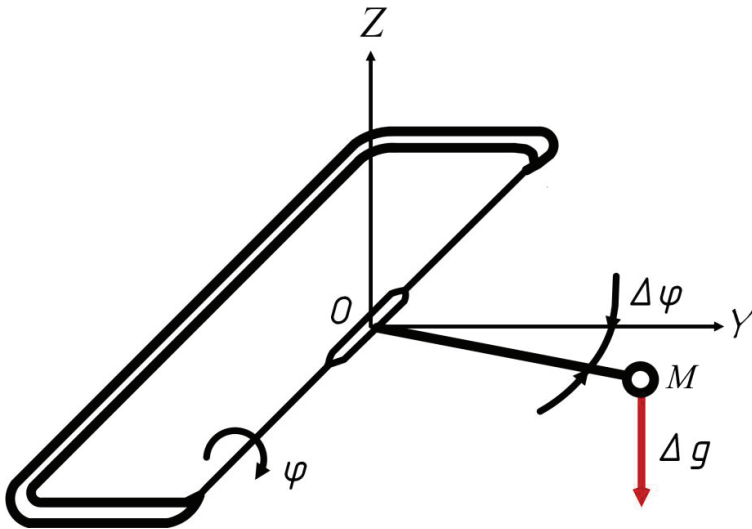


Рис. 1. Принцип действия УСГ

Для обеспечения необходимой точности гравиметра отрабатывались элементы двойной кварцевой системы: идентичность составных частей и параллельность их осей вращения. Разработка включала также обеспечивающие системы ГАЛ: оптическую систему съема информации с непрерывной записью на фотопленку, термостат, карданов подвес для использования гравиметра на качающемся основании [2].

Тем не менее нужной точности гравиметра достичь не удалось, погрешность на подвижном основании была на порядок больше допустимой. Главным источником погрешности были наклоны измерительной оси прибора. Стало очевидным, что требуется гироскопическая вертикаль с малыми остаточными наклонами.

Лидер ученых-гравиметристов член-корреспондент Академии наук Ю. Д. Буланже обратился к академику А. Ю. Ишлинскому с просьбой рекомендовать организацию,

компетентную в области морских систем гиросtabilизации. Так началось сотрудничество ИФЗ и ЦНИИ «Электроприбор», продолжающееся и в настоящее время.

Первый морской гравиметр состоял из макета измерительного прибора ГАЛ-М разработки ИФЗ и гиросtabilизатора системы «Грот» разработки ЦНИИ «Электроприбор». Результаты стендовых испытаний были положительными, и три морских гиросtabilизированных гравиметра длительное время использовались на немагнитной шхуне «Заря» Академии наук для гравиметрических измерений в Атлантическом океане, Балтийском и Северном морях.

Следующий этап развития морской гравиметрии заключался в совершенствовании чувствительного элемента гравиметра при сохранении его конструкции и разработке специализированного гиросtabilизатора. Работа велась в интересах Управления навигации и океанографии ВМФ (УНиО). Параллельно выполнялись две ОКР: разработку измерительного прибора гравиметра производил ИФЗ (главный конструктор – Е. И. Попов), гиросtabilизированной платформы – ЦНИИ «Электроприбор» (главный конструктор – А. Д. Береза) [3, 4].

Гиросtabilизатор (шифр «Чета») построен по схеме силовой гировертикали с механической коррекцией. Принцип силовой гиросtabilизации состоит в компенсации возмущающих моментов при помощи следящих систем. Компенсация ухода платформы, обусловленного вращением Земли и движением корабля, осуществляется путем приложения дополнительных управляющих моментов с помощью датчиков момента, установленных на осях прецессии гироскопа.

Выбор гиросtabilизатора с механической коррекцией обусловлен тем, что позиционные свойства прибора обеспечиваются путем создания маятниковости в гироскопе. Иначе говоря, в такой схеме гироскоп превращается в своеобразный горизонтный маятник, и при наклонах платформы возникают корректирующие моменты, вызывающие прецессионное движение платформы к плоскости горизонта. Достоинствами предложенной схемы по сравнению со схемой, основанной на использовании маятника, являются отсутствие дополнительных чувствительных элементов (маятника, акселерометров) и соответствующих схем управления, малые систематические погрешности на качке, снижение влияния горизонтальных ускорений на показания гравиметра.

Важный вклад в разработку теории морского гравиметра внес известный ученый-гироскопист профессор С. С. Ривкин, исследования которого позволили с позиций вероятностного подхода систематизировать погрешности прибора при воздействии инерционных ускорений качки и орбитального движения судна [4].

Испытания на стенде ЦНИИ «Электроприбор» прошли успешно, и два опытных образца морского гравиметра были установлены на экспедиционном океанографическом судне «Николай Зубов». В 1971 году были проведены государственные испытания продолжительностью 165 сут. В качестве контрольных использовались ранее определенные донные пункты, считавшиеся высокоточными [5]. Вместе с тем в ходе испытаний морского гравиметра было выявлено, что на отдельных пунктах в глубоком море паспортные значения ускорения силы тяжести были определены со значительными погрешностями. В дальнейшем их пришлось уточнить. По завершении государственных испытаний морской гиросtabilизированный гравиметр получил название «МГФ» и был принят на снабжение ВМФ. Серийное изготовление продолжалось шесть лет: изделия ГАЛ-М – на 106-м экспериментальном оптико-ме-

ханическом заводе (106 ЭОМЗ, Москва), гиростабилизатора «Чета» – на Алтайском приборостроительном заводе «Ротор» (г. Барнаул). Опыт разработки, испытаний и эксплуатации гравиметра МГФ выявил пути его дальнейшего совершенствования, а бурно развивающиеся в тот период технологии вычислительной техники и оптоэлектроники открыли для этого новые возможности.

В 1976 году было принято предложение ЦНИИ «Электроприбор» (инициатор – Я. Г. Остромухов) и открыта ОКР по созданию автоматизированного морского гравиметрического комплекса «Чета-АГГ». Главным исполнителем ОКР был определен ЦНИИ «Электроприбор», главным конструктором назначена А. Д. Береза, заместителем главного конструктора – Л. С. Элинсон. Научное руководство проектом, разработка методик гравиметрических измерений, обработки результатов измерений, контроль качества измерений, разработка упругой системы гравиметра осуществлялись ИФЗ (Е. И. Попов, Л. К. Железняк) [6].

Заново разрабатывались все элементы гравиметра. Конструкция и технология изготовления УСГ были переработаны таким образом, чтобы исключить большое число регулировок, снижавших ее надежность [7, 8]. Одновременно был расширен диапазон измерений без перестройки УСГ, обеспечено согласование со вновь введенным оптико-электронным преобразователем. Специально разработанная технологическая оснастка обеспечила регулировку с использованием газовой горелки положения зеркал кварцевой системы в процессе сборки УСГ, выставку с высокой точностью параллельности кварцевых систем. Выпуск документации, разработку технологии изготовления и производство УСГ выполнил 106-й оптико-механический завод.

Вновь разработанный оптико-электронный преобразователь (ОЭП) обеспечил цифровую регистрацию сигнала (в МГФ использовалась фоторегистрация). Он представлял собой автоколлиматор с механическим модулятором – цилиндром с продольной щелью, вращающимся синхронным двигателем. В момент прохождения щели свет, отраженный от зеркала упругой системы, попадает на фотоэлектронный умножитель, который вырабатывает электрический импульс. Второй импульс получается от реперного зеркала. Промежуток времени между ними является мерой ускорения силы тяжести. Число импульсов от высокочастотного генератора образцовой частоты, проходящее за этот промежуток, определяется счетчиком и является отсчетом прибора. ОЭП разработан в Ленинградском институте точной механики и оптики (И. Г. Бронштейн), прибор первичной обработки сигнала – в ЦНИИ «Электроприбор» (Л. С. Элинсон) [9].

Специально спроектированный термостат на элементах Пельтье имеет две особенности. Во-первых, температура стабилизируется на уровне 0°C, так как с понижением температуры уменьшается смещение нуля-пункта и повышается точность его прогнозирования. Во-вторых, в связи с тем, что теплоемкость и теплопроводность материалов корпуса УСГ, кварцевой системы и демпфирующей жидкости различны, для выравнивания температуры корпус термостата изготовлен из теплопроводящего алюминиевого сплава: на нем крепятся термодатчики и элементы Пельтье. Разработку и изготовление опытных образцов термостата выполнило ГСКБ «Теплофизприбор» (С. Д. Смирнов). С учетом полученного при разработке гравиметра ГАЛ-М опыта создана его принципиально новая конструкция, сочетаемая с посадочным местом на гиростабилизаторе. Все основные узлы размещены на жесткой базовой

платформе таким образом, что центр масс прибора совпадает с посадочной плоскостью на кардановом подвесе гиросtabilизатора с возможностью регулировки измерительной оси по уровням и её жесткой фиксации (разработка ЦНИИ «Электроприбор», В. К. Смирнов). Такая конструкция исключает упругие наклоны корпуса гравиметрического датчика относительно гиросtabilизатора, что имело место для гравиметра МГФ [10].

Гиросtabilизатор выполнен по оправдавшей себя схеме силовой гировертикали с механической коррекцией с глубоко модернизированной элементной базой. Вновь разработанный малогабаритный гироскоп является вакуумированным, построен на гиromоторе уменьшенных размеров, но с повышенной скоростью вращения и с новой подшипниковой опорой. В составе следящих систем заменены основные элементы – датчики угла и электродвигатели, применены транзисторные усилители. Это позволило снизить динамические погрешности гиросtabilизации и, соответственно, погрешность гравиметра, обусловленную эффектом Гаррисона. Впервые гиросtabilизатор помещен на специально разработанный амортизатор для снижения влияния вибраций (К. А. Выговский) [10].

Специализированная ЭВМ, работающая в реальном масштабе времени (Е. А. Шлейфштейн), радикально расширила возможности обработки сигналов и регистрации гравиметрических данных. Использование ЭВМ позволило выполнить эффективную фильтрацию сигналов на фоне помех, компенсировать регулярную составляющую смещения нуля-пункта гравиметра, вводить различные поправки, привязать данные гравиметра к координатам места, проводить первичную обработку информации [10, 11]. Всего было разработано 32 программы, с помощью которых проводилась автоматизированная обработка полученных данных.

Государственные испытания морского гравиметрического комплекса (МГК) «Чета-АГГ» (рис. 2) на гидрографическом исследовательском судне «Персей» завершились в 1981 году. Серийное изготовление изделия осуществлял Алтайский приборостроительный завод «Ротор» в кооперации с 106 ЭОМЗ. МГК «Чета-АГГ» широко использовались гидрографической службой ВМФ, более десяти лет проводившей гравиметрическую съемку на океанских исследовательских судах (ОИС) «Иван Крузенштерн», «Леонид Соболев», «Адмирал Владимирский», «Владимир Каврайский» и менее крупных гидрографических судах. Были совершены многие десятки дальних походов. Их эффективность оказалась очень высокой. Так, во время первого похода ОИС «Иван Крузенштерн» по маршруту Балтика – Средиземное море – Балтика был снят большой полигон $150 \times 100 \text{ км}^2$ с погрешностью менее 1 мГал. В 1983 году были проведены расширенные испытания МГК «Чета-АГГ». Систематическая погрешность, определенная на донных гравиметрических пунктах, оказалась близка к 1 мГал, среднеквадратичное отклонение – 0,9 мГал, скорость смещения нуля-пункта – 0,07 мГал/сут. [41].

На ОИС «XVII съезд профсоюзов», принадлежащем научно-производственному объединению «Южморгеология», с участием специалистов ИФЗ и ЦНИИ «Электроприбор» были проведены маршрутные и площадные съемки в Северном Ледовитом, Атлантическом, Индийском и Тихом океанах. Результаты измерений на длинных профилях в океанах впоследствии использовались для оценки погрешности различных моделей гравитационного поля Земли, построенных по результатам спутниковых альтиметрических определений.

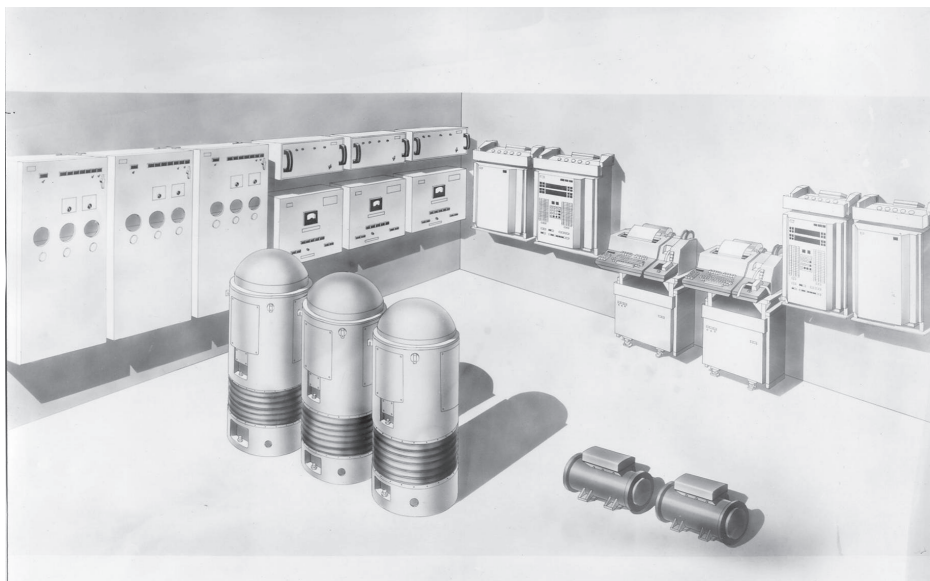


Рис. 2. Общий вид гравиметрического комплекса «Чета-АГГ», содержащего три гравиметрические системы

В 1991 году в Печорском море была выполнена съемка нефтегазоносной структуры «Приразломная», обработка результатов которой по специальной методике дала погрешность 0,06 мГал, что и в настоящее время является высоким результатом. В том же 1991 году на ОИС «XVII съезд профсоюзов» выполнена площадная съёмка на акватории Тихого океана группой гравиметров: «Чета-АГГ» (2 измерителя), 2 комплекта ГМН (по 3 прибора) и прибор S фирмы LaCosta&Romberg [12]. Оценка точности выполнена по разностям в 121 пункте пересечений профилей при возмущающих ускорениях около 45 и 25 Гал на встречных курсах. Случайная погрешность составила соответственно 0,66, 1,54 и 2,70 мГал и систематическая – 0,14, –0,26 и –0,40 мГал. Разность невязок на встречных курсах достигла 0,39, 3,38 и 3,83 мГал соответственно, что свидетельствует о значительной зависимости погрешности измерений от величины возмущающих ускорений для приборов ГМН и S и более высокой устойчивости МГК «Чета-АГГ» к возмущающим ускорениям. После уравнивания результатов измерений по единой методике случайная погрешность составила соответственно 0,14, 0,49 и 0,45 мГал.

За создание МГК «Чета-АГГ» авторскому коллективу в составе А. Д. Березы, В. М. Семенова, В. К. Смирнова, Е. А. Шлейфштейна, Л. С. Элинсона (ЦНИИ «Электроприбор»); Л. К. Железняк, Е. И. Попова (ИФЗ); Г. И. Жуковой (106 ЭОМЗ); Б. Х. Ганеева (сотрудник Министерства обороны); Ю. Г. Аргудяева (завод «Ротор») была присуждена премия имени Н. Н. Острякова, учрежденная Правительством СССР в память о выдающемся главном конструкторе гироскопических приборов.

Мобильные гравиметры XXI века

Во второй половине восьмидесятых годов был выполнен значительный объем исследований в интересах совершенствования МГК. Работами руководил один из ве-

душих ученых ЦНИИ «Электроприбор» доктор технических наук Л. П. Несенюк, к числу достижений которого относятся пионерские работы по исследованию качки корабля и обработке информации гироскопических и гравиметрических приборов [13].

Целью исследований было достижение точностных характеристик гравиметров мирового уровня. МГК «Чета-АГГ» приблизился к ним по ряду параметров, но в части смещения нуля-пункта отставание было значительным. Было изготовлено и исследовано 17 образцов УСГ, проверялись различные марки кварцевого стекла, покрытия кварцевых систем и их термообработка, усовершенствована конструкция УСГ в целях исключения самопроизвольных скачков в показаниях МСГ, разработаны новый термостат и ОЭП, заменена элементная база всех устройств в целях повышения эксплуатационных характеристик МГК. Разработан гиростабилизатор на гироскопе с аэродинамической опорой, обеспечивший погрешность гиростабилизации менее 30". Принципиальным было непрерывное использование высокоточной спутниковой информации для снижения влияния эффекта Этвеша, отработка методики гравиметрической съемки и обработка результатов съемки на персональном компьютере, впервые включенном в состав МГК. В результате этого комплекса работ среднеквадратическая погрешность гравиметра в условиях океана составила менее 0,5 мГал. Опытный образец МГК «Скалочник» в 1994 году прошел испытания на гидрографическом исследовательском судне «Витязь», но экономический кризис 90-х годов исключил возможность его серийного производства.

Отсутствие в конце XX века заказов от ВМФ стало причиной поиска возможности выхода с МГК на гражданский рынок, прежде всего морской геологоразведки. В тот период российские геологические фирмы использовали гравиметры ГМН, разработанные во ВНИИ «Геофизика» и серийно выпускаемые заводом «Нефтекип». Гравиметр ГМН построен по схеме сейсмографа Голицына, измерение производится с использованием астазированной упругой системы. Обеспечивается погрешность измерений менее 1 мГал, но только при интервале между уточнениями на опорных пунктах менее суток и возмущающих ускорениях до 30 Гал (слабое волнение), что исключало возможность применения его в океанской зоне. В открытом океане в интересах геологии использовались гравиметры только зарубежных фирм (немецкой Bodenseewerk и американской LaCosta&Romberg). Естественно, они успешно работали и на шельфе.

Ключевой проблемой продвижения МГК на гражданский рынок было существенное отставание по эксплуатационным характеристикам. У геофизиков были востребованы мобильные гравиметры с небольшими массогабаритными характеристиками, современными средствами сбора и обработки данных, малым энергопотреблением, не требующие специальных систем охлаждения, пригодные для использования не только на судах, но и самолетах. МГК типа «Чета-АГГ» этим требованиям не соответствовали.

ЦНИИ «Электроприбор» в 1996–1998 годах в инициативном порядке разработал прототип мобильного гравиметра и выполнил с ним комплекс работ, включавший гравиметрические исследования на геологоразведочном морском судне (Норвегия), самолете (Германия), участие в международном тендере [14]. Эти работы подтвердили конкурентоспособность отечественных морских гравиметров и позволили уточнить требования к составным частям МГК, определить эффективную маркетинговую политику [15]. В 1999 году Министерство науки и технологий России объяви-

ло тендер на создание мобильного (аэроморского) гравиметра для широкого использования в нефтегазоразведке на шельфе окраинных морей. В конкурсе участвовали ЦНИИ «Электроприбор» и научно-техническое предприятие (НТП) «Гравиметрические технологии», ранее выделившееся из ЦНИИ «Дельфин», московской организации, работающей в области морской навигации. Сложилась редкая ситуация: обе организации были признаны победителями конкурса и приступили к разработке гравиметров. Работы НТП «Гравиметрические технологии» выходят за рамки настоящей статьи, с ними можно ознакомиться в публикациях [16, 17].

Опираясь на предыдущие разработки и приобретенный опыт использования гравиметра в интересах морской геологии, ЦНИИ «Электроприбор» приступил к созданию мобильного гравиметра «Чекан-АМ» (авиационный и морской). Работы по созданию мобильного гравиметрического комплекса четвертого поколения (главный конструктор – Л. С. Элинсон) проводились в трех основных направлениях:

- радикального сокращения массогабаритных характеристик комплекса без потери точностных и надежностных характеристик гравиметра;
- создания современной вычислительно-управляющей системы МГК на базе микроконтроллеров и ПЭВМ;
- синхронизации гравиметрических и навигационных измерений и совершенствования технологии их совместной обработки.

При проектировании центрального гироскопического прибора мобильного гравиметра «Чекан-АМ» за основу была взята конструкция инерциальной навигационной системы (ИНС) типа «Ладога», в то время серийно выпускаемой ЦНИИ «Электроприбор». Без изменения в ней были оставлены чувствительные элементы (поплавковые гироскопы и акселерометры), датчики угла и моментные двигатели, а также конструкция двух карданных колец, а вместо третьего азимутального кольца устанавливался гравиметрический датчик. Размер такого гиростабилизатора составил $\varnothing 430 \times 450$ мм, а вес – 55 кг. Кроме того, в отличие от всех предшествующих аналогов, в которых блоки управления размещались в отдельном приборе, в гравиметре «Чекан-АМ» микроконтроллеры были выполнены в виде миниатюрных печатных плат, встроенных непосредственно в гиростабилизатор. Это существенно упростило приборный состав гравиметрического комплекса, а также значительно повысило качество и надежность гироскопической следящей системы, так как была исключена передача аналоговых сигналов через токоподводы и соединительные кабели.

Новый малогабаритный гиростабилизатор не позволял разместить в нем существующий гравиметрический датчик, и в итоге потребовалась его кардинальная переработка. Как и ранее, было принято решение проектировать гравиметрический датчик на основе двойной кварцевой упругой системы, но ее размеры и вес были значительно уменьшены, что потребовало иного теоретического расчета основных параметров кварцевого чувствительного элемента (Л. К. Железняк). Одновременно с усовершенствованием УСГ был разработан новый оптико-электронный преобразователь, служащий для измерения угла поворота кварцевых маятников (А. В. Соколов) [18]. С целью повышения разрешающей способности фотоприемник ОЭП был построен на двух приборах с зарядовой связью линейного типа. Это позволило использовать объектив с большим фокусным расстоянием 150 мм и исключить механическую модуляцию оптического сигнала, а вследствие этого – уменьшить габариты и тепловыделение. В качестве источника излучения в новом ОЭП использовался

светодиод в импульсном режиме. Это дало возможность синхронизировать выдачу гравиметрических данных с внешними источниками информации, в том числе и от приемника спутниковых навигационных систем. К сожалению, из-за ограниченных размеров гравиметрического датчика его система термостабилизации, как и ранее, охватывала только УСГ без ОЭП. И более того, в отличие от МГК «Чета-АГГ», пришлось увеличить точку поддержания температуры с 15 до 35°C, так как конструкция термостата не позволяла ему работать на охлаждение чувствительного элемента. Увеличение температуры статирования негативно сказалось на скорости смещения нуля-пункта, который в гравиметре «Чекан-АМ» составляет 2-3 мГал/сут.

Помимо центрального прибора в состав мобильного гравиметра «Чекан-АМ» входил прибор термостабилизации и блок УМТ, которые были предназначены для поддержания постоянной температуры внутри гиростабилизатора. В состав комплекса входили также вторичные источники электропитания и ПЭВМ промышленного исполнения со специализированным программным обеспечением сбора и первичной обработки гравиметрических и навигационных данных.

По соглашению о техническом сотрудничестве с норвежской геофизической компанией «TGS NOPEC» в июне 2001 года первый образец мобильного гравиметра был установлен на исследовательском судне «Northern Access» для гравиметрической съемки в процессе выполнения морских сейсмических работ с целью поиска нефтегазоносных структур. Одновременно съемка выполнялась и гравиметром LaCosta&Romberg. Среднеквадратическая погрешность съемки, вычисленная по разности показаний мобильного гравиметра на 73 повторных контрольных пунктах, составила 0,36 мГал и оказалась не хуже, чем у американского аналога [15]. Кроме того, за счет более точной системы стабилизации и неподверженности датчика кросс-каплинг эффекту гравиметр «Чекан-АМ» мог работать при более сложных погодных условиях. Именно эти совместные испытания, выполненные с привлечением независимых норвежских экспертов, открыли мобильному гравиметру «Чекан-АМ» путь на международный рынок морской геофизической аппаратуры. В 2004 году был получен сертификат Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии об утверждении мобильного гравиметра «Чекан-АМ» в качестве типа средств измерений, а с 2005 года в ЦНИИ «Электроприбор» были налажены их серийный выпуск и поставки отечественным и зарубежным заказчикам для применения на море. За создание и внедрение мобильных гравиметров коллектив разработчиков в 2006 году получил премию Правительства РФ.

Проведение аэрогравиметрических работ с помощью мобильного гравиметра «Чекан-АМ» изначально имело два существенных ограничения. Во-первых, жидкостное демпфирование чувствительного элемента гравиметра приводило к сглаживанию измеряемых аномалий силы тяжести. Этот негативный эффект начинал проявляться вследствие сравнительно высокой скорости движения воздушных носителей. Во-вторых, использование двухосной гиropлатформы, принципиально возмущаемой азимутальным движением носителя, приводило при смене галса съемки к значительному отклонению от вертикали оси чувствительности гравиметра в течение 10-15 мин. Это определяло время «холостого» полета, при котором данные гравиметра не могли идти в обработку.

Оба этих недостатка удалось исключить алгоритмическими способами без доработки конструкции гравиметра. Уменьшение влияния жидкостного демпфирования было достигнуто путем восстановления выходного сигнала гравиметра цифровым

фильтром, учитывающим модель чувствительного элемента [19, 20]. Обеспечение невозмущаемости двухосной гироскопической платформы при маневре было реализовано демпфированием погрешностей гироскопической платформы по данным от спутниковой навигационной системы. Это, в свою очередь, потребовало разработки и внедрения канала аналоговой стабилизации двухосной гироскопической платформы в азимуте [21].

Ключевые летные испытания гравиметра «Чекан-АМ» были проведены в Германии совместно с Брауншвейгским техническим университетом в 2008 году. Измерения гравиметра сопоставлялись с данными наземной карты (рис. 3). Результаты испытаний над Магдебургской аномалией подтвердили возможность высокоточного измерения силы тяжести с использованием гравиметра «Чекан-АМ» с борта легкомоторного самолета даже на небольшой высоте [22].

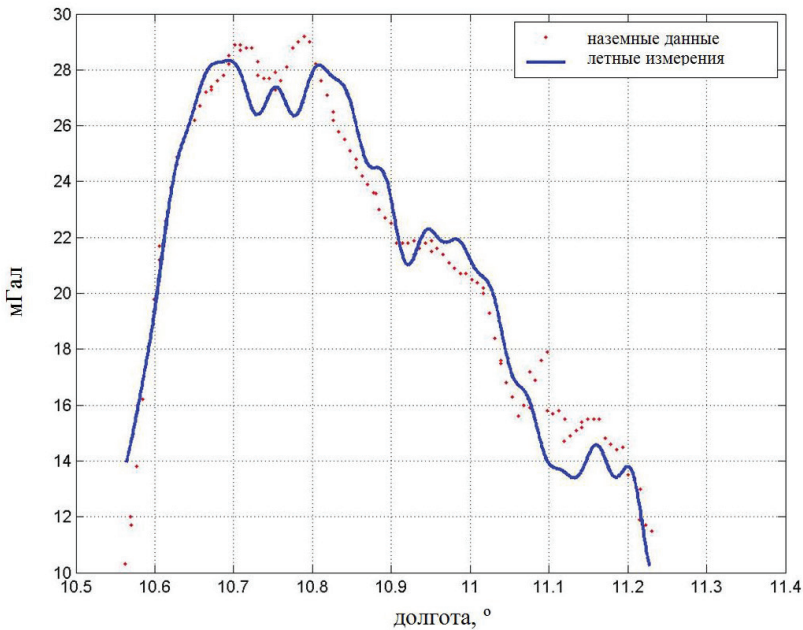


Рис. 3 Сравнение результатов авиационных измерений гравиметра «Чекан-АМ» с данными наземной карты

В 2007–2010 годах по заказу УНиО в ЦНИИ «Электроприбор» была выполнена опытно-конструкторская работа по созданию модернизированного гравиметрического комплекса «Попугай» (главный конструктор – А. В. Соколов). В комплексе «Попугай» необходимо было в 2 раза повысить точность и обеспечить полную всепогодность измерений. Кроме того, новыми требованиями являлись расширение круга функциональных задач, включая прием данных от эхолотов различных типов, планирование съемки, удержание судна на галсе и камеральная обработка данных по канонам ВМФ.

Основными факторами, влияющими на точность измерений, оставались большое смещение нуля-пункта гравиметра и влияние изменений температуры окружающей среды. По этой причине задачу двукратного повышения точности по сравнению с гравиметром «Чекан-АМ» пришлось решать за счет полной переработки конструкции гравиметрического датчика.

Были спроектированы (ИФЗ, Л. К. Железняк) новая УСГ, размеры которой были в 1,5 раза меньше, но при этом сохранялась инструментальная точность (рис. 4), но-

вый миниатюрный ОЭП с КПОМ-матрицей, обеспечивающий более высокое угловое разрешение, и, главное, новый термостат, что впервые одновременно позволило изолировать УСГ и ОЭП от окружающей среды и работать на пониженной температуре [23]. В итоге благодаря новой конструкции датчика удалось значительно уменьшить смещение нуля-пункта и в 2-3 раза снизить влияние перепадов температуры окружающей среды. Более того, качество термостата дало возможность исключить из состава комплекса прибор термостабилизации гиросплатформы, что более чем в 3 раза снизило энергопотребление комплекса.

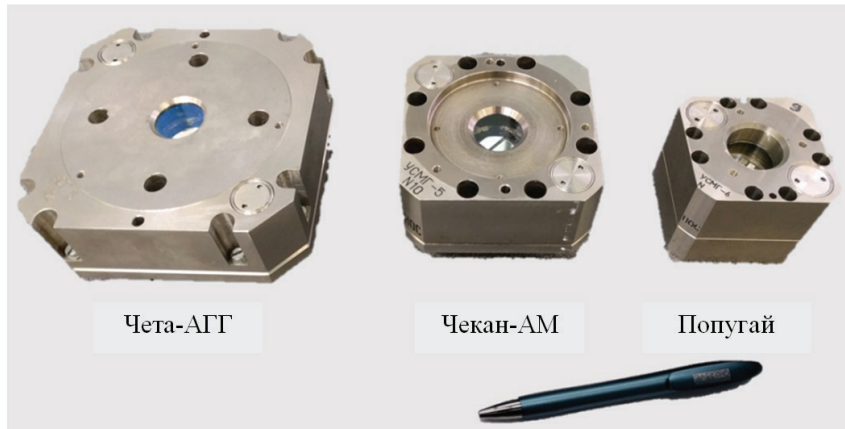


Рис. 4. Упругие системы гравиметров

Появление новой гравиметрической аппаратуры также потребовало создания современного комплекса обработки гравиметрических данных. В 2011–2013 годах ЦНИИ «Электроприбор» по заказу УНИО выполнил опытно-конструкторскую работу по созданию программно-аппаратного комплекса сбора, обработки и анализа гравиметрических данных «Ракурс-4» (главный конструктор – А. В. Соколов). В результате было создано программно-математическое обеспечение для камеральной обработки данных, полученных с использованием гравиметров «Попугай» и «Чекан-АМ», в полном соответствии с требованиями ВМФ [24].

Новые технические решения, полученные в ходе ОКР «Попугай» и позволившие в два раза повысить точность морских гравиметрических измерений, были внедрены при модернизации гравиметров «Чекан-АМ», которая выполнялась в рамках ОКР «Малогабаритный аэроморской гравиметр нового поколения «Шельф-Э» (главный конструктор – А. В. Соколов) [25]. Учитывая необходимость оперативной перестановки гравиметра с судна на судно, состав гравиметра «Шельф-Э» был максимально упрощен. В него входят только два прибора: гравиметрический датчик, установленный в двухосный гиростабилизатор, и регистрирующий ноутбук со специализированным программным обеспечением (рис. 5).

Сегодня ЦНИИ «Электроприбор» продолжает серийный выпуск гравиметров «Шельф-Э», которые востребованы российскими и зарубежными компаниями. Новая модель гравиметра уже использовалась для выполнения ряда морских гравиметрических работ, в том числе впервые были произведены высокоточные измерения в районе Северного географического полюса Земли в рамках экспедиции «Арктика-2014» [26]. Наилучшей характеристикой качества гравиметра «Шельф-Э» явля-

ются результаты морской гравиметрической съемки, выполненной при участии ИФЗ в акватории Индийского океана. Полученные невязки аномалий силы тяжести, вычисленные в точках пересечений съемочных галсов площадной гравиметрической съемки, в предельном значении составили 0,06 мГал [27].

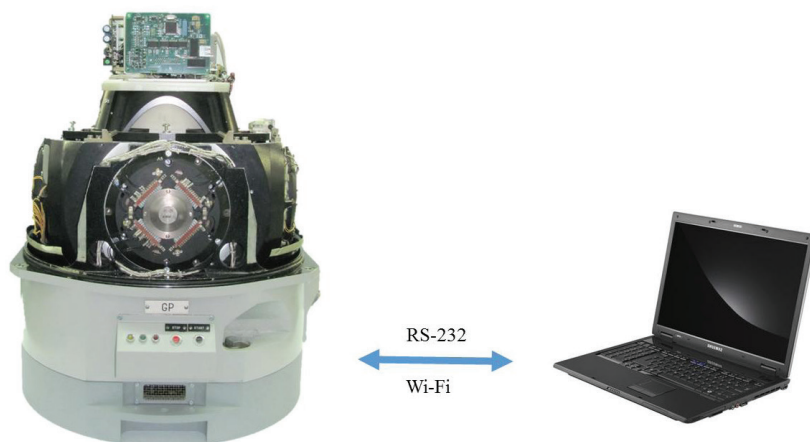


Рис. 5. Мобильный гравиметр «Чекан-АМ» (модель «Шельф-Э»)

Актуальные области применения мобильных гравиметров

На сегодняшний день основной областью применения морских гравиметров остаются комплексные геофизические исследования с целью разведки углеводородных залежей на шельфе. Гравиметрические измерения при таких работах носят попутный характер, а главным методом является сейсморазведка. За прошедшие 15 лет для проведения морских гравиметрических съемок в интересах коммерческих геофизических работ использовалось более 50 образцов мобильных гравиметров «Чекан-АМ». В этот период выполнено около 150 съемок, общая протяженность которых превысила 2,5 млн км. Кроме ведущих российских геологоразведочных организаций, гравиметры «Чекан-АМ» при проведении морских работ используют крупные геофизические компании из Норвегии, Германии, Дании, Великобритании, США и Китая. Значение среднеквадратической погрешности морской съемки с использованием гравиметров «Чекан-АМ» обычно варьируется от 0,2 до 0,5 мГал [28, 29]. При этом пространственная разрешающая способность измерений составляет от 300 до 1500 м, что позволяет строить гравиметрические карты с сечением изоаномал 0,5-1,0 мГал (рис. 6). При этом ЦНИИ «Электроприбор» продолжает вести работы, направленные на повышение точности морских гравиметрических измерений [30, 31].

Вторым важным направлением применения мобильных гравиметров являются авиационные съемки. Основной задачей, решаемой с использованием материалов аэрогравиметрии, является совершенствование модели фигуры Земли, что особенно актуально для удаленных областей Арктики, Антарктиды и других труднодоступных районов, где отсутствуют или имеют недостаточную точность данные спутниковой альтиметрии и градиентометрии. Региональные аэрогравиметрические съемки выполняются также при прогнозном геофизическом исследовании перспектив малоисследованных районов. И кроме того, результаты авиационных измерений силы

тяжести привлекаются при оценке точности и разрешающей способности современных глобальных моделей ГПЗ [32]. Для решения всех перечисленных задач также успешно применяются гравиметры «Чекан-АМ». Среднеквадратическая погрешность авиационных измерений обычно не превышает 1 мГал при пространственной разрешающей способности 5-7 км. С некоторыми результатами авиационных работ можно ознакомиться в [33–38].

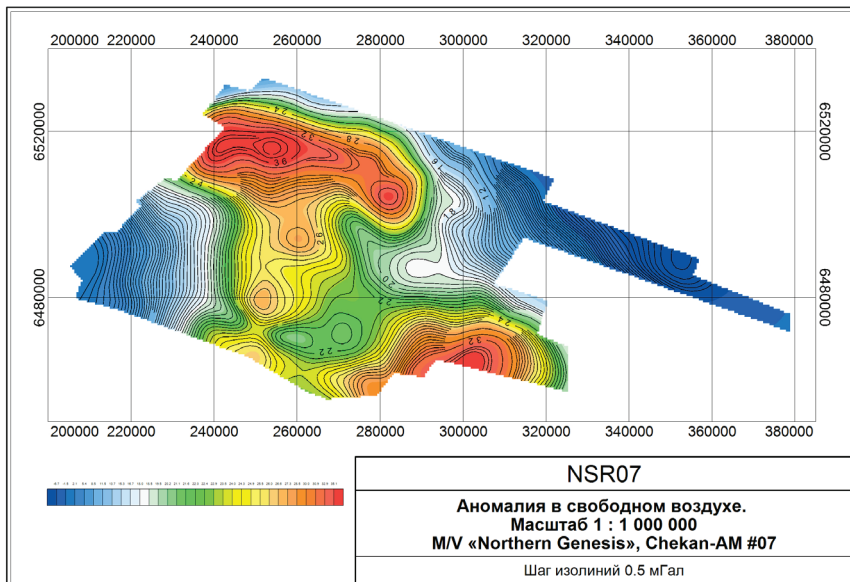


Рис. 6. Гравиметрическая карта, построенная по результатам съемки с использованием гравиметра «Чекан-АМ»

Еще одним перспективным направлением применения мобильных гравиметров является автономная навигация подвижных объектов с использованием данных о гравитационном поле Земли. Опыт коррекции бортовой ИНС по данным гравиметра на заранее снятом навигационном геофизическом полигоне описан в [39, 40]. Данному методу как дополнению к инерциальной навигации практически нет альтернативы при отсутствии сигналов спутниковых навигационных систем. Это обуславливает его развитие в будущем, а морские и авиационные съемки с использованием мобильных гравиметров позволяют создать для него картографическую основу.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веселов К.Е.** О статическом способе измерений силы тяжести на море с помощью упругой системы вращательного типа // Прикладная геофизика. Вып.15. 1956.
2. **Попов Е.И.** Кварцевый гравиметр для морских наблюдений // Тр. ИФЗ АН СССР. №8. 1959.
3. **Попов Е.И.** Определение силы тяжести на подвижном основании с помощью сильно демпфированных гравиметров. М.: Наука, 1967.
4. **Ривкин С.С., Береза А.Д.** Гироскопическая стабилизация морских гравиметров. М.: Наука, 1985. 176 с.
5. **Железняк Л.К., Измайлов Ю.П., Марков Г.С., Попов Е.И.** Опыт проведения площадных съемок морскими гравиметрами. М.: Наука, 1976.

6. Попов Е.И., Железняк Л.К., Береза А.Д., Элинсон Л.С. Принципы построения морского автоматизированного гравиметра // Метрология в гравиметрии. Тезисы докладов первой научно-технической конференции. Харьков: Изд-во ХГНИИМ, 1980. С. 88–90.
7. Железняк Л.К., Попов Е.И. Упругая система типа УСГ // Приборы и методы обработки гравинерциальных измерений. М.: ИФЗ АН СССР, 1984.
8. Железняк Л.К., Элинсон Л.С. Особенности эталонирования гравиметра с двумя упругими системами крутильного типа методом наклона // Физико-техническая гравиметрия. М.: ИФЗ АН СССР, 1982.
9. Антонов В.И., Бронштейн И.Г., Лившиц Э.М., Элинсон Л.С. Исследование погрешностей оптико-электронного преобразователя автоматизированного морского гравиметра // Метрология в гравиметрии. Тезисы докладов второй научно-технической конференции. Харьков: Изд-во ХГНИИМ, 1984. С. 86–87.
10. Железняк Л.К., Попов Е.И. Принципы построения и оптимальная схема современного морского гравиметра // Физико-техническая гравиметрия. М.: ИФЗ АН СССР, 1982.
11. Береза А.Д., Костров А.В., Ривкин С.С. Исследование методов фильтрации при гравиметрических измерениях // Физико-техническая гравиметрия. М.: Наука, 1982. С. 61–88.
12. Железняк Л.К. Площадная съемка в океане гравиметрами различных типов // Физика Земли. 1992. №3. С. 50–55.
13. Памяти профессора Л.П. Несенюка. Избранные труды и воспоминания. СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2010.
14. Ржевский Н.Н., Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С. Опыт использования гравиметрического комплекса «Чекан-А» при морских сейсмических работах за рубежом // Геофизический вестник. 1999. №12. С. 8–11.
15. Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С. Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Применение гравинерциальных технологий в геофизике. СПб., 2002. С. 21–32.
16. Бержицкий В.Н., Ильин В.Н., Савельев Е.Б., Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А., Попов Г.В., Чичинадзе М.В. Инерциально-гравиметрический комплекс. Опыт разработки и результаты летных испытаний // Применение гравинерциальных технологий в геофизике. СПб., 2002. С. 48–60.
17. Smoller, Yu.L., Yurist, S.S., Fedorova, I.P., Bolotin, Yu.V., Golovan, A.A., Koneshov, V.N., Hewison, W., Richter, T., Greenbaum, J., Young, D., Blankenship, D., Using Airborne Gravimeter GT2A in Polar Areas, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2014, pp. 36–40.
18. Блажнов Б.А., Несенюк Л.П., Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Элинсон Л.С., Железняк Л.К. Интегрированный мобильный гравиметрический комплекс. Результаты разработки и испытаний // Применение гравинерциальных технологий в геофизике. СПб., 2002. С. 33–44.
19. Блажнов Б.А., Несенюк Л.П., Элинсон Л.С. Особенности выработки параметров вертикального движения объекта по данным сильно демпфированного гравиметра // Гироскопия и навигация. 1996. №4.
20. Краснов А.А., Соколов А.В. Разработка и внедрение методики обработки аэрогравиметрических измерений // Навигация и управление движением. Материалы докладов X Юбилейной конференции молодых ученых. Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. 2008. С. 193–198.
21. Краснов А.А., Тепляшин А.А. Исследование погрешностей гиросtabilизатора аэрогравиметра // Навигация и управление движением. Материалы докладов VIII Конференции молодых ученых. Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. 2006. С. 42–47.
22. Krasnov, A.A., Nesenyuk, L.P., Sokolov, A.V., Stelkens-Kobsch, T.H., Heyen, R., Test results of the airborne gravimeter, *Proceedings of the International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2007)*, 2008, pp. 73–77.
23. Евстифеев М.И., Краснов А.А., Соколов А.В., Старосельцева И.М., Элинсон Л.С., Железняк Л.К., Конешов В.Н. Гравиметрический датчик нового поколения // Измерительная техника. 2014. №9. С. 12–15.
24. Краснов А.А., Соколов А.В. Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2015. №2 (89). С. 118–131.
25. Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Элинсон Л.С., Краснов А.А. Результаты разработки и испытаний нового аэроморского гравиметра // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2015. С. 173–179.

26. Казанин Г.С., Иванов Г.И., Казанин А.С., Васильев А.С., Макаров Е.С. Экспедиция «Арктика-2014»: комплексные геофизические исследования в районе Северного полюса // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2015. №2. С. 95–97.
27. Конешов В.Н. Современные методы морской и аэрогравиметрии, созданные с участием ИФЗ-РАН // Земля и Вселенная. 2018. №6. С. 13–20.
28. Атаков А.И., Локшин Б.С., Прудников А.Н., Шкатов М.Ю. Результаты комплексной геофизической съемки на Ушаковско-новоземельской площади Карского моря // Материалы международного симпозиума «Наземная, морская и аэрогравиметрия». 2010. С. 33–35.
29. Lygin, V.A., Gravity Surveys in Transition Zones with the Use of Hovercraft, *Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010)*, 2011, pp. 47–49.
30. Соколов А.В., Краснов А.А., Железняк Л.К. Методы повышения точности морского гравиметра // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №2 (105) С. 70–81.
31. Кошаев Д.А., Моторин А.В., Степанов О.А. Анализ эффективности использования спутниковых измерений при определении аномалий силы тяжести на море // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2019. С. 282–287.
32. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. Пешехонов В.Г., Степанов О.А. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
33. Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Usov, S.V., The results of regional airborne gravimetric surveys with a Chekan-AM gravimeter in the Arctic, *Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010)*, 2011, pp. 27–32.
34. Forsberg, R., Olesen, A., Ferraccioli, F., Jordan, T., Matsuoka, K., Zakrajsek, A., Ghidella, M., Greenbaum, J., Exploring the Recovery Lakes region and interior Dronning Maud Land, East Antarctica, with airborne gravity, magnetic and radar measurements, Geological Society, London, Special Publications, 20 September 2017, 461, 23–34.
35. Forsberg, R., Olesen, A., Einarsson, I., Manandhar, N., Shreshta, K., Geoid of Nepal from Airborne Gravity Survey, *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. International Association of Geodesy Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, vol. 139.
36. Barthelmes, F., Petrovic, H., Pflug First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2013, pp. 18–19.
37. Barzaghi, R., Albertella, A., Carrion, D., Barthelmes, F., Petrovic, S., Scheinert, M., Testing Airborne Gravity Data in the Large-Scale Area of Italy and Adjacent Seas., *IGFS 2014. International Association of Geodesy Symposia*, 2015, vol. 144.
38. Lu, B., Barthelmes, F., Petrovic, S., Forste, C., Flechtner, F., Luo, Z., He, K., Li, M., Airborne gravimetry of GEOHALO mission: data processing and gravity field modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122, 10, 586–10, 604.
39. Малеев П.И., Капустин И.В. Средства навигации стратегических подводных лодок зарубежных стран // Материалы VI научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» НО-2007. СПб.: ГНИНГИ, 2007. С. 132–139.
40. Соколов А.В., Степанов О.А., Торопов А.Б., Носов А.С. Решение задачи навигационных определений морских подвижных объектов по гравитационному полю // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов научно-технической конференции. 2017. С. 12–14.
41. Железняк Л.К., Марков Г.С., Романишин П.А. Опыт-производственная гравиметрическая съемка на Чрном море // Гравиинерциальные исследования. М.: ИФЗ АН СССР, 1983.

Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg), Zheleznyak, L.K. (Schmidt Institute of Physics of the Earth (Russian Academy of Sciences), Moscow), Bereza, A.D., Krasnov, A.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg)
 Contribution of Navigation Technologies to Mobile Gravimeter Development, *Гироскопия и Навигация*, 2019, vol. 27, no. 4 (107), pp. 162–180.

Abstract. The paper presents the basic steps of developing gravimeters for measuring gravity from the mobile vehicle board; the gravimeters are designed by CSRI Elektropribor. Technical solutions are described, which allowed high accuracy of measurements to be achieved. The authors discuss the topical spheres of mobile gravimeter application.

Key words: gravity, gravimeter (gravity meter), gravity survey.

REFERENCES

1. Veselov, K.E., Static Approach to Gravity Measurement at Sea Using Rotation-Type Elastic System, *Prikladnaya geofizika*, 1956, no. 15.
2. Popov, E.I., Quartz Gravity Meter for Marine Observations, *Proceedings of Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences*, 1959, no. 8.
3. Popov, E.I., *Opredelenie sily tyazhesti na podvizhnom osnovanii s pomoschiyu silno dempfirovannykh gravimetrov* (Determination of the Earth Gravity on a Moving Base Using Heavily Damped Gravimeters), Moscow: Nauka, 1967.
4. Rivkin, S.S., Bereza, A.D., *Giroskopicheskaya stabilizatsiya morskikh gravimetrov* (Gyroscopic Stabilization of Marine Gravity Meters), Moscow: Nauka, 1985, p. 176.
5. Zheleznyak, L.K., Izmailov, Yu.P., Markov, G.S., and Popov, E.I., *Opyt provedeniya ploschadnykh s'yomok morskimi gravimetrami* (Experience of Areal Survey by Marine Gravity Meters), Moscow: Nauka, 1976.
6. Popov, E.I., Zheleznyak, L.K., Bereza, A.D., and Elinson, L.S., Principles of Designing a Marine Automated Gravimeter, *Metrologiya v gravimetrii* (Metrology in Gravimetry), Abstracts of the First Scientific and Technical Conference, Kharkov, KHGNIIM, 1980, pp. 88-90.
7. Zheleznyak, L.K., Popov, E.I., *USG-type Elastic System, Pribory i metody obrabotki graviinertsialnykh izmerenii* (Devices and Methods of Gravity-Inertial Measurement Processing), Moscow, Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences, 1984.
8. Zheleznyak, L.K., Elinson, L.S., Specific Features of Standardizing a Gravimeter with Two Elastic Torsion Systems by Means of Tilting, *Fiziko-tekhnicheskaya gravimetriya* (Physico-Technical Gravimetry), Moscow: Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences, 1982.
9. Antonov, V.I., Bronshtein, I.G., Livshits, E.M., and Elinson, L.S., Studying Errors of Optical-Electronic Converter for Automated Marine Gravimeter, *Metrologiya v gravimetrii* (Metrology in Gravimetry), Abstracts of the Second Scientific and Technical Conference, Kharkov, KHGNIIM, 1984, pp. 86-87.
10. Zheleznyak, L.K., Popov, E.I., Design Principles and Optimal Scheme of Modern Marine Gravimeter, *Fiziko-tekhnicheskaya gravimetriya* (Physico-Technical Gravimetry), Moscow, Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences, 1982.
11. Bereza, A.D., Kostrov, A.V., and Rivkin, S.S., Studying the Filtering Methods in Gravity Measurements, *Fiziko-tekhnicheskaya gravimetriya* (Physico-Technical Gravimetry), Moscow, Nauka, 1982, pp. 61-88.
12. Zheleznyak, L.K., Areal Mapping in Ocean by Various-Type Gravimeters в океане гравиметрами различных типов, *Fizika Zemli*, 1992, no. 3, pp. 50-55.
13. In Memory of Professor L.P. Nesenjuk. Selected works and memoirs, Saint Petersburg, SRC RF Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2010.
14. Rzhetskii, N.N., Sokolov, A.V., Usov, S.V., and Elinson, L.S., Experience in Using Chekan-A Gravimetric System for Offshore Seismic Acquisition Abroad, *Geofizicheskii vestnik*, 1999, no. 12, pp. 8-11.
15. Sokolov, A.V., Usov, S.V., and Elinson, L.S., Experience in Gravity Survey in Conditions of Marine Seismic Operations, *Primenenie graviinertsial'nykh tekhnologii v geofizike*, Saint Petersburg, 2002, pp. 21-32.
16. Berzhitskii, V.N., Ilyin, V.N., Saveliev, E.B., Smoller, Yu.L., Yurist, S.S., Bolotin, Yu.V., Golovan, A.A., Parusnikov, N.A., Popov, G.V., and Chichinadze, M.V., Inertial-Gravimetry System. Development Experience and Flight Test Results, *Primenenie graviinertsial'nykh tekhnologii v geofizike*, Saint Petersburg, 2002, pp. 48-60.
17. Smoller, Yu.L., Yurist, S.S., Fedorova, I.P., Bolotin, Yu.V., Golovan, A.A., Koneshov, V.N., Hewison, W., Richter, T., Greenbaum, J., Young, D., Blankenship, D., Using Airborne Gravimeter GT2A in Polar Areas, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2014, pp. 36-40.

18. Blazhnov, B.A., Nesenjuk, L.P., Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., Elinson, L.S., and Zheleznyak, L.K., Integrated Mobile Gravimetry System. Development and Test Results, *Primenenie gravimertsial'nykh tekhnologii v geofizike*, Saint Petersburg, 2002, pp. 33–44.
19. Blazhnov, B.A., Nesenjuk, L.P., and Elinson, L.S., Peculiarities of Generating Parameters of Vehicle Vertical Motion by Data from Strongly Damped Gravity Meter, *Giroskopiya i navigatsiya*, 1996, no. 4.
20. Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Development and Introduction of Aerogravity Measurement Processing Technique, *Navigation and Motion Control. Proceedings of the 10th Anniversary Conference of Young Scientists*, Ed.: Peshekhonov, V.G., 2008, pp. 193–198.
21. Krasnov, A.A., Teplyashin, A.A., Studying Errors of Airborne Gravimeter Gyrostabilizer, *Navigation and Motion Control. Proceedings of the 10th Anniversary Conference of Young Scientists*, Ed.: Peshekhonov, V.G., 2006, pp. 42–47.
22. Krasnov, A.A., Nesenjuk, L.P., Sokolov, A.V., Stelkens-Kobsch, T.H., and Heyen, R., Test results of the airborne gravimeter, *Proceedings of the International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2007)*, 2008, pp. 73–77.
23. Evstifeev, M.I., Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Staroseltseva I.M., Elinson, L.S., Zheleznyak, L.K., and Koneshov, V.N., New-Generation Gravimetric Sensor, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2014, no. 9, pp. 12–15.
24. Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., The Up-to-Date Mathematical Software Set for Mobile Gravimeter Chekan-AM, *Giroskopiya i navigatsiya*, 2015, no. 2 (89), pp. 118–131.
25. Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., Elinson, L.S., and Krasnov, A.A., A New Air-Sea Gravimeter: Development and Test Results, *Proceedings of the 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2015, pp. 173–179.
26. Kazanin, G.S., Ivanov, G.I., Kazanin, A.S., Vasiliev, A.S., and Makarov, E.S., Expedition “Arctic-2014”: Integrated Geophysical Exploration Near the North Pole, *Scientific and Technical Digest “Vesti gazovoi nauki”*, 2015, no. 2, pp. 95–97.
27. Koneshov, V.N., Modern Methods of Marine and Airborne Gravimetry, Developed in Partnership with the Institute of Physics of the Earth of RAS, *Zemlya i vseennaya*, 2018, no. 6, pp. 13–20.
28. Atakov, A.I., Lokshin, B.S., Prudnikov, A.N., and Shkatov, M.Yu., Results of Integrated Geophysical Survey on the Ushakovsko-Novozemel'skaya Prospective Area in the Kara Sea, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2010, pp. 33–35.
29. Lygin, V.A., Gravity Surveys in Transition Zones with the Use of Hovercraft, *Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010)*, 2011, pp. 47–49.
30. Sokolov, A.V., Krasnov, A.A., and Zheleznyak, L.K., Improving the Accuracy of Marine Gravimeters, *Giroskopiya i navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 70–81.
31. Koshaev, D.A., Motorin, A.V., and Stepanov, O.A., Performance Analysis of the Use of Satellite Measurements in Marine Gravimetry, *Proceedings of the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2019, pp. 282–287.
32. Modern Methods and Means of Measuring the Parameters of the Earth Gravity Field / Ed. Peshekhonov, V.G., Stepanov, O.A., Saint Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2017, p. 390.
33. Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Usov, S.V., The results of regional airborne gravimetric surveys with a Chekan-AM gravimeter in the Arctic, *Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010)*, 2011, pp. 27–32.
34. Forsberg, R., Olesen, A., Ferraccioli, F., Jordan, T., Matsuoka, K., Zakrajsek, A., Ghidella, M., Greenbaum, J., Exploring the Recovery Lakes region and interior Dronning Maud Land, East Antarctica, with airborne gravity, magnetic and radar measurements, *Geological Society*, London, Special Publications, 20 September 2017, 461, 23–34.
35. Forsberg, R., Olesen, A., Einarsson, I., Manandhar, N., Shreshta, K., Geoid of Nepal from Airborne Gravity Survey, *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. International Association of Geodesy Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, vol. 139.
36. Barthelmes, F., Petrovic, H., Pflug First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2013, pp. 18–19.
37. Barzaghi, R., Albertella, A., Carrion, D., Barthelmes, F., Petrovic, S., Scheinert, M., Testing Airborne Gravity Data in the Large-Scale Area of Italy and Adjacent Seas., *IGFS 2014. International Association of Geodesy Symposia*, 2015, vol. 144.

38. Lu, B., Barthelmes, F., Petrovic, S., Forste, C., Flechtner, F., Luo, Z., He, K., Li, M., Airborne gravimetry of GEOHALO mission: data processing and gravity field modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth Solid Earth*, 2017, 122, 10, 586–10, 604.
39. Maleev, P.I., Kapustin, I.V., Navigation Aids for Foreign Strategic Submarines, *Proceedings of the 6th Scientific and Technical Conference "State-of-the-Art and Problems of Navigation and Oceanography NO-2007"*, Saint Petersburg: ГНИНГИ (GNINGI), 2007, pp. 132–139.
40. Sokolov, A.V., Stepanov, O.A., Toropov, A.B., and Nosov, A.S., Solving the Problem of Navigation Sighting of Marine Vehicles by Gravity Field, *Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespechenie* (Navigation in the Earth Gravity Field and its Metrological Support). Abstracts of Papers of Scientific and Technical Conference, 2017, pp. 12–14.
41. Zheleznyak, L.K., Markov, G.S. and Romanishin, P.A., *Experimental production gravimetric survey in the Black Sea, in Graviinertsial'nye issledovaniya* (Graviinertial Studies), Moscow: IFZ Akad. Nauk SSSR, 1983, pp. 35–42.

Материал поступил 08.10.2019