

А.А.КРАСНОВ, А.В.СОКОЛОВ, Л.С.ЭЛИНСОН

НОВЫЙ АЭРОМОРСКОЙ ГРАВИМЕТР СЕРИИ «ЧЕКАН»

Представлен новый аэроморской гравиметр серии «Чекан», являющийся развитием гравиметрических комплексов, создаваемых в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Описывается усовершенствованная конструкция гравиметрического датчика и системы гироскопической стабилизации гравиметра. Обсуждаются особенности построения комплекса, в котором впервые все периферийные устройства включены в состав центрального гироскопического прибора. Описывается программное обеспечение для работы в реальном времени, а также программа камеральной обработки гравиметрических данных. Представлены результаты всесторонних испытаний опытного образца гравиметра, показавшие значительный выигрыш в точности по сравнению с предшествующим аналогом.

Введение

Мобильный гравиметр «Чекан-АМ», разработанный ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в 2001 г., активно используется российскими и зарубежными геофизическими компаниями в целях поиска нефтегазоносных структур [1-10]. В настоящее время в эксплуатации находится около 40 образцов гравиметров «Чекан-АМ», обеспечивающих выполнение с высокой точностью детальных морских гравиметрических и региональных аэрогравиметрических съемок. Накопленный многолетний опыт эксплуатации гравиметров, позволил выработать пути дальнейшей модернизации комплекса, которая была выполнена в период 2011–2013 гг., и в результате которой был создан новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» (модель «Шельф»).

При разработке нового гравиметра «Шельф» была поставлена задача прежде всего повысить инструментальную точность гравиметрического датчика за счет разработки новой конструкции кварцевого чувствительного элемента, оптико-электронного преобразователя и системы термостабилизации. Существенной задачей являлось сокращение энергопотребления комплекса за счет отказа от системы термостабилизации гироплатформы гравиметра. Кроме того, в связи с частыми перестановками гравиметров с одного носителя на другой требовалось сократить количество периферийных устройств комплекса и максимально упростить работу оператора с аппаратурой. Для повышения качества гравиметри-

Краснов Антон Алексеевич. Начальник сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург.

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

Элинсон Леон Соломонович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях», 2013 г.

ческих данных требовалось модернизировать программное обеспечение сбора информации в реальном времени и ввести в состав комплекса программное обеспечение оперативного контроля и камеральной обработки результатов измерений.

Гравиметрический датчик

Во всех созданных в ЦНИИ «Электроприбор» гравиметрических комплексах в качестве чувствительного элемента используются различные модификации двойной кварцевой упругой системы гравиметра (УСГ) крутильного типа, разработанной Институтом физики Земли РАН [11]. Схема построения нового гравиметрического датчика (ГД) приведена на рис. 1.

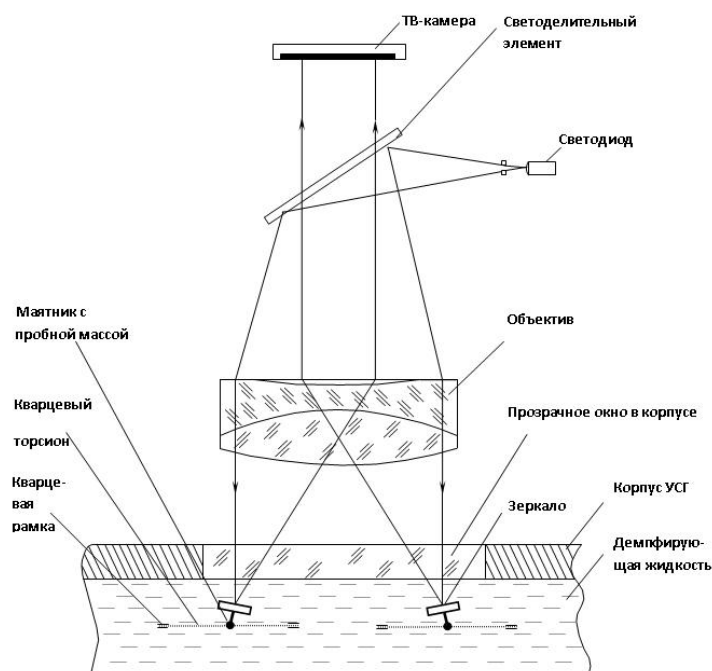


Рис. 1. Схема построения гравиметрического датчика

Выходной величиной УСГ является угол φ поворота рычага маятника, который изменяется с приращением силы тяжести Δg в соответствии с выражением:

$$\Delta\varphi = K \cdot \Delta g,$$

где K – чувствительность упругой системы, которая в зависимости от жесткости торсиона может быть в пределах от 0,3 "/мГал до 1,5 "/мГал.

Как и ранее, УСГ состоит из двух крутильных систем из особо чистого кварцевого стекла, размещенных в одном корпусе. Системы развернуты в горизонтальной плоскости на 180° относительно друг друга. Корпус УСГ заполнен кремнийорганической жидкостью, которая обеспечивает демпфирование системы, термокомпенсацию и бароизоляцию. Кварцевое стекло, как материал, обладает рядом достоинств: технологично в обработке, при деформации соответствует закону Гука вплоть до разрушения, имеет положительный термоэластичный коэффициент, что позволяет простыми конструктивными способами выполнить термокомпенсацию. Упругая система гравиметра является цельносварной и не имеет регулировочных элементов, благодаря чему существенно повы-

шена ее надежность. Усовершенствованная технология изготовления УСГ обеспечивает высокую степень идентичности кварцевых систем как по чувствительности K , так и по демпфированию. Это обеспечивает практически полное исключение погрешности за кросс-каплинг эффект, которая обусловлена взаимным влиянием вертикальных и горизонтальных ускорений.

При разработке новой УСГ ее габариты были снижены в 1,5 раза по сравнению с УСГ, используемой в гравиметре «Чекан-АМ», при этом существенно уменьшены размеры кварцевых рамок, торсионов, маятников и других элементов кварцевой системы. В целях расширения диапазона возмущающих ускорений для демпфирования колебаний маятников в новой УСГ была подобрана полиметилсилоксановая жидкость с коэффициентом вязкости 65000 сантипуаз, что более чем в 3 раза выше вязкости жидкости, применяемой в чувствительном элементе гравиметра «Чекан-АМ» [12-13].

Съем информации об угловом положении маятников УСГ выполняется с помощью оптико-электронного преобразователя (ОЭП), работающего в автоколлимационном режиме [14–16]. В новом ОЭП в качестве фотоприемника используется специализированная 5-мегапиксельная черно-белая КМОП-матрица. Для снижения габаритов ГД фокусное расстояние объектива нового ОЭП было уменьшено в два раза по сравнению с ОЭП гравиметра «Чекан-АМ», но это не привело к ухудшению разрешающей способности автоколлиматора, так как размер элемента разложения (пиксела) примененной КМОП-матрицы в три раза меньше размера пиксела ранее используемой ПЗС-линейки.

Общий вид нового гравиметрического датчика приведен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид гравиметрического датчика

Принципиально важной особенностью конструкции нового ГД по сравнению со всеми предшествующими аналогами является размещение УСГ с ОЭП в едином термостате. Это позволило многократно снизить влияние изменения температуры окружающей среды на показания гравиметра. Вторым важным преимуществом конструкции нового термостата является существенное понижение температуры термостатирования чувствительного элемента с 32 до 15 °С, что привело к уменьшению в несколько раз дрейфа нуля-пункта нового гравиметра по сравнению с гравиметром «Чекан-АМ». Кроме того, при проектировании новых УСГ и ОЭП было впервые предусмотрено их жесткое совместное крепление без каких-либо дополнительных регулировочных элементов, благодаря чему значительно упростился процесс сборки и юстировки ГД, а также повысилась долговременная стабильность положения оси чувствительности гравиметра.

Гиростабилизатор гравиметра

Система гироскопической стабилизации предназначена для удержания оси чувствительности гравиметрического датчика в вертикальном направлении, (т.е. по линии отвеса) с минимальными погрешностями [17].

Гиростабилизатор (ГС) представляет собой двухосный карданов подвес, на внутреннем кольце которого установлены: гравиметрический датчик, два двухстепенных поплавковых гироскопа, два акселерометра со встроенной электроникой и азимутальный волоконно-оптический гироскоп. Слежение колец подвеса ГС за положением осей вращения гироскопов обеспечивает двухканальная безредукторная гироскопическая следящая система. В каждом из двух идентичных каналов следящей системы по сигналу с датчика угла гироскопа формируется с помощью микроконтроллера управление на моментный двигатель, установленный на соответствующей оси гиростабилизатора.

Приведение осей вращения гироскопов в плоскость горизонта производится по сигналам с акселерометров, которые поступают на микроконтроллеры, управляющие прецессионным движением гироскопов. В микроконтроллерах реализована схема коррекции гировертикали с возможностью использования внешней информации по скорости, курсу и координатам для исключения ошибок, вызванных маневрированием носителя [18–20].

Существенные изменения претерпела конструкция гироплатформы. Все ее чувствительные элементы, а также микроконтроллеры, управляющие движением гироскопов, конструктивно скомпонованы на едином кронштейне. Обеспечена простота и удобство снятия и установки гироскопического модуля на внутреннее кольцо гироплатформы. Внешний вид гироскопического модуля приведен на рис.3.



Рис. 3 Внешний вид гироскопического модуля

Микроконтроллеры управления безредукторной следящей системой перенесены в основание гироплатформы. Это позволило увеличить в 1,5 раза угол про качки внутреннего кольца гироплатформы, что практически снимает ограничение на величину угла тангажа самолета при взлете [21]. Усовершенствование конструкции гравиметрического датчика позволило отказаться от контура термостатирования гироплатформы, что снизило общее энергопотребление комплекса в 3 раза по сравнению с предыдущим аналогом.

В основании гироплатформы размещен микроконтроллер МК-БПР, который выполняет объединение данных от гравиметрического датчика, системы термостабилизации и гироплатформы в единый информационный поток. Данные от микроконтроллера МК-БПР могут быть переданы для регистрации в компьютер как по последовательному интерфейсу RS-232, так и по беспроводному каналу связи на основе технологии Wi-Fi.

Программное обеспечение

Новые программы реального времени и камеральной обработки гравиметрических данных спроектированы на современном уровне, предназначены для работы под управлением операционных систем семейства Windows и не накладывают жестких ограничений на тип компьютера.

Разработанное программное обеспечение сбора данных в реальном времени (рис. 4) предусматривает выполнение всех задач, реализованных в предыдущей версии, включая прием выходных данных гравиметрического датчика и навигационной информации от приемника GPS, предварительную обработку показаний ГД и запись данных на жесткий диск компьютера. Существенным отличием является возможность приема и регистрации выходных данных системы гироскопической стабилизации и системы термостабилизации ГД, которые могут быть использованы при камеральной обработке результатов измерений. Любой из принятых сигналов может быть отображен на экране в графической и цифровой форме.



Рис. 4. Вид экрана программного обеспечения сбора данных в реальном времени

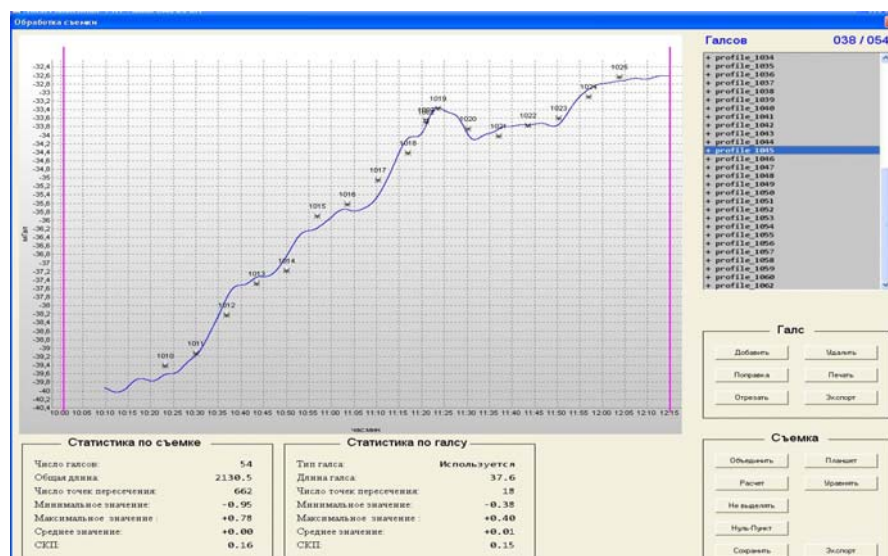


Рис. 5. Вид экрана программного обеспечения постобработки данных

Программа постобработки гравиметрических данных (рис. 5) предусматривает как выполнение оперативной обработки результатов измерений на борту судна или самолета, так и полную камеральную обработку съемки [22, 23].

Программа позволяет выполнять полную обработку результатов измерений – от анализа данных опорных наблюдений до оценки качества измерений по внутренней сходимости и независимому контролю. Обработка съемки производится по галсам, при этом оператор может ввести все необходимые поправки к показаниям гравиметра: за эффект Этвеша, за эффект Гаррисона, за остаточный орбитальный эффект, за неучтенное смещение нуль-пункта гравиметра, за действие приливов. С точки зрения выполнения оперативного контроля результатов измерений, безусловно, полезной является возможность оценки разности результатов измерений на повторных и параллельных галсах.

На каждом этапе результаты вычислений отображаются на графиках и в виде статистической справки. Результаты обработки съемки сохраняются в виде текстовых файлов, пригодных для загрузки в стандартные пакеты анализа геофизических данных.

Результаты испытаний

Для оценки правильности принятых технических решений были проведены расширенные испытания опытного образца нового гравиметра серии «Чекан» (модель «Шельф»).

Оценка инструментальной точности гравиметра выполнялась на стенде вертикальных перемещений. Этот стенд позволяет задавать перемещение подвижной платформы, на которой закреплен гравиметр, с постоянной амплитудой и набором периодов. Стенд имеет систему оптического съема информации о текущем положении подвижной платформы с точностью несколько миллиметров, что позволяет ввести поправку за действие вертикальных ускорений.

На рис. 6 приведены результаты сравнительных испытаний опытного образца нового гравиметра «Шельф» и серийного гравиметра «Чекан-АМ» при воздействии вертикальных ускорений в диапазоне периодов от 14 до 100 с.

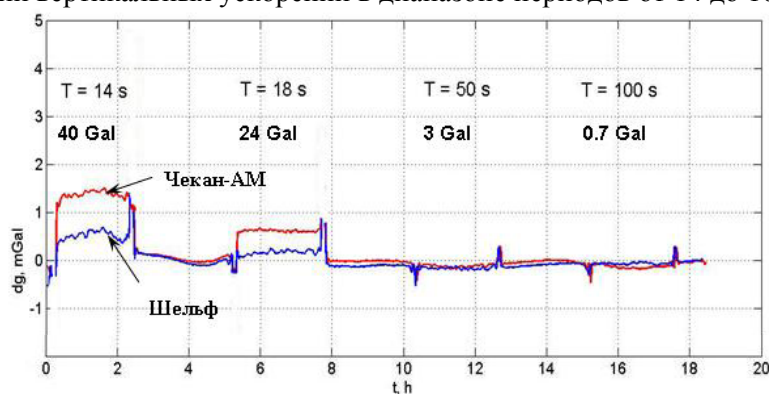


Рис. 6. Результаты испытаний гравиметров на стенде вертикальных перемещений

Приведенные на рис. 6 кривые остаточной погрешности показаний гравиметров получены после ввода поправки за действие вертикальных ускорений, рассчитанной по показаниям стенда, и обработки данных фильтром нижних частот с частотой среза 0,006 Гц. В верхней части рисунка показаны значения амплитуды и периода задаваемых вертикальных ускорений для всех режимов качки. Из экспериментальных данных следует, что среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности гравиметров в широком диапазоне частот вертикальных ускорений не превышает 0,2 мГал. Однако на вы-

соких частотах наблюдается систематическая погрешность, которая для гравиметра «Чекан-АМ» может достигать 1,5 мГал. У опытного образца нового гравиметра данная систематическая погрешность в 3 раза меньше. Снижение систематической погрешности в диапазоне высоких частот вертикальных возмущающих ускорений обусловлено более высокой степенью демпфирования чувствительного элемента гравиметра. При этом повышение степени демпфирования не отражается на итоговой разрешающей способности результатов измерений за счет применения цифрового фильтра восстановления входного сигнала.

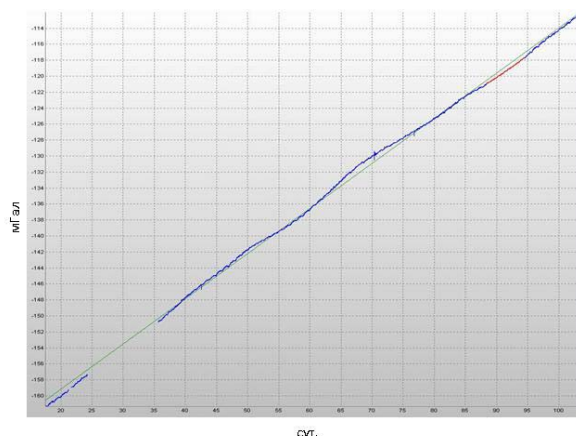


Рис. 7. Кривая скорости смещения нуля-пункта гравиметра

Оценка скорости смещения нуля-пункта гравиметра (рис. 7) выполнялась по практически непрерывным измерениям в течение 3 месяцев и составила за 86 суток $C = 0,56$ мГал/сут.

Полученное начальное значение скорости смещения нуля-пункта гравиметра «Шельф» примерно в 5-7 раз меньше, чем у чувствительных элементов гравиметров «Чекан-АМ». Существенное уменьшение дрейфа гравиметра обусловлено снижением температуры термостатирования УСГ до 15°C. Много-

летний опыт использования кварцевых гравиметров показывает, что дрейф его нуля-пункта постепенно снижается за первые три года в 2-3 раза. В связи с этим можно предположить дальнейшее уменьшение скорости смещения нуля-пункта гравиметра до уровня 5-10 мГал/месяц, что становится близким к величине дрейфа нуля-пункта гравиметра La Coste.

На точность гравиметрических измерений большое влияние оказывает нестабильность температуры кварцевого чувствительного элемента. Статический температурный коэффициент для кварцевых систем, помещенных в демпфирующую жидкость, обычно составляет 3-5 мГал/°C.

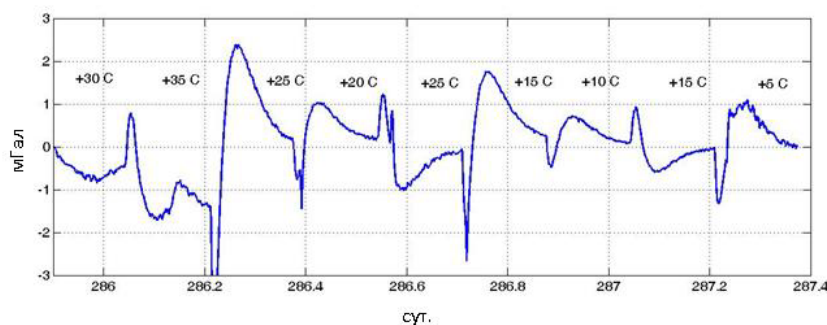


Рис. 8. Кривая показаний гравиметра в термокамере

На рис. 8 приведена кривая показаний опытного образца гравиметра «Шельф» в термокамере при изменении температуры окружающей среды в всем рабочем диапазоне от +5 до +35 °C. Видно, что изменение температуры на 5 °C приводит к переходному процессу амплитудой до 1 мГал и продолжитель-

ностью около 4 ч. Длительность переходного процесса от изменения температуры нового гравиметрического датчика сопоставима с гравиметром «Чекан-АМ», а амплитуда в несколько раз меньше. Кроме того, в установившемся режиме практически полностью отсутствует систематическая составляющая погрешности показаний гравиметра от изменения температуры, что принципиально важно при выполнении аэрогравиметрических измерений, где суточные перепады внешней температуры могут достигать десятков градусов.

Заключение

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» создал новый аэроморской гравиметр «Шельф», представляющий собой развитие гравиметрических комплексов серии «Чекан». Разработана новая конструкция гравиметрического датчика и его составных частей: кварцевого чувствительного элемента, оптико-электронного преобразователя и системы термостатирования. Усовершенствована конструкция гиросtabilизатора в части интеграции в нем всех периферийных устройств, модернизации электроники и повышения ремонтпригодности. Разработано современное программное обеспечение сбора и камеральной обработки гравиметрических данных.

В результате выполненных работ удалось в 2 раза повысить инструментальную точность гравиметра «Шельф», в 5-7 раз снизить дрейф нуля-пункта по сравнению с серийным гравиметром «Чекан-АМ», в 3 раза уменьшить энергопотребление аппаратуры, улучшить ряд эксплуатационных характеристик комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соколов, А.В., Усов, С.В., Элинсон, Л.С.** Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ. В сборнике: Применение гравиметрических технологий в геофизике. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». - 2002. - С. 21-33.
2. **Дробышев, Н.В., Конешов, В.Н., Конешов, И.В., Соловьев, В.Н.** Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. - 2011. - №3. - С.37-50.
3. **Атаков, А.И., Локшин, Б.С., Прудников, А.Н., Шкатов, М.Ю.** Результаты комплексной геофизической съемки на Ушаковско-новоземельской площади Карского моря //Труды международного симпозиума «Наземная, морская и аэрогравиметрия», 2010. С. 33-35.
4. **Лыгин, В.А.** Измерения силы тяжести в транзитных зонах с использованием судна на воздушной подушке. Труды международного симпозиума: Наземная, морская и аэрогравиметрия. 2010. С. 47-49.
5. **Forsberg, R., Olesen, A., Einarsson, I.** Airborne Gravimetry for Geoid Determination with Lacoste Romberg and Chekan-AM Gravimeters // Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013. - С. 10.
6. **Barthelmes, F., Petrovic, S., Pflug, H.** First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM. // Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013- С. 18-19.
7. **Kovrizhnykh, P.N., Shagirov, B.B., Yurist, S.Sh., Bolotin, Yu.V.** Marine Gravity Survey at the Caspian with GT-2M, Chekan AM and L&R Gravimeters: Comparison of Accuracy.
8. **Krasnov, A.A., Nesenjuk, L.P., Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., Elinson, L.S.** Integrated Marine Gravimetric System. Development and Operation Results // Gyroscopy and Navigation. - 2011. Т. 2. - № 2. - С. 75-81.
9. **Краснов, А.А., Соколов, А.В.** Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Труды Института прикладной астрономии РАН. - 2009. - № 20. - С. 353-357.
10. **Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Usov, S.V.** Modern Equipment and Methods for Gravity Investigation in Hard-to-Reach Regions // Gyroscopy and Navigation. - 2011. Т. 2. - № 3. - С. 178-183.

11. Железняк, Л.К., Попов, Е.И. Новая упругая система морского гравиметра. Гравиинерциальная аппаратура в геофизических исследованиях. М.: ИФЗ АН СССР.1988.
12. Железняк, Л.К. Точность измерений гравиметрическим комплексом «Чекан-АМ» в море. Физика Земли. 2010. № 11. С. 95-98.
13. Железняк, Л.К., Краснов, А.А., Соколов, А.В. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра "Чекан-АМ". Физика Земли. 2010. № 7. С. 29-32.
14. Бронштейн, И.Г., Лившиц, И.Л., Элинсон, Л.С., Герасимова, Н.Л., Соколов, А.В. Кварцевый гравиметр. Патент на изобретение RU 2171481 C1, 03.02.2000.
15. Элинсон, Л.С., Соколов, А.В., Вавилов, А.В., Бронштейн, И.Г., Цыцулин, А.К., Умников Д.В. Устройство и способ измерения силы тяжести. Патент на изобретение RU 2198414 04.03.2002.
16. Соколов, А.В., Старосельцева, И.М., Элинсон, Л.С. Устройство измерения силы тяжести. Патент на изобретение RU 2377611 22.04.2008.
17. Пантелеев, В.Л. Основы морской гравиметрии. – М.: Недра, 1983.
18. Челпанов, И.Б., Несенюк, Л.П., Брагинский, М.В. Расчет характеристик навигационных приборов. – Л.: Судостроение, 1978.
19. Краснов, А.А., Одинцов, А.А., Семенов, И.В. Система гироскопической стабилизации гравиметра // Гироскопия и навигация 2009– № 4 – С. 54-69.
20. Sokolov, A.V. High Accuracy Airborne Gravity Measurements. Methods and Equipment. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) Iss. Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 2011. - С. 1889-1891.
21. Krasnov, A.A., Nesenyuk, L.P., Sokolov, A.V., Stelkens-Kobsch, T.H., Heyen, R. Test Results of the Airborne Gravimeter. // Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор».– 2007.- Рр.73-78.
22. Краснов, А.А., Соколов, А.В. Разработка и внедрение методики обработки аэрогравиметрических измерений. Навигация и управление движением // Материалы X КМУ «Навигация и управление движением» - СПб.: ЦНИИ «Электронприбор». -2009. - С.193-138.
23. Краснов, А.А., Соколов, А.В. Методика и программное обеспечение камеральной обработки аэрогравиметрических измерений // Труды Института прикладной астрономии РАН. - 2013. - № 27. - С. 442-445.

Abstract. A new air-sea gravimeter, the next-generation successor to the Chekan gravimetric systems designed at Concern CSRI Elektropribor, JSC, is presented in this paper. The advanced constructions of the gravity sensor and gyro stabilization system of the gravimeter are considered. The design features of the new system are discussed: it is for the first time that all peripherals are included in the gyrostabilizer. The real-time program and postprocessing software are described. Comprehensive tests of the prototype gravimeter have shown a significant gain in accuracy as compared with the predecessor. The test results are presented.

Key words: new air-sea gravimeter, Chekan, gravity sensor and gyro stabilization system