

4. Russian gravimetric geoid-2000. – Режим доступа: <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/gps/rgg/html>.
5. Szelachowska, M. GDQM-PL13 – the new gravimetric quasigeoid model for Poland / M. Szelachowska, J. Kryński // Geoinformation Issues. – 2014. – Vol. 6. – № 1 (6). – P. 5–19.
6. Kiamehr, R. The new quasi-geoid model IRQG09 for Iran / R. Kiamehr // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 73. – Issue 1. – P. 65–73.
7. Мориц, Г. Современная физическая геодезия / Г. Мориц ; пер. с англ. – М. : Недра, 1983. – 392 с.
8. Komarov, R.V. Geoid Determination by GPS/Levelling Method in the Republic of Tatarstan / R.V. Komarov, R.A. Kascheev, R.V. Zagretdinov // Georesources. – 2007. – 2(10). – P. 43–45.
9. Сидоренко, А.И. Некоторые результаты применения модели геоида EGM2008 в сопоставлении с другими моделями / А.И. Сидоренко // Земля и недвижимость Сибири. – 2009. – 5 (19). – С. 31–33.

THE CURRENT STATE OF DIGITAL GEOID MODEL IN CONTINENTAL AREAS

B. NEPOKLONOV, M. ABAKUSHINA

The current state of work in the field of regional and national digital geoid models in the areas of land from gravity data presented. Four regional models of the continental scale (Europe, Africa, South America, Australia) and similar national models for the territory of Russia and foreign countries with quite large size (US, Canada, Mexico, China, Mongolia, Kazakhstan, Iran, Ukraine, Poland) considered. Basic methods of creation and validation of these models are described. Their resolution and accuracy characteristics compared. Priorities for improvement of the geoid models in Russia are marked.

Keywords: *Earth's gravitational field, the height of the geoid, model, the gravimetric data, satellite (GPS) leveling, accuracy characteristics.*

УДК 528.56, 550.831

СОВРЕМЕННАЯ МОРСКАЯ ГРАВИМЕТРИЯ²

д-р техн. наук Л.К. ЖЕЛЕЗНЯК, В.Н. СОЛОВЬЕВ, П.С. МИХАЙЛОВ
(Институт физики Земли РАН, Россия)

Рассмотрены основные принципы выполнения гравиметрических измерений на море, построения гравиметрической аппаратуры, особенно-

² Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант №16-35-00434).

сти ее применения, представлены некоторые результаты, обозначены пути дальнейшего развития морской гравиметрии.

Ключевые слова: сила тяжести, гравитационное поле Земли, гравиметр, морская гравиметрия.

Знание гравитационного поля Земли позволяет решать ряд задач фундаментальной науки, практической геолого-геофизической разведки, задачи обороны государства и освоения космоса.

Первоначальной и основной задачей определения гравитационного поля было расширение знаний о фигуре и глубинном строении Земли. По гравиметрическим данным, задолго до появления искусственных спутников, с большой точностью было определено сжатие Земли. Форма геоида была определена по вычисленным значениям его отклонений от эллипсоида и величинам уклонения отвеса в тех районах мира, где проведены гравиметрические наблюдения. Это позволило впервые построить карты превышений геоида над земным эллипсоидом.

Интерпретация гравитационного поля позволяет выявлять плотностные неоднородности и геологические структуры, а также тектонические нарушения, скрытые осадочными породами; определять и оценивать районы, перспективные для поиска различных полезных ископаемых, в первую очередь – углеводородных. Карты аномалий силы тяжести используются для разведки и непосредственного оконтуривания месторождений полезных ископаемых.

Аномалии силы тяжести необходимо учитывать при расчете траекторий движения космических аппаратов, при пусках и расчетах полетов баллистических ракет; при уточнении и коррекции координат в инерциальных навигационных системах. Последняя задача связана с необходимостью определения силы тяжести непосредственно в процессе измерения.

Возможности использования гравитационного поля Земли как источника информации определяются точностью его измерения и расширяются с ее повышением. Необходимая точность измерений определяется характером решаемой задачи. Появление искусственных спутников Земли позволило определить высоту геоида на акваториях Мирового океана и, по превышениям которого над эллипсоидом относимости, вычислять аномалии силы тяжести и строить карту масштаба 1 : 1 000 000 с сечением изоаномал до 5–10 мГал.

В настоящее время спутниковая альтиметрия решает глобальные задачи изучения гравитационного поля, то есть фактически в современной гравиметрии реализуется принцип «от общего к частному»: определяются кон-

кретные регионы, где затем, если есть дополнительная необходимость, выполняются высокоточные морские или аэрогравиметрические измерения.

Современные морские гравиметрические измерения выполняются с точностью до 0.1–0.2 мГала, то есть до седьмого знака, 10^{-7} . Это непростая задача усложняется возникновением ряда помех, различных по частоте и диапазону, обусловленных измерениями с подвижного основания.

В силу принципа эквивалентности гравитационной и инерционной масс физически отделить ускорения силы тяжести от инерционных ускорений невозможно (рис. 1). Разделение возможно только по частоте (фильтрация) или с использованием измерений неинерциальными средствами.

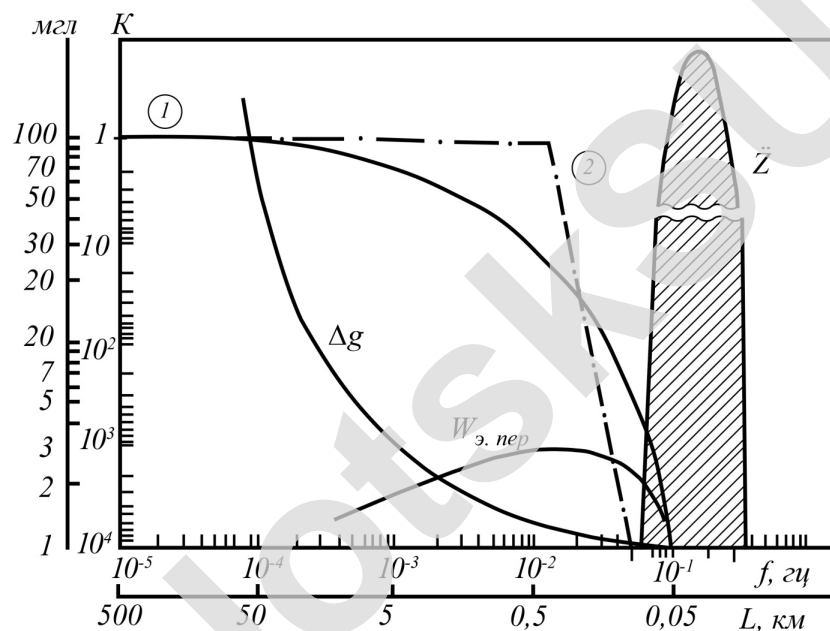


Рис. 1. Частотные характеристики полезного сигнала и помех

Гравитационный полезный сигнал Δg занимает нижнюю полосу частот. Инерционные ускорения качки Z'' , на шесть порядков превышающие полезный сигнал, занимают верхний частотный диапазон. Они легко отделяются идеальным фильтром 2, который отличается от реального 1.

Инерционные ускорения $W_{\text{э. пер}}$ обусловленные движением судна по вращающейся Земле (эффект Этвеша) по частоте значительно перекрываются с полезным сигналом. Для их учета необходимы траекторные измерения вектора скорости с высокой степенью точности. Например, погрешность определения скорости 25 м/час соответствует погрешности силы тяжести 0,1 мГал.

Так как в результате качки судна происходит отклонение оси чувствительности от вертикали, в морской гравиметрический комплекс входит

гиростабилизированная платформа, удерживающая измерительную ось гравиметра в вертикальном положении на качающемся основании. При этом остаточные эффекты от вышеуказанных факторов минимизируются и обуславливаются конструктивными особенностями гиростабилизатора. Они могут быть вычислены и учтены по показаниям акселерометров, так же входящих в гравиметрический комплекс [Железняк, 1987].

Кроме инерционных помех, в выходном сигнале гравиметра присутствуют аппаратные шумы. Они возникают вследствие конструктивных особенностей прибора и несовершенства изготовления его составных частей. К первым относятся орбитальный эффект, дискретность отсчета, нелинейность шкалы, не упругие деформации пружин, а ко вторым – действие различных внешних факторов (изменение температуры, давления, влажности и др.). Аппаратные шумы находятся в том же частотном диапазоне, они тоже разделяются на длинные (вариации орбитального эффекта) и короткие (дискретность считывания отсчетов).

Относительный гравиметр есть пробная масса на упругом подвесе с одной степенью свободы движения. Рычаг с грузом, являющийся пробной массой, удерживается в горизонтальном положении предварительно закрученными нитями, задающими ось его вращения и одну степень свободы (рис. 2). Представленная система изготавливается из кварцевого стекла цельносварной (газовая сварка). При изменении силы тяжести горизонтально расположенный в исходном положении рычаг поворачивается на угол $\Delta\phi$, что является мерой изменения суммы силы тяжести и инерционных ускорений.

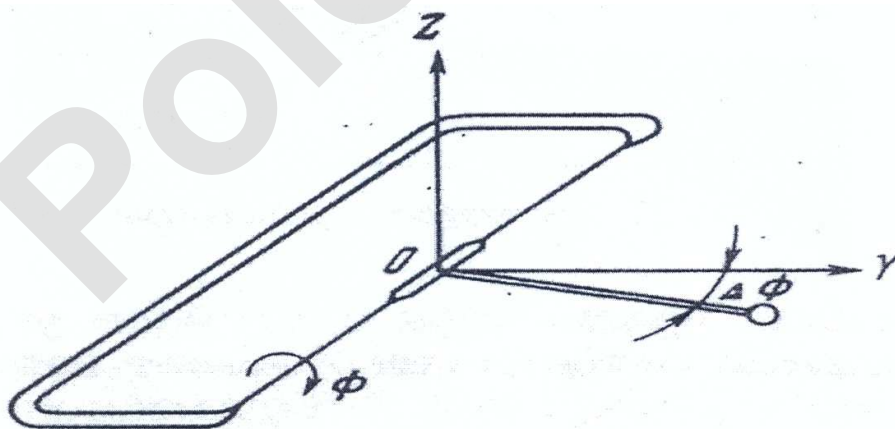


Рис. 2. Схема упругой системы крутильного типа

Однако при такой схеме подвеса пробной массы при определенных условиях возникает постоянная составляющая в погрешности измерений (орбитальный эффект), которая устраняется использованием двойной системы с

зеркальным расположением двух одинарных. При их идентичности по чувствительности и постоянной времени орбитальный эффект исключается.

Двойная упругая система помещена в жидкость для фильтрации вертикальных инерционных ускорений (апериодическое звено), термокомпенсации и бароизоляции.

Вторичным преобразователем углов поворота рычагов является оптико-электронная система на базе автокаллиматора и модулятора, работающего с частотой 6–10 Гц. Помещенная в термостат упругая система вместе с оптико-электронной системой образуют отдельный прибор – чувствительный элемент гравиметра (гравиметрический датчик) [Попов, Железняк, 1982].

К настоящему времени сотрудниками Института физики Земли РАН совместно с ЦНИИ «Электроприбор» разработана линейка гравиметров для измерений с подвижных оснований.

Для каждого поколения гравиметра ИФЗ РАН совершенствовалась упругая система и технология ее изготовления с целью повешения их технических и эксплуатационных характеристик, а концерном ЦНИИ «Электроприбор» – преобразователи, гироскопия, термостабилизация и вычислительная техника [Пешехонов, Железняк и др., 2002].

Одновременно с этим Институтом физики Земли совершенствовались методологические приемы, технологии выполнения морских работ, методики обработки и метрологическое обеспечение [Боярский, Железняк, 1987], [Железняк, 2002].

Углы поворота рычагов упругой системы преобразуются оптико-электронным устройством, выполненным на базе ПЗС-матрицы, в цифровой код – пиксели, поступающие на приборный компьютер для дальнейшей обработки. В реальном времени показания гравиметра пересчитываются к мГалам по формуле:

$$Gr = b(m - m_0) + a(m - m_0)^2, \quad (1)$$

где m – цифровой текущий отсчет, равный сумме отсчетов m_1 и m_2 по каждой из систем в пикселях;

m_0 – такой же отсчет при горизонтальном положении рычагов кварцевых систем в пикселях;

b , a – линейный и квадратичный коэффициенты градуировочной характеристики.

После фильтрации штатным фильтром, реализованным в приборном компьютере, показания выводятся на экран для визуального контроля. В то же время регистрируются отсчеты в пикселях по каждой системы, время,

горизонтальные ускорения по осям, температура статирования и дополнительную информацию с частотой 10 Гц. Одновременно с работой гравиметра регистрируются координаты с частотой 1 Гц и глубины.

Дальнейшая обработка гравиметрических измерений выполняется апостериорно. По формуле (1) вычисляются показания гравиметра.

Действие горизонтальных ускорений приводит к малым отклонениям измерительной оси от вертикали, в результате чего на ось проектируется составляющая горизонтальных ускорений вместе с полезным сигналом. По данным акселерометров и с учетом характеристик гироплатформы вычисляются компенсирующие поправки за совместное действие горизонтальных ускорений и наклонов, которые фильтруются апериодическим фильтром с постоянной времени упругой системы и далее суммируются с ранее вычисленными показаниями прибора.

На этом же этапе производится вычисление поправки Этвеша по формуле (2), которая фильтруется апериодическим фильтром с постоянной времени упругой системы и суммируются с ранее вычисленными показаниями прибора.

$$g_{\text{Э}} = 7.5 \cos^2 \phi (\Delta\lambda / \Delta t) + 0.0041 (\Delta\phi^2 + (\Delta\lambda \cos \phi)^2) / \Delta t^2. \quad (2)$$

Изменение курса и скорости влияет на значения эффекта Этвеша, который меняется с амплитудой около 2–3 мГал за период до 20 минут, при этом на меридиональных и субмеридиональных галсах преобладает влияние курсовых вариаций, а субширотных галсах более заметно влияние вариации скорости. Так как частотными методами такая помеха не отделяется, она исключается путем ввода в измерения соответствующей поправки. Поскольку судовые компас и лаг имеют большую погрешность, они не подходят для вычисления поправки Этвеша. Эта погрешность обусловлена ветровым сносом и течениями, которые не учитываются судовыми системами. Путевой угол и скорость определяются непосредственно по наблюдениям, то есть по независимым от судовых систем определениям местоположения судна на поверхности Земли. Наиболее удобно использовать данные космических навигационных систем, так как они отличаются высокой точностью и непрерывностью позиционирования.

Таким образом, приращение силы тяжести между морским и исходным пунктом вычисляется по формуле (3):

$$\Delta G = G_r - G_{r0} - C(T - T_0) + g_{\text{Э}} + g_{xy}. \quad (3)$$

Показания гравиметра, полученные в мГал, фильтруются. Фильтрация данных – это принципиальное условие обработки данных гравиметри-

ческих измерений. Для эффективного подавления ускорений качки целесообразно применять многозвенные фильтры, хотя они увеличивают длительность переходного процесса.

Сильно демпфированная упругая система гравиметра является только первым фильтром. Он подавляет помеху в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой и соответственно искажает полезный сигнал и его фазу в зависимости от частоты последнего. Дополнительные фильтры более высокого порядка эффективнее подавляют помехи, однако могут иметь резонансную частоту, на которой помехи усиливаются. Кроме того, при слабом затухании из-за случайных возбуждений на сигнал могут накладываться собственные колебания. Для разделения сигнала и помехи выбирается такой фильтр, который наилучшим образом подавлял помеху и менее всего искажал бы полезный с учетом фона возмущающих ускорений. В этом случае измерения будут проведены с наименьшей погрешностью.

Алгоритмы для дальнейшей обработки материалов измерений общеприняты. Аномалия силы тяжести в свободном воздухе вычисляется по формуле (4):

$$\Delta g_a = G_0 + \Delta G - \gamma, \quad (4)$$

где G_0 – абсолютное значение на начальном опорном гравиметрическом пункте в порту выхода судна;

γ – нормальное значение силы тяжести (тип формулы нормального поля задается в файле параметров: формула Гельмерта-14 или международная формула 1980 г.).

Для вычисления аномалии Буге необходимо знать рельеф дна в некоторой окрестности от пункта измерений. В простейшем случае, когда измеряется глубина моря вдоль профиля и учитывается только притяжение плоско – параллельного слоя, она вычисляется по формуле (5):

$$\Delta g_B = g_a + 0.0419H(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (5)$$

где H – глубина моря в метрах;

σ_1 и σ_2 – соответственно плотность пород, слагающих дно, устанавливается в файле параметров (2.67, 2.30 или иная г/см³) и плотность морской воды 1.03 г/см³.

Результаты обработки выводятся в выходной файл – каталог гравиметрических пунктов (МВФ-05). Этот простой символьный колоночный формат используется в специализированных программах для оценки погрешностей гравиметрической съемки и ее уравнивания. Он может использоваться также во многих универсальных программах, например Excel, Grapher, Surfer и т.д.,

с целью редактирования данных, редактирования данных построения графиков, вычисления сетей данных (гридов) для построения изолиний.

Схема постобработки представлена на рисунке 3. Обработка начинается с проверки и редактирования исходных файлов для каждого съемочного галса.

Для работы программы обработке по представленной схеме необходим файл параметров, в котором записываются коэффициенты градуированной характеристики, скорость смещения нуля-пункта, постоянная времени упругой системы, время начала измерений, начальный отсчет гравиметра, характеристики фильтра, значение силы тяжести на опорном пункте и т.д.

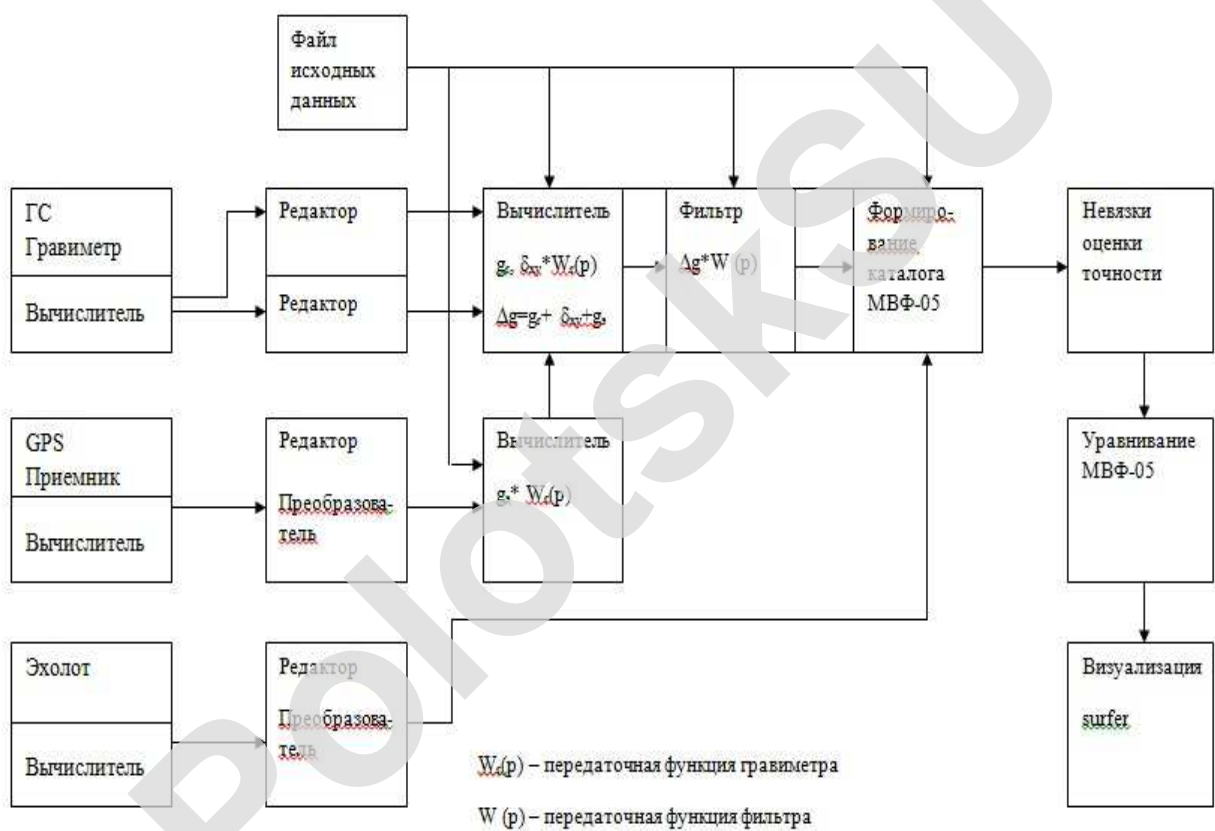


Рис. 3. Схема обработки измерений силы тяжести на борту

В процессе совершенствования аппаратуры, методики и технологии был выполнен ряд характерных полигонов.

В 1992 году комплексом из 2 приборов «Чета АГГ» в Атлантическом океане на площади 100 на 200 километров по сети 5 на 10 км выполнена съемка разлома Кейн. Точность измерений составила 0.7 мГал и построена карта с сечением изоаномал – 2 мГал. При этом впервые использовалась космическая навигационная система глобального позиционирования. Перепад значений аномалий силы тяжести составил 150 мГал.

В 1994 году комплексом «Чета АГГ» в Баренцевом море снят полигон над нефтегазовым месторождением «Приразломное», с наивысшей на тот момент точностью измерений – 0.07 мГал. Построена карта с сечением изоаномал – 0.25 мГал. Для позиционирования использовался спутниковый дифференциальный метод.

В 2012 году комплексом «Чекан АМ» в Индийском океане выполнены измерения в условиях запредельных возмущающих ускорений (ср. кв. значение более 100 Гал). При этом выполнение работ не прерывалось. Погрешность измерений составила 0.7 мГал. Для позиционирования судна использовался современный спутниковый комплекс с точностью позиционирования до 0.5–2 метра.

В 2014 году с использованием комплекса «Чекан АМ» был выполнен уникальный эксперимент по проверке вертикального градиента силы тяжести в водной среде. На участке абиссальной равнины с пологим плоским дном и с малым горизонтальным градиентом, обусловленным только нормальным гравитационным полем Земли, на глубине 1500 метров проведена площадная гравиметрическая съемка полигона на квадратной площадке со стороной 4 мили (7.4 км). Измерения выполнены на 6 профилях. Далее на глубине 800 выполнен секущий галс над первым полигоном.

Теоретическое и измеренное значения вертикального градиента на глубине 1150 метров отличаются менее чем на один процент. Вероятнее всего, по мнению авторов, это отличие связано с погрешностями измерений гравитационного поля или глубины. Различие измеренного и теоретического значений градиента получается при погрешности измерения разности силы тяжести 1.46 мГал или погрешности разности глубин 6.65 метров.

На современном этапе направлениями повышения точности морских гравиметрических измерений, кроме аппаратных, могут быть: использование моделей гравитационного поля Земли и введение поправки за учет Земных приливов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железняк, Л.К. Принципы построения и оптимальная схема современного морского гравиметра / Л.К. Железняк, Е.И. Попов // Физико-техническая гравиметрия. – М. : ИФЗ АН СССР, 1982.
2. Железняк, Л.К. Новая упругая система морского гравиметра / Л.К. Железняк, Е.И. Попов // Гравиинерциальная аппаратура в геофизических исследованиях. – М. : ИФЗ АН СССР, 1988.
3. Интегрированный мобильный гравиметрический комплекс. Результаты разработки и испытаний / Блажнов Б.А. [и др.] // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. статей и докладов / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» ; под ред. В.Г. Пешехонова. – СПб., 2002. – С. 33–44.
4. Железняк, Л.К. Уравнение крупномасштабных геофизических съемок / Л.К. Железняк // Физика Земли. – 2002. – № 3. – С. 45–47.

5. Железняк, Л.К. Методические приемы повышения точности съемки морскими гравиметрами гравиметрии / Л.К. Железняк, Э.А. Боярский // Приборы и методы комплексных гравиинерциальных исследований. – М. : ИФЗ АН СССР, 1987.
6. Железняк, Л.К. Российский морской гравиметрический комплекс / Л.К. Железняк // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. статей и докладов / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» ; под ред. В.Г. Пешехонова. – СПб., 2002. – С.14-20.
7. Железняк, Л.К. Борьба с низкочастотными помехами в морской гравиметрии / Л.К. Железняк // Приборы и методы комплексных гравиинерциальных исследований. – М. : ИФЗ АН СССР, 1987.

MODERN MARINE GRAVIMETRY

L. ZHELEZNYAK, V. SOLOVYEV, P. MIKHAILOV

The article describes the basic principles of performing gravity measurements at sea, construction of a gravimetric equipment, specifics of their application, presented some of the results, the ways of further development of the marine gravity.

Keywords: *gravity, the gravitational field of the Earth, gravity meter, marine gravimetry.*

УДК 550.831

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ³

д-р геол.-минерал. наук С.Г. БЫЧКОВ,

д-р физ.-мат. наук А.С. ДОЛГАЛЬ

(Горный институт Уральского отделения РАН, Россия);

д-р техн. наук В.И. КОСТИЦЫН

(Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия);

канд. техн. наук А.А. СИМАНОВ, В.В. ХОХЛОВА

(Горный институт Уральского отделения РАН, Россия)

Показано, что возможности гравиметрии на современном этапе вступают в противоречие с существующими инструктивными требованиями к ее проведению. Предлагается использование новых процедур редуцирования гравиметрических данных, учитывающих современные данные о фигуре Земли. На конкретном примере обработки данных гравиметрической съемки на территории Пермского края показано, что применение современных процедур обработки позволяет повысить информативность гравиметрических данных.

³ Работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН №15-18-5-23 и гранта РФФИ №16-45-590426.