

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ, Л. К. ЖЕЛЕЗНЯК

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МОРСКОГО ГРАВИМЕТРА

Рассматриваются программно-аппаратные способы компенсации динамических погрешностей морских гравиметров, обусловленных действием инерционных ускорений. Впервые анализируется и учитывается погрешность, вызванная жидкостным демпфированием чувствительного элемента гравиметра. Приведены некоторые результаты гравиметрических съемок, подтверждающие повышение точности измерений.

Ключевые слова: сила тяжести, гравиметр, гравиметрическая съемка, обработка данных.

Введение

При выполнении измерений силы тяжести с борта подвижных носителей гравиметр регистрирует проекцию удельной внешней силы на его ось чувствительности. Основной проблемой при таких измерениях является то, что силы инерции, порожденные движением носителя, на несколько порядков превосходят аномалии силы тяжести. В морских условиях спектры инерционных и гравитационных ускорений разнесены в частотной области, поэтому для выделения последних эффективно применяются методы цифровой фильтрации данных. При аэрогравиметрических измерениях для компенсации низкочастотных инерционных ускорений используются высокоточные измерения вариаций высоты полета, получаемые с помощью технологий спутниковой навигации.

Оптимальные методы фильтрации морских гравиметрических измерений описаны в [1–7]. Тем не менее в предложенных методах обработки данных не учтены особенности построения гравиметров серии «Чекан», которые в настоящее время активно используются для выполнения морских измерений силы тяжести [8–14]. Основная особенность гравиметров «Чекан» – наличие двойной кварцевой системы крутильного типа с жидкостным демпфированием, для удержания оси чувствительности которой в направлении вертикали используется двухосная гиropлатформа с акселерометрической коррекцией вертикали [15]. Целью настоящей работы является исследование методов повышения точности измерений силы тяжести с использованием гравиметров серии «Чекан» за счет компенсации погрешностей, характерных для указанного типа приборов.

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Краснов Антон Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

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

Статья по докладу на 11-й Российской мультikonференции по проблемам управления, 2018.

Компенсация эффекта Гаррисона

В гравиметрии известен эффект Гаррисона, который возникает из-за проекции горизонтальных ускорений на ось чувствительности гравиметра при наклонах, обусловленных погрешностями стабилизации [16]. Погрешность показаний гравиметра $\delta g_{ГАР}$, обусловленная действием эффекта Гаррисона, может быть представлена в виде

$$\delta g_{ГАР} = W_X \alpha + W_Y \beta, \tag{1}$$

где W_X, W_Y – продольные и поперечные горизонтальные ускорения соответственно, α, β – наклоны оси чувствительности гравиметра из-за погрешностей стабилизации.

Наклон оси чувствительности гравиметра является следствием действия горизонтального ускорения по той же оси стабилизации. При этом фазовый сдвиг между действующими горизонтальными ускорениями и погрешностями стабилизации определяется частотной характеристикой системы акселерометрической коррекции гировертикали. В связи с этим логично рассмотреть эффект их совместного действия на гравиметр с точки зрения корреляционной теории случайных функций. Оба слагаемых формулы (1) имеют одинаковую структуру, поэтому будем рассматривать только одно из них. Систематическая погрешность показаний гравиметра $\Delta \tilde{g}_{ГАР}$ будет равна математическому ожиданию произведения функций $W_Y(t)$ и $\beta(t)$. Предположим, что носитель гравиметра движется прямолинейно, что соответствует характеру движения при выполнении гравиметрической съемки. Поскольку при этом математическое ожидание горизонтальных ускорений и наклонов гравиметра равно нулю, то погрешность $\Delta \tilde{g}_{ГАР}$ можно выразить в виде [17]

$$\Delta \tilde{g}_{ГАР} = k_{W_Y, \beta} \sigma_{W_Y} \sigma_{\beta}, \tag{2}$$

где $\sigma_{W_Y}, \sigma_{\beta}$ – среднеквадратические значения горизонтальных ускорений $W_Y(t)$ и наклонов оси чувствительности $\beta(t)$, $k_{W_Y, \beta}$ – коэффициент корреляции $W_Y(t)$ и $\beta(t)$.

Передаточная функция гировертикали гравиметра «Чекан» по ускорениям имеет вид [18]:

$$H_W^{\beta}(p) = \frac{2T_{ГВ} \cdot p + 1}{g \cdot (T_{ГВ}^3 p^3 + 2T_{ГВ}^2 p^2 + 2T_{ГВ} p + 1)}, \tag{3}$$

где $T_{ГВ}$ – постоянная времени гировертикали.

На рис. 1 приведена фазовая частотная характеристика гировертикали, соответствующая приведенной передаточной функции при $T_{ГВ} = 50$ с.

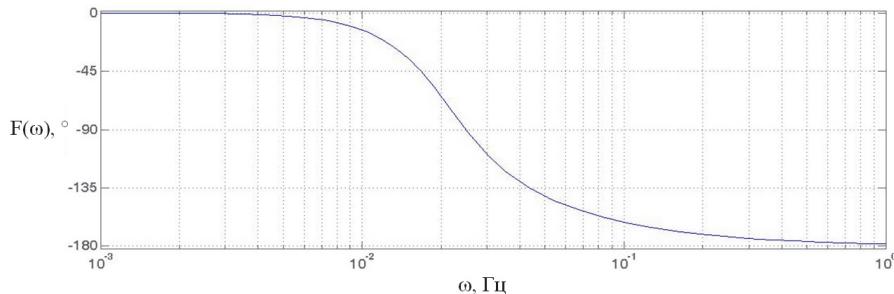


Рис. 1. Фазовая частотная характеристика гировертикали

Видно, что сдвиг фаз между горизонтальными ускорениями и наклонами гиروهоризонтали на основных частотах качки – 0,1-0,2 Гц – близок к 180°, поэтому коэффициент корреляции $k_{W_{x\beta}}$ при расчетах может быть принят равным по модулю 1.

При оценке систематической погрешности $\Delta\tilde{g}_{ГАР}$ ограничимся влиянием ускорений бортовой качки как более интенсивного воздействия. В табл. 1 приведены среднеквадратические значения возмущающих ускорений σ_{W_y} , принятые при расчете [19]. Величины наклонов оси чувствительности гравиметра из-за погрешностей стабилизации и их среднеквадратические значения σ_β были получены путем математического моделирования системы акселерометрической коррекции гиروهоризонтали.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета погрешности $\Delta\tilde{g}_{ГАР}$

Величина	Волнение моря, балл			
	0-1	2-3	4-5	6
σ_{W_y} , м/с ²	0,08	0,17	0,21	0,26
σ_β , рад	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
$\Delta\tilde{g}_{ГАР}$, мГал	0,16	0,51	1,05	1,82

Систематическая погрешность $\Delta\tilde{g}_{ГАР}$ составила 0,16 мГал для спокойных условий и 1,82 мГал для штормовых условий. Тем самым подтверждена необходимость компенсации эффекта Гаррисона в показаниях гравиметра «Чекан», особенно в связи с возросшей актуальностью выполнения съемок при неблагоприятных погодных условиях. Расчет поправки предлагается выполнять с использованием формулы, аналогичной формуле (1). При этом наклоны оси чувствительности гравиметра из-за погрешностей стабилизации формируются путем умножения сигналов акселерометров на передаточную функцию гиروهоризонтали по ускорениям:

$$\Delta g_{ГАР} = (W_x \cdot H_W^\beta(p)) \cdot W_x + (W_y \cdot H_W^\beta(p)) \cdot W_y, \quad (4)$$

где W_x , W_y – продольные и поперечные горизонтальные ускорения, которые регистрируются по показаниям акселерометров гиروهоризонтали гравиметра, $H_W^\beta(p)$ – передаточная функция гиروهоризонтали по ускорениям (3).

Компенсация орбитального эффекта

Всем измерительным системам крутильного типа в гравиметрии присущ орбитальный эффект (эффект «кросс-каплинг»), или эффект взаимного влияния на показания гравиметра горизонтальных и вертикальных ускорений основания. Этот эффект возникает из-за проекции горизонтальной составляющей кажущегося ускорения на ось чувствительности гравиметра:

$$\delta g_{ОРБ} = W_x \cdot \varphi, \quad (5)$$

где φ – угол отклонения оси чувствительности гравиметра от вертикали.

Для описания орбитального эффекта рассмотрим гравиметр с одинарной упругой системой крутильного типа. Запишем дифференциальное уравнение движения маятника в демпфирующей жидкости [16]:

$$T_g \dot{\phi} + \phi = v(\Delta g + \ddot{z}), \quad (6)$$

где Δg – приращение ускорения силы тяжести, \ddot{z} – вертикальная составляющая инерционного ускорения основания, v – коэффициент передачи гравиметрического датчика, T_g – постоянная времени гравиметрического датчика. Орбитальный эффект преимущественно создает быстрая составляющая ускорения, поэтому, пренебрегая Δg и медленно изменяющейся частью \ddot{z} , запишем:

$$T_g \dot{\phi} + \phi = v\ddot{z}. \quad (7)$$

Так как значение T_g достаточно велико (для гравиметра «Чекан» около 100 с), то можно приближенно записать:

$$T_g \dot{\phi} \approx v\ddot{z}. \quad (8)$$

Проинтегрировав, получим:

$$\phi \approx \frac{v}{T_g} \cdot \dot{z}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что отклик гравиметрического датчика на действующее ускорение пропорционален скорости вертикального перемещения, а если перемещение – гармоническое колебание, то по отношению к ускорению маятник гравиметра опаздывает по фазе на 90° . Таким образом, благодаря фазовому сдвигу реакции датчика на действующую на него силу в выходном сигнале гравиметра возникает систематическая погрешность, занижающая или завышающая его показания:

$$\Delta \tilde{g}_{OPB} = \frac{v}{T_g} \cdot M\{W_X V_Z\}, \quad (10)$$

где M – оператор математического ожидания.

Поскольку на качке горизонтальные и вертикальные ускорения гравиметра имеют нулевое математическое ожидание, то

$$\Delta \tilde{g}_{OPB} = \frac{v}{T_g} \cdot k_{W_X V_Z} \sigma_{W_X} \sigma_{V_Z}, \quad (11)$$

где σ_{W_X} , σ_{V_Z} – среднеквадратические значения горизонтальных ускорений $W_X(t)$ и вертикальной скорости $V_Z(t)$ на качке, $k_{W_X V_Z}$ – коэффициент корреляции $W_X(t)$ и $V_Z(t)$.

Для каждой из кварцевых систем ошибки за орбитальный эффект составляют:

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{g}_{ОРБ_1} &= \frac{v_1}{T_{g1}} \cdot k_{W_x V_z} \sigma_{W_x} \sigma_{V_z}, \\ \Delta\tilde{g}_{ОРБ_2} &= \frac{v_2}{T_{g2}} \cdot k_{W_x V_z} \sigma_{W_x} \sigma_{V_z}, \end{aligned} \tag{12}$$

где v_1, v_2, T_{g1}, T_{g2} – коэффициенты передачи и постоянные времени одинарных систем. В случае гравиметра с двойной упругой системой крутильного типа с идентичными кварцевыми системами ошибка за орбитальный эффект будет компенсироваться:

$$\Delta\tilde{g}_{ОРБ} = \Delta\tilde{g}_{ОРБ_1} - \Delta\tilde{g}_{ОРБ_2} = 0,$$

при $v_1 = v_2, T_{g1} = T_{g2}$.

Вместе с тем реальные приборы имеют упругие системы с неидентичными параметрами. В этом случае величину погрешности $\Delta\tilde{g}_{ОРБ}$ можно оценить в соответствии с выражением:

$$\Delta\tilde{g}_{ОРБ} = \frac{v_1 T_{g2} - v_2 T_{g1}}{T_{g1} T_{g2}} \cdot k_{W_x V_z} \sigma_{W_x} \sigma_{V_z}. \tag{13}$$

Таким образом, погрешность за орбитальный эффект характеризуется только условиями выполнения гравиметрических работ, неидентичностью маятников двойной кварцевой упругой системы гравиметрического датчика и, в отличие от погрешности Гаррисона, не зависит от погрешностей стабилизации.

Для оценки величины погрешности $\Delta\tilde{g}_{ОРБ}$ была проанализирована неидентичность маятников двойной кварцевой упругой системы по коэффициентам передачи и постоянным времени для 40 образцов гравиметров «Чекан». Получено: неидентичность маятников по коэффициенту передачи, в основном, не превышает 0,5 %, а по постоянной времени – 2%. С учетом этого в дальнейшем коэффициент передачи одинарных кварцевых систем был принят одинаковым и составил: $v_1 = v_2 = 0,17 \frac{рад}{м/с^2}$.

Как и при оценке величины эффекта Гаррисона, представленные в табл. 2 результаты расчета поделены на категории в зависимости от условий выполнения гравиметрических работ. Значения коэффициентов $k_{W_x V_z}$ были получены по результатам статистического анализа данных морских гравиметрических съемок.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета погрешности $\Delta\tilde{g}_{ОРБ}$

Величина	Волнение моря, балл			
	0-1	2-3	4-5	6
$\sigma_{W_x}, м/с^2$	0,06	0,10	0,14	0,19
$\sigma_{V_z}, м/с$	0,2	0,3	0,4	0,5
$k_{W_x V_z}$	0,2	0,4	0,6	0,7
$\Delta\tilde{g}_{ОРБ}, мГал$	0,01	0,12	0,32	0,50

Как следует из полученных данных, погрешность $\Delta\tilde{g}_{ОРБ}$ необходимо компенсировать для профилей гравиметрической съемки, выполненных в штормовую погоду.

В гравиметрах «Чекан» съем информации об угловом положении маятников упругой системы производится посредством оптико-электронного преобразователя. Выходные отсчеты гравиметрического датчика имеют размерность пикселей, а коэффициент преобразования от пикселей к углу поворота маятника упругой системы гравиметра составляет $k = 3,15 \cdot 10^{-5}$ рад/пикс.

Компенсацию орбитального эффекта предлагается выполнять с использованием формулы:

$$\Delta g_{ОРБ} = k(m_2 - m_1)W_X, \quad (14)$$

где m_1, m_2 – текущие отсчеты 1-го и 2-го маятника упругой системы гравиметра.

Компенсация погрешности жидкостного демпфирования

При испытаниях гравиметров серии «Чекан» на стенде вертикальных перемещений наблюдается возникновение дополнительной систематической погрешности измерений [20].

Традиционное уравнение работы сильно демпфированного гравиметра при гармоническом изменении входного сигнала имеет вид:

$$T_g \dot{g} + g = z \cdot \cos(\omega t), \quad (15)$$

где T_g – постоянная времени гравиметра, g – показания гравиметра, z – амплитуда вертикальных ускорений.

Формула (15) написана в предположении, что в жидкости упругой системы гравиметра не возникают вихревые потоки при движении пробной массы, то есть имеет место ее ламинарное обтекание. При небольших скоростях движения маятника упругой системы (малых возмущающих ускорениях и большой вязкости жидкости) это предположение справедливо. Вместе с тем при превышающих критическое значение скоростях движения, определяемых числом Рейнольдса, добавляется турбулентная составляющая. Поэтому было предложено дополнить уравнение (15):

$$k_g \dot{g}^2 + T_g \dot{g} + g = z \cdot \cos(\omega t), \quad (16)$$

где k_g – коэффициент лобового сопротивления, определяемый геометрическими формами маятника кварцевой системы гравиметра и вязкостью жидкости. Первый член уравнения (16) вызывает погрешность, которую необходимо компенсировать для повышения точности измерений. Для вычисления соответствующей поправки требуется определение коэффициента лобового сопротивления k_g , который может быть получен только по экспериментальным данным. Для этого можно воспользоваться данными испытаний гравиметров на стенде вертикальных перемещений.

Результаты испытаний гравиметров «Чекан» с различными постоянными времени при вертикальных перемещениях с амплитудой 2 м и периодом 14 с

представлены в табл. 3. При движении с указанным периодом стенд задает гармоническое ускорение с амплитудой 40 Гал. Для каждого из приборов была вычислена амплитуда изменения его показаний с учетом величины постоянной времени, а также скорость изменения показаний и квадрат этой скорости. Вычисленная величина квадрата скорости \dot{g}^2 также представлена в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний гравиметров на стенде вертикальных перемещений

№	Постоянная времени T_g , с	Систематическая погрешность δg , мГал	\dot{g}^2 , мГал ² /с ²
1	31	2,6	1512900
2	33	2,6	1468944
3	36	1,5	1234321
4	39	1,0	1050625
5	40	1,5	1000000
6	44	1,5	917764
7	45	0,6	790321
8	57	0,5	491401
9	60	0,8	443556
10	65	0,9	379456
11	83	0,1	232324
12	88	0,6	207025
13	88	0,4	207025
14	100	0,1	160000
15	101	0,4	156816
16	123	0,1	105625
17	138	0,4	83521

Построена графическая зависимость $\delta g = F(\dot{g}^2)$, представленная на рис. 2 и аппроксимированная линейной функцией по способу наименьших квадратов. Линейная аппроксимация оказалась достаточной, как будет показано дальше, при обсуждении результатов обработки натуральных данных.

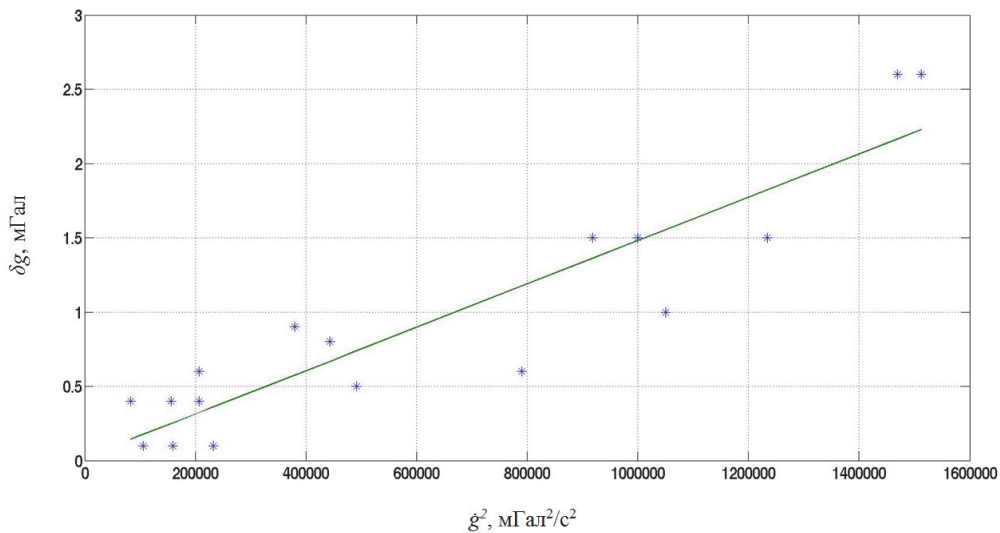


Рис. 2. Линейная аппроксимация зависимости $\delta g = F(\dot{g}^2)$

В соответствии с аппроксимацией искомый коэффициент составил $k_{\dot{g}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2/\text{мГал}$ при воздействии гармонического сигнала. В условиях реальных измерений в море вычисляется среднеквадратическое значение квадрата скорости изменений показаний прибора. Известно, что среднеквадратическое значение гармонического колебания в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды. Поэтому искомый коэффициент необходимо принять равным $k_{\dot{g}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2/\text{мГал}$.

Таким образом, для компенсации динамической погрешности, обусловленной воздействием вертикальных ускорений, предлагается вводить в показания гравиметра поправку Δg_{Wz} :

$$\Delta g_{Wz} = k_{\dot{g}} \dot{g}^2. \quad (17)$$

Примеры морских гравиметрических работ

Эффект Гаррисона и орбитальный эффект в основном вносят систематические изменения в показания гравиметра, величина которых определяется динамическими условиями выполнения измерений. Компенсация этих систематических погрешностей возможна при использовании методов площадного уравнивания результатов съемки [21].

На рис. 3 приведен пример ввода поправки Δg_{Wz} в данные гравиметрического профиля, выполненного в существенно меняющихся условиях морского волнения.

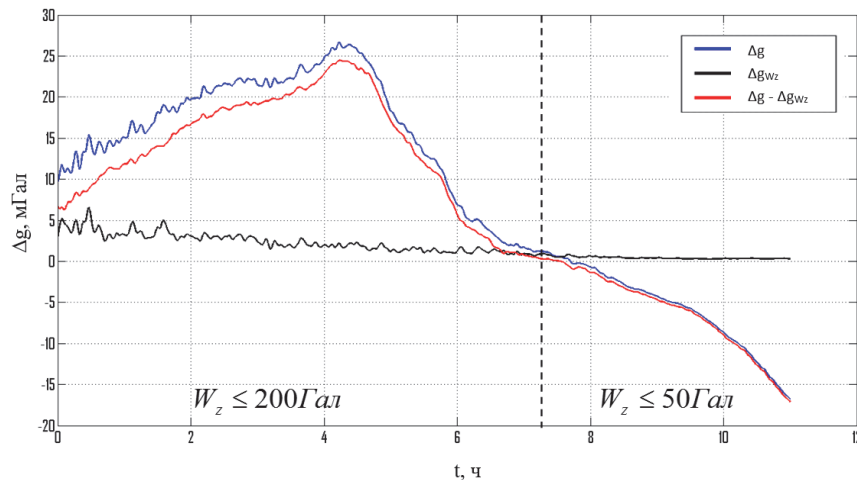


Рис. 3. Пример ввода поправки Δg_{Wz} на гравиметрическом профиле

Видно, что компенсируется не только систематическая, но и высокочастотная составляющая рассматриваемой динамической погрешности, что также позволяет повысить пространственную разрешающую способность измерений [22]. Кроме того, в случае значительного изменения морского волнения на профиле учет динамической погрешности невозможен методами площадного уравнивания съемки, но, как видно из рис. 3, хорошо компенсируется вводом поправки Δg_{Wz} .

Кроме того, для экспериментальной проверки предложенных методов компенсации динамических погрешностей измерений, обусловленных ускорениями движения носителя, была выполнена обработка данных повторных морских гравиметрических профилей, пройденных в различных погодных условиях. Изначально в данные всех профилей были введены традиционные поправки: по-

правка за скорость смещения нуля-пункта гравиметра, поправка Этвеша и поправка за нормальное значение силы тяжести. Результирующие аномалии силы тяжести, полученные по измерениям на повторных профилях, подвергались обработке фильтром низких частот, параметры которого для каждой пары профилей оставались неизменными. Далее была произведена повторная обработка данных, при которой к уже перечисленным поправкам в показания гравиметра были дополнительно введены поправки за влияние ускорений движения: поправка Гаррисона, поправка за влияние жидкостного демпфирования и поправка за орбитальный эффект. Параметры фильтра низких частот для каждой пары повторных профилей при этом соответствовали принятым на первом этапе обработки данных. Результаты обработки данных приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Оценка точности измерений на повторных профилях

№№ профилей	Протяженность, км	Среднеквадратическое значение вертикальных ускорений, Гал	Среднеквадратическая погрешность разности измерений, мГал	
			без поправок	с поправками
1/2	65	60 / 15	2,20	0,85
3/4	60	50 / 20	1,42	0,36
5/6	80	47 / 21	0,95	0,45
7/8	75	46 / 16	1,75	0,83
9/10	70	45 / 10	0,63	0,40
11/12	60	42 / 8	0,66	0,34
13/14	20	40 / 15	1,11	0,36
15/16	45	38 / 23	0,69	0,43
17/18	65	37 / 22	1,36	0,47
19/20	70	30 / 20	1,08	0,51

Анализ данных табл. 4 показывает, что ввод динамических поправок позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность разности измерений на повторных профилях в 1,5-4 раза в зависимости от величины возмущающих ускорений.

Дополнительно в двух представленных вариантах была выполнена обработка результатов трех морских гравиметрических съемок. Общее количество повторных гравиметрических пунктов превысило 3500. В результате ввод динамических поправок позволил снизить среднеквадратическую погрешность съемки в три раза.

Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные работы показали, что точность измерений гравиметрами «Чекан» на море может быть повышена как за счет увеличения до разумного предела постоянной времени, так и за счет реализации программных средств учета влияющих физических и конструктивных факторов. Применение разработанных методов компенсации динамических погрешностей позволяет в несколько раз улучшить точность измерений, выполненных в неблагоприятных погодных условиях, а следовательно, повысить производительность и уменьшить стоимость геофизических работ.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пантелеев В.Л.** Динамический синтез морских гравиметров // Сборник «Морские гравиметрические исследования». 1975. №8. С. 22–47.
2. **Childers, V., Bell, R., Brozena, J.**, Airborne gravimetry: An investigation of filtering, *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 1, pp. 61–69.
3. **Bolotin, Yu.V., Yurist, S.Sh.**, Suboptimal smoothing filter for the marine gravimeter GT-2M // Материалы симпозиума Международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» (TG-SMM2010). 2010. С. 7–11.
4. **Guo, L., Meng, X., Chen, Zh., Li, Sh., Zheng, Y.**, Preferential filtering for gravity anomaly separation, *Computers & Geosciences*, 2013, vol. 51, pp. 247–254.
5. **Степанов, О.А., Косхаев, Д.А.**, Analysis of filtering and smoothing techniques as applied to aerogravimetry, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 19–25.
6. **Степанов, О.А., Косхаев, Д.А., Моторин, А.В.**, Designing Models for Signals and Errors of Sensors in Airborne Gravimetry Using Nonlinear Filtering Methods, *Institute of Navigation International Technical Meeting*, 2015, pp. 220–227.
7. **Болотин Ю.В., Голован А.А.** О методах инерциальной гравиметрии // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. 2013. №5. С. 59–67.
8. **Forsberg, R., Olesen, A.V., 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, 2014, vol. 139.
9. **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*, Springer, 2015, vol. 144.
10. **Казанин Г.С., Заяц И.В., Иванов Г.И., Макаров Е.С., Васильев А.С.** Геофизические исследования в районе Северного Полюса // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 333–335.
11. **Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Погорелов В.В., Соловьев В.Н., Афанасьева Л.В.** Изученность гравитационного поля Арктики – состояние и перспективы // Физика Земли. 2016. №3. С. 113–122.
12. **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, pp. 10586–10604.
13. **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, 2017, 461, pp. 23–34.
14. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Краснов А.А.** Современное состояние и перспективы развития отечественной морской гравиметрии // 11-я Российская мультikonференция по проблемам управления. Материалы пленарных заседаний. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2018. С. 6–16.
15. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Элинсон Л.С., Краснов А.А.** Результаты разработки и испытаний нового аэроморского гравиметра // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2015. С. 173–179.
16. **Пантелеев В.Л.** Основы морской гравиметрии. М.: Недра, 1983. 256 с.
17. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 427 с.
18. **Краснов А.А.** Результаты стендовых и натуральных испытаний гиросtabilизатора аэрогравиметра // IX конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 2007. С. 26–33.
19. **Кутепов В.С.** Условия эксплуатации морского гиросtabilизированного гравиметра // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. № 2. С. 260–267.
20. **Krasnov, A.A., Nesenjuk, L.P., Sokolov, A.V., Stelkens-Kobsch, T.H., Heyen, R.**, Test Results of the Airborne Gravimeter, *Proc. IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, Saint-Petersburg, Russia, 2008, pp. 73–77.
21. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / под общей ред. В.Г. Пешехонова; науч. редактор О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
22. **Краснов А.А., Соколов А.В.** Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2015. №2 (89). С. 118–131.

Sokolov, A.V., Krasnov, A.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg, Russia), and **Zheleznyak, L.K.** (Schmidt Institute of Physics of the Earth (Russian Academy of Sciences), Moscow)
Improving the Accuracy of Marine Gravimeters, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 70–81.

Abstract. Software- and hardware-based methods of compensation for dynamic errors of the marine gravimeters caused by inertial accelerations are considered. The error due to the fluid damping of the gravimeter sensing element is analyzed and taken into account for the first time. Some results of gravity measurements that confirm the increase in gravimeter accuracy are presented.

Key words: gravity, gravimeter, gravity survey, data processing.

REFERENCES

1. **Panteleev, V.L.**, Dynamic synthesis of marine gravimeters, in *Morskie gravimetricheskie issledovaniya* (Marine Gravimetric Surveys), Moscow, 1975, no. 8, pp. 22–47.
2. **Childers, V., Bell, R., and Brozena, J.**, Airborne gravimetry: An investigation of filtering, *Geophysics*, vol. 64, no. 1, 1999, pp. 61–69.
3. **Bolotin, Yu.V. and Yurist, S.Sh.**, Suboptimal smoothing filter for the marine gravimeter GT-2M, *Proc. IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, St. Petersburg, Russia, 2010, pp. 7–11.
4. **Lianghui Guo, Xiaohong Meng, Zhaoxi Chen, Shuling Li, and Yuanman Zheng**, Preferential filtering for gravity anomaly separation, *Computers & Geosciences*, vol. 51, 2013, pp. 247–254.
5. **Stepanov, O.A. and Koshaev, D.A.**, Analysis of filtering and smoothing techniques as applied to aerogravimetry, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 19–25.
6. **Stepanov, O. A., Koshaev, D. A., and Motorin, A. V.**, Designing Models for Signals and Errors of Sensors in Airborne Gravimetry Using Nonlinear Filtering Methods, *Institute of Navigation International Technical Meeting 2015*, ITM 2015, pp. 220–227.
7. **Bolotin Y.V., Golovan A.A.**, Methods of inertial gravimetry // Moscow University Mechanics Bulletin, 2013, vol. 68. no. 5, pp. 117–125.
8. **Forsberg, R., Olesen, A.V., Einarsson, I., Manandhar, N., and Shreshta, K.**, Geoid of Nepal from Airborne Gravity Survey. In: Rizos, C., Willis, P., (Eds.) *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. International Association of Geodesy Symposia*. vol. 139, 2014, Springer.
9. **Barzaghi, R., Albertella, A., Carrion, D., Barthelmes, F., Petrovic, S., and Scheinert, M.**, Testing Airborne Gravity Data in the Large-Scale Area of Italy and Adjacent Seas. In: Jin, S., Barzaghi, R., (Eds.), *IGFS 2014* (International Association of Geodesy Symposia), Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, pp. 39–44.
10. **Kazanin, G.S., Zayats, I.V., Ivanov, G.I., Makarov, E.S., and Vasil'ev, A.S.**, Geophysical surveys in the North Pole area, *Okeanologiya*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 333–335.
11. **Konshov, V.N., Nepoklonov, V.B., Pogorelov, V.V., Solov'ev, V.N., and Afanasyeva, L.V.**, Gravitational field of the Arctic: The state of knowledge and prospects for the future, *Fizika Zemli*, 2016, no. 3, pp. 113–122.
12. **Lu, B., Barthelmes, F., Petrovic, S., Forste, C., Flechtner, F., Luo, Z., He, K., and Li, M.**, Airborne gravimetry of GEOHALO mission: data processing and gravity field modeling, *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 2017, pp. 10586–10604.
13. **Forsberg, R., Olesen, A., Ferraccioli, F., Jordan, T., Matsuoka, K., Zakrajsek, A., Ghidella, M., and 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, 461, 2017, pp. 23–34.
14. **Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., and Krasnov A.A.**, The current state and prospects for the development of marine gravimetry in Russia, 11th Russian Multiconference on Problems of Control (11 Rossiiskaya mu'tikonferentsiya po problemam upravleniya), St.Petersburg: Elektropribor, 2018, pp. 6–16.
15. **Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., Elinson, L.S., and Krasnov, A.A.**, A new air-sea gravimeter: development and test results, 22nd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, 2015, pp. 193–199.

16. **Panteleev, V.L.**, *Osnovy morskoy gravimetrii* (Basics of Marine Gravimetry), Moscow: Nedra, 1983.
17. **Stepanov, O.A.**, *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii* (Fundamentals of the Estimation Theory with Applications to the Problems of Navigation Information Processing), Part 2, *Vvedenie v teoriyu fil'tratsii* (Introduction to the Filtering Theory), St. Petersburg: TsNII Elektropribor, 2012.
18. **Krasnov, A.A.**, The results of bench and field tests of the airborne gravimeter gyrostabilizer, *IX konferentsiya molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravlenie dvizheniem"* (9th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control"), 2007, pp. 26–33.
19. **Kutepov, V.S.**, Operating conditions of marine gyrostabilized gravimeter, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 2, pp. 260–267.
20. **Krasnov, A.A., Nesenyuk, L.P., Sokolov, A.V., Stelkens-Kobsch, T.H., and Heyen, R.**, Test results of an airborne gravimeter, *Proc. IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, St. Petersburg, Russia, 2008, pp. 73–77.
21. **Sovremennye metody i sredstva izmereniya parametrov gravitatsionnogo polya Zemli** (Modern technologies and methods for measuring the Earth's gravity field parameters), Eds., V.G. Peshekhonov, O.A. Stepanov, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2017.
22. **Krasnov, A.A. and Sokolov, A.V.**, A Modern Software System of a Mobile Chekan-AM Gravimeter, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 278–287.

Материал поступил 08.04.2019