

А. А. КРАСНОВ, А. В. СОКОЛОВ

СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКС ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ГРАВИМЕТРА «ЧЕКАН-АМ»

Обсуждается новый комплекс программно-математического обеспечения (ПМО) гравиметра «Чекан-АМ». Приводится структура ПМО, состоящего как из программ реального времени, так и из пакета камеральной обработки. Представлены основные алгоритмы и особенности обработки данных, полученных при выполнении морских и аэрогравиметрических съемок с использованием гравиметра «Чекан-АМ».

Ключевые слова: гравиметр, программно-математическое обеспечение, обработка данных.

Введение

Выполнение высокоточной гравиметрической съемки с подвижных носителей остается наиболее распространенным и перспективным методом изучения гравитационного поля Земли [1–6]. При этом наряду с высокой наукоемкостью и технологичностью гравиметрической аппаратуры важным аспектом, определяющим итоговое качество геофизических материалов, является функциональность и эффективность программно-математического обеспечения.

Отличительной особенностью технологии выполнения морских и аэрогравиметрических работ является поэтапная обработка данных, состоящая из сбора, полевого контроля, камеральной обработки и последующей геофизической интерпретации результатов измерений. Причем недостаточная эффективность программных средств на любом из этих этапов может приводить как к существенному ухудшению качества результатов съемки, так и к полной некондиционности материала, что особенно принципиально для съемок труднодоступных районов Земли [7].

Немаловажную роль при постобработке гравиметрических данных играет использование конкретной математической модели, учитывающей конструктивные особенности используемого гравиметра и параметров его калибровки, возможность ввода различных поправок, изменения коэффициентов и структуры цифрового фильтра. Опыт эксплуатации гравиметра «Чекан-АМ», разработанного более 15 лет назад, показал недостаточную эффективность его программных средств, состоящих только из программ диагностики и сбора данных в реальном времени [8]. В связи с этим при создании новой модификации гра-

Краснов Антон Алексеевич. Начальник сектора АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург).

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

виметра «Чекан-АМ» существенное внимание было уделено не только модернизации ПМО сбора гравиметрических данных, но и разработке программ калибровки аппаратных средств, полевого контроля и камеральной обработки данных, а также системы управления базами данных (СУБД) с функцией построения гравиметрических карт [9].

Калибровка гравиметрического датчика и системы гиросtabilизации

Для любого типа гравиметра одной из обязательных процедур остается периодическая калибровка его чувствительного элемента. Кроме того, при выполнении морских и особенно аэрогравиметрических работ необходимо также калибровать чувствительные элементы системы гиросtabilизации. В целях автоматизации этих процедур и возможности их выполнения в условиях объекта разработано специальное технологическое программное обеспечение, состоящее из программ TestGrav и TestGyro.

Программа TestGrav (рис. 1), предназначенная для регулирования и калибровки гравиметрического датчика (ГД), выполняет следующие основные функции:

- регулирование оптико-электронного преобразователя, включая его юстировку, настройку интенсивности и формы автоколлимационных изображений;
- регулирование цифровой системы термостабилизации;
- определение коэффициентов и постоянной времени ГД методом наклона;
- калибровка смещений нуля электронных уровней;
- углубленная диагностика всех аппаратных средств ГД.

При этом только уточнение коэффициентов и постоянной времени ГД необходимо выполнять периодически, а остальные виды калибровки выполняются однократно при изготовлении комплекса.

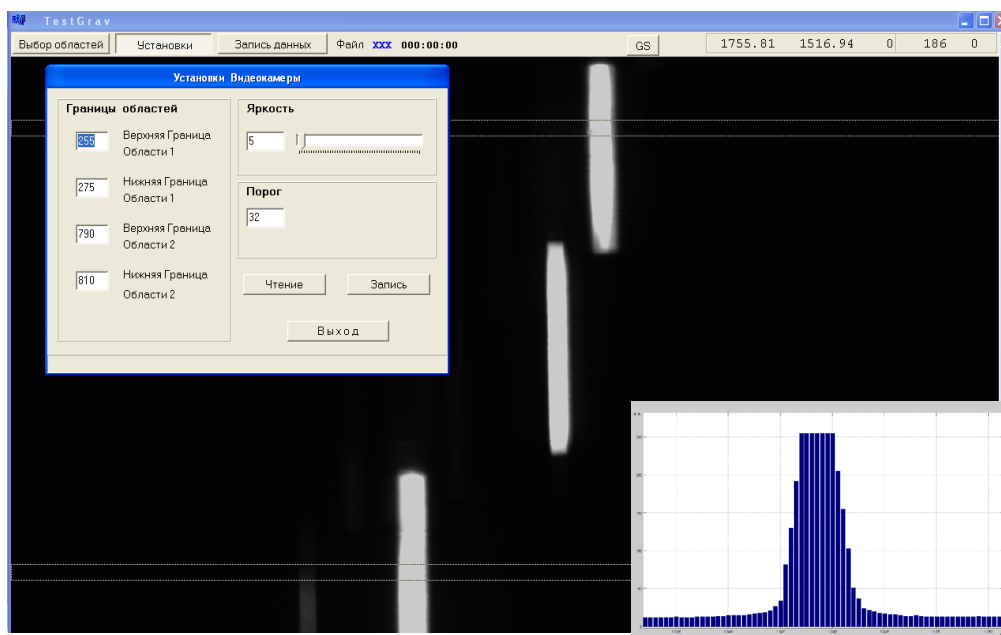


Рис. 1. Вид экрана программы TestGrav

Программа TestGyro (рис. 2) предназначена для решения аналогичных задач регулирования и калибровки гиростабилизатора и выполняет следующие основные функции:

- автоматизированное регулирование безредукторной следящей системы во всех режимах работы гиростабилизатора;
- калибровка смещений нуля и масштабных коэффициентов поплавковых гироскопов;
- калибровка смещений нуля и масштабных коэффициентов горизонтальных акселерометров;
- калибровка смещения нуля и масштабного коэффициента азимутально-го волоконно-оптического гироскопа;
- углубленная диагностика всех аппаратных средств системы гиростабилизации.

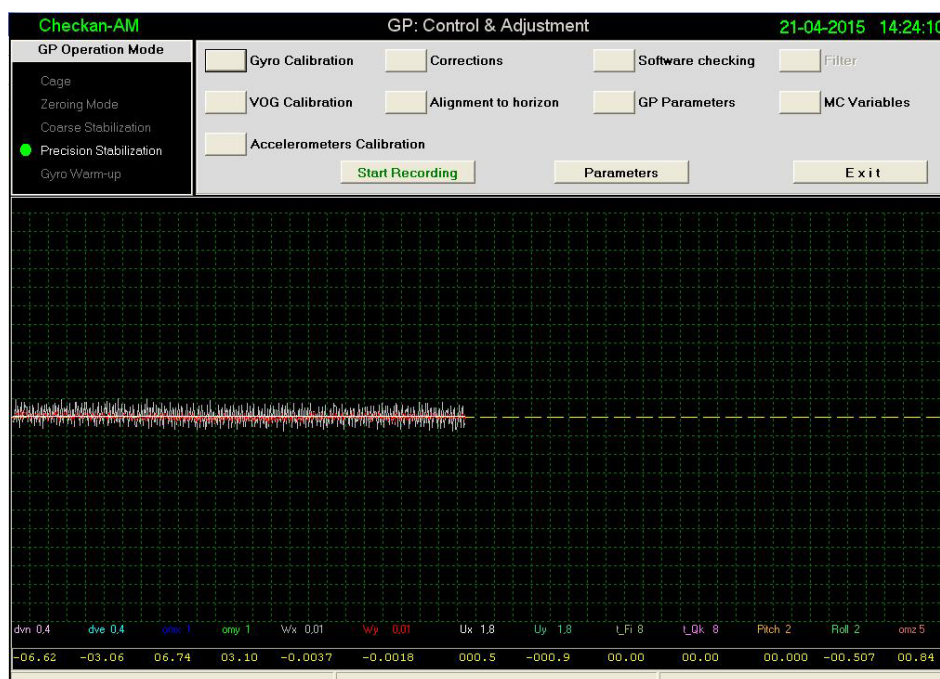


Рис. 2. Вид экрана программы TestGyro

Результаты первичной калибровки гиростабилизатора записываются в ПЗУ микроконтроллеров и при необходимости могут уточняться в процессе эксплуатации.

Сбор данных в реальном времени

Основной задачей ПМО реального времени является синхронная регистрация исходных гравиметрических и навигационных данных на частоте до 10 Гц при измерениях на профилях съемки. Учитывая существенные различия в процедурах обработки морских и аэрогравиметрических измерений, ПМО сбора данных в реальном времени было выполнено в виде двух отдельных программ SeaGrav и AirGrav, установленных на ноутбук из комплекта поставки новой модификации гравиметра «Чекан-АМ».

Обе программы SeaGrav и AirGrav предусматривают выполнение следующих операций:

- прием выходных данных ГД, системы гиросtabilизации и системы термостабилизации гравиметра;
- прием навигационной информации от спутникового приемника и синхронизацию данных гравиметра;
- линеаризацию шкалы ГД;
- сглаживание выходных данных гравиметра посредством цифрового фильтра низких частот;
- ввод поправки за скорость смещения нуль-пункта гравиметра;
- вычисление приращения силы тяжести относительно значения на начальном опорном гравиметрическом пункте;
- запись на «жесткий» диск исходных данных с частотой 10 Гц.

Дополнительно в программе AirGrav предусмотрена коррекция влияния движения носителя на гироплатформу гравиметра с использованием спутниковых навигационных данных.

Любой принятый из гравиметра сигнал может быть отображен на экране в графической и цифровой форме (рис. 3). Интерфейс программ SeaGrav и AirGrav предоставляет широкие возможности по масштабированию и выбору цветовой гаммы графиков.

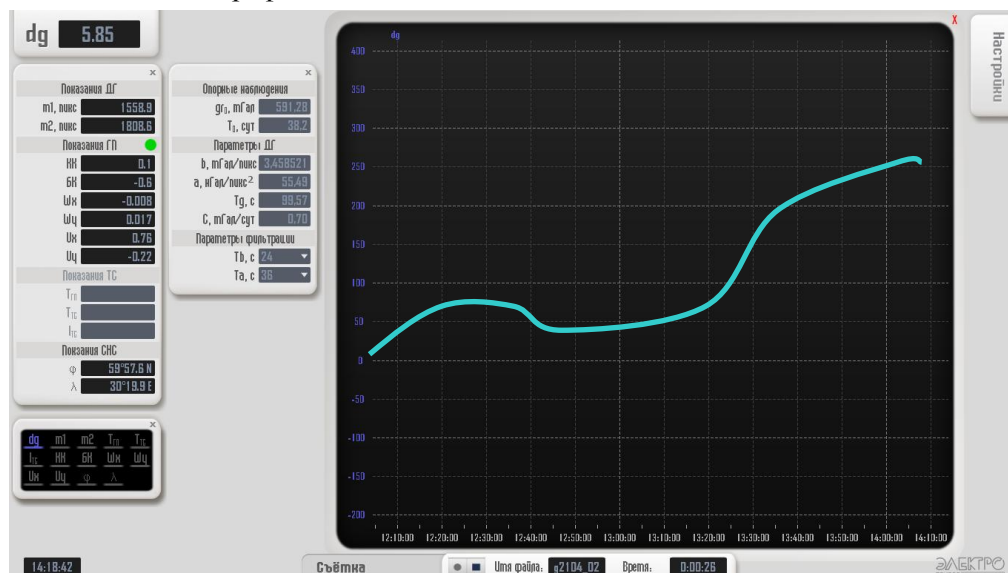


Рис. 3. Вид экрана ПМО сбора данных в реальном времени

Существенной особенностью программ реального времени является наличие встроенных процедур диагностики основных систем гравиметрического комплекса. При этом предусмотрены интегральные признаки функционирования и достоверности показаний гравиметра, что значительно упрощает работу оператора, особенно при выполнении аэрогравиметрической съемки.

Выходной информацией ПМО сбора гравиметрических данных в реальном времени являются текстовые файлы и протоколы работы программ, предназначенные для последующего оперативного контроля и камеральной обработки.

Контроль качества данных

Первичный анализ гравиметрической и навигационной информации, выполняемый ПМО сбора данных, направлен на выявление отказов аппаратуры. Цель оперативного полевого контроля – определение галсов или отдельных участков галсов с неудовлетворительным качеством данных, а также выявление причин снижения качества. Оперативный контроль данных производится непосредственно на борту судна или самолета и его итогом является решение о пригодности результатов измерений для дальнейшей обработки.

Программа Chekan_QC, созданная для решения указанной задачи, представляет собой набор процедур оценки качества гравиметрических данных как с привлечением, так и без привлечения внешней информации (рис. 4). Кроме того, в ней предусмотрено сравнение измеренного профиля ускорения силы тяжести (УСТ) с независимыми источниками гравиметрической информации, которыми могут быть результаты уже выполненных в районе съемок, глобальные модели гравитационного поля Земли, базы данных гравиметрической информации, например Арктический гравиметрический проект ArcGP.

В программу Chekan_QC внедрена оценка критериев функционирования всех систем гравиметра, а также условий выполнения измерений. Наличие таких критериев позволяет эффективно выявлять возможные причины снижения качества данных. При этом анализируются следующие параметры:

- для ГД – разность показаний кварцевых систем;
- для системы гиросtabilизации – уровень погрешностей стабилизации и курсовой ошибки;
- для спутникового приемника – отсутствие сбоев в приеме данных;
- для условий полета – стабильность высоты полета, уровень вертикальных и горизонтальных ускорений, постоянство углов тангажа и крена, постоянство путевой скорости.

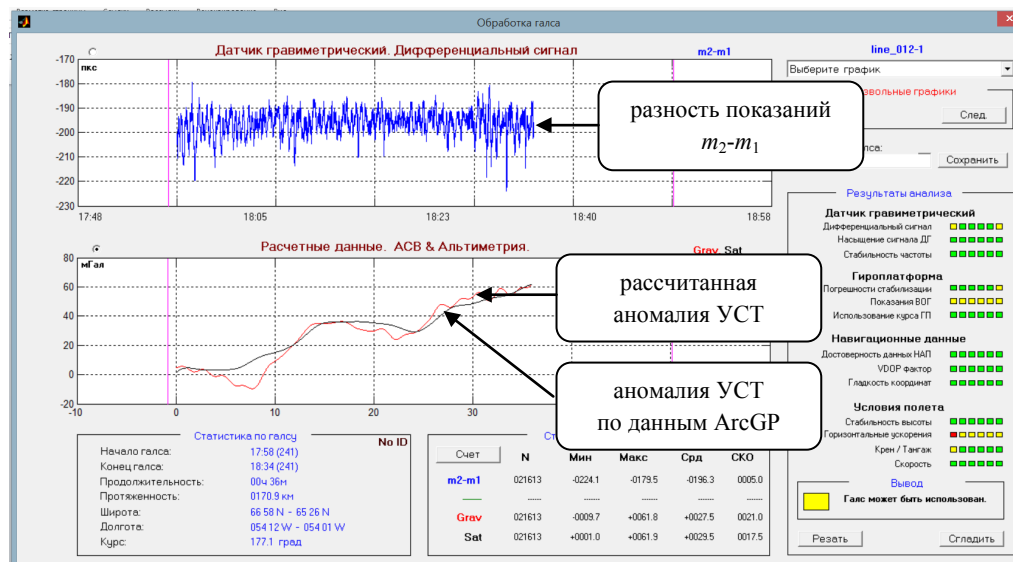


Рис. 4. Вид экрана ПМО оперативного контроля данных

Существенной функциональной возможностью оперативной проверки качества данных является контроль результатов измерений на повторных и параллельных галсах (рис. 5). При этом программа Chekan_QC автоматически определяет повторные пункты и рассчитывает среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) расхождений результатов измерений на повторных галсах.

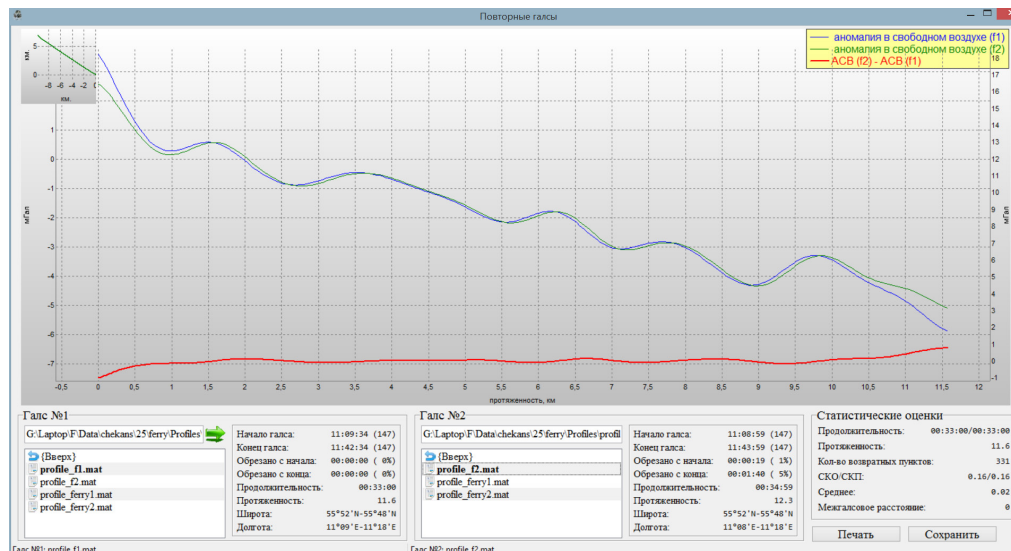


Рис. 5. Сравнение результатов измерений на повторных галсах

Разработанное ПМО полевого контроля качества данных представляет собой эффективный инструмент оперативной обработки результатов измерений, выявления причин неудовлетворительного качества данных и принятия решения по дальнейшей камеральной обработке материалов.

Камеральная обработка данных

Функциональные возможности программного пакета камеральной обработки гравиметрических данных Chekan_PP включают полный комплекс процедур – 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 вертикальные ускорения, за эффект Гаррисона, за остаточный орбитальный эффект, за неучтенное смещение нуля-пункта гравиметра, за действие приливов. Для морской гравиметрической съемки при наличии данных о глубине возможен расчет аномалий силы тяжести в редукции Буге.

Обработка результатов съемки начинается с создания базы данных опорных наблюдений (рис. 6). Программа рассчитывает скорость смещения нуля-пункта гравиметра по методу наименьших квадратов и вырабатывает оценку точности определения дрейфа нуля-пункта гравиметра.

Обработка измерений на профиле начинается с перевода показаний гравиметра в единицы ускорения, который выполняется с использованием его градуировочной характеристики, носящей квадратичный характер [10]

$$\Delta g_m = b \cdot (m - m_0) + a \cdot (m - m_0)^2,$$

где $m = m_1 + m_2$, m_1 , m_2 – показания первой и второй кварцевой системы гравиметра, имеющие размерность пикселей; m_0 – показания при горизонтальном положении маятников кварцевой системы гравиметра; b , a – коэффициенты градуировочной характеристики гравиметра.

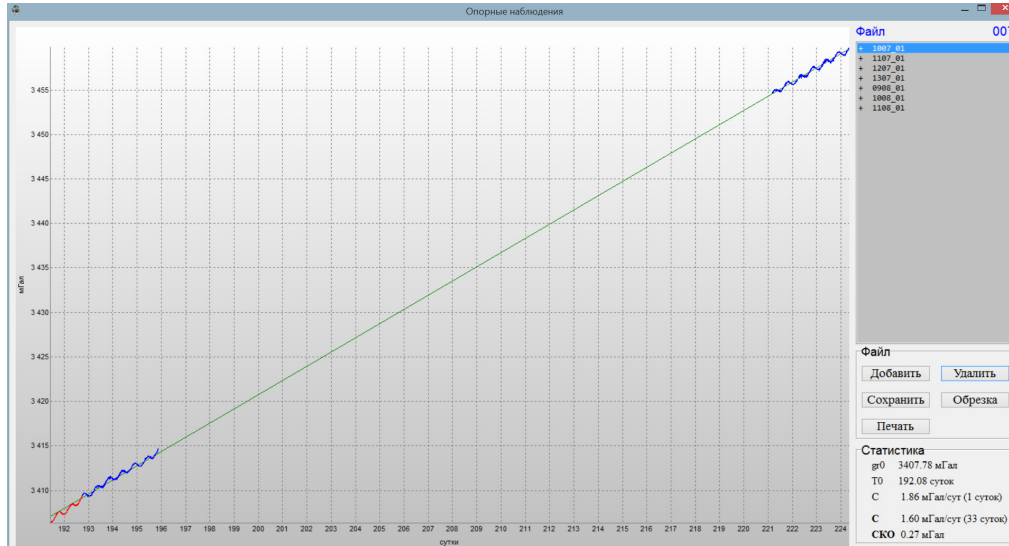


Рис. 6. База данных опорных наблюдений

Учет показаний гравиметра на опорном пункте Δg_0 и смещения нуль-пункта гравиметра выполняются по формуле

$$\Delta g_r = \Delta g_m - \Delta g_0 - C(T - T_0),$$

где C – скорость смещения нуль-пункта гравиметра; T – текущее время измерений; T_0 – время измерения начального показания гравиметра Δg_0 .

Значение постоянной времени сильно демпфированного гравиметра составляет 60–120 с, поэтому характерной операцией при обработке его измерений является восстановление входного воздействия на гравиметр, которое выполняется с использованием цифрового восстанавливающего фильтра. Модель ГД описывается апериодическим звеном первого порядка, при этом передаточная функция восстанавливающего фильтра имеет вид

$$F_r(p) = \frac{T_g p + 1}{T_* p + 1},$$

где T_g – постоянная времени гравиметра; $T_* \ll T_g$.

Расчет поправки Этвеша за вертикальную составляющую кориолисова ускорения и центростремительное ускорение при обработке аэрогравиметрических

измерений производится по формуле, учитывающей несферичность Земли и вариации высоты полета

$$\Delta g_e = \left(\frac{1,5}{10^4} V_E \cos \varphi + \frac{V_N^2}{R} \left(1 + \frac{h}{R} - 0,5e^2 (2 - 3 \sin^2 \varphi) \right) + \frac{V_E^2}{R} \left(1 + \frac{h}{R} - 0,5e^2 \sin^2 \varphi \right) \right) \cdot 10^5,$$

где φ – широта; h – высота; V_N , V_E – северная и восточная составляющие линейной скорости; R , e – параметры общеземного эллипсоида WGS84.

При обработке данных морской гравиметрической съемки необходимость учета несферичности Земли и вариаций высоты полета для вычисления поправки Этвеша отсутствует в связи со сравнительно малыми скоростями движения носителя.

Поправка за совместное действие горизонтальных ускорений и остаточных наклонов гировертикали $\delta g_{\text{гор}}$ (так называемая поправка Гаррисона) вычисляется по классической формуле

$$\delta g_{\text{гор}} = W_x \alpha + W_y \beta,$$

где W_x , W_y – продольное и поперечное горизонтальные ускорения; α , β – углы наклона измерительной оси ГД вокруг осей X и Y соответственно.

Углы α , β рассчитываются с использованием передаточной функции гировертикали по горизонтальным ускорениям [11]

$$F(p) = \frac{T_1 p + 1}{g(T_2 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)},$$

где T_1 , T_2 – постоянные времени гировертикали; ξ – коэффициент демпфирования; g – ускорение силы тяжести; p – оператор Лапласа.

Таким образом, при расчете поправки Гаррисона углы наклона, которые определяются по реакции модели гировертикали на ускорение, умножаются на реально действующие ускорения.

При вычислении остаточного орбитального эффекта используются непосредственно отсчеты m_1 , m_2 по каждой из кварцевых систем ГД [12]

$$\delta g_{\text{орб}} = k(m_2 - m_1)W_x,$$

где $k = 6.5$ "/пикс = $3.15 \cdot 10^{-5}$ рад/пикс – коэффициент преобразования от пикселей к углу поворота маятника кварцевой системы; m_1 , m_2 – текущие отсчеты 1-й и 2-й кварцевой системы.

Основной проблемой аэрогравиметрических измерений является то, что порожденные движением носителя в вертикальной плоскости ускорения не только на несколько порядков превосходят полезный сигнал – искомые аномалии УСТ, но и перекрываются с ним в частотной области. Учет вертикальной составляющей инерционных ускорений в показаниях гравиметра производится с использованием высокоточных измерений высоты полета спутниковой навигационной аппаратурой. Следует отметить, что обработка результатов морской гравиметрической съемки не требует учета вертикальных ускорений по внешним измерениям. Это связано с тем, что основной период возмущающих ускорений находится в пределах 6–10 с и такие возмущения эффективно подавляются сглаживающим фильтром без существенных искажений полезного сигнала.

Даже при тщательном учете всех необходимых поправок сигнал гравиметра остается зашумленным. Для выделения полезного сигнала в программе Chekan_PP реализованы методы цифровой фильтрации и сглаживания.

Следует отметить, что повышение точности за счет усиления степени фильтрации ведет к снижению разрешающей способности измерений. Для обоснованного выбора степени фильтрации оператору предоставляются два параметра, автоматически вырабатываемые программой – среднее квадратическое значение вертикальных ускорений на профиле и оценка разрешающей способности результатов измерений

$$S = \frac{\bar{V}}{\omega_{\text{ср}}},$$

где $\bar{V}$ – среднее значение скорости движения при прохождении профиля; $\omega_{\text{ср}}$ – частота среза фильтра, примененного при обработке.

На каждом этапе результаты вычислений отображаются на графиках и в виде статистической справки (рис. 7). Результаты обработки съемки сохраняются в виде текстовых файлов, пригодных для загрузки в стандартные пакеты анализа геофизических данных.

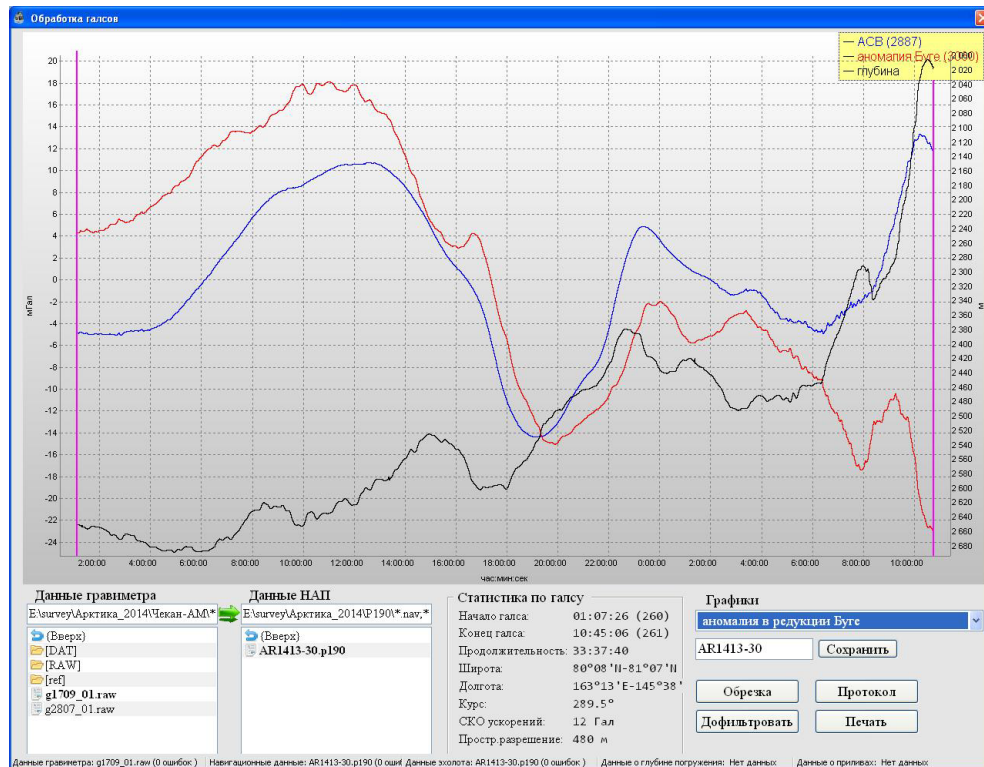


Рис. 7. Обработка гравиметрического профиля

Результаты измерений на профилях загружаются в базу данных съемки. При этом программа автоматически рассчитывает статистические параметры съемки, в том числе протяженность галсов, количество повторных контрольных пунктов, значения СКП и СКО погрешности съемки.

Расчет СКП съемки выполняется в соответствии с формулой

$$m_c = \sqrt{m_{п.п}^2 + m_{и.с}^2},$$

при этом СКП единичного определения аномалий УСТ на повторных контрольных пунктах $m_{п.п}$ вычисляется по формуле

$$m_{п.п} = \sqrt{\frac{\sum d_{п.п}^2}{2n}},$$

где $d_{п.п}$ – разность определений аномалий УСТ на повторных пунктах, n – число повторных пунктов.

Существенной особенностью является то, что СКП съемки учитывает также погрешность интерполяции результатов измерений между съемочными галсами $m_{и.с}$

$$m_{и.с} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [g_k - (g_{c1} + g_{c2})/2]^2}{N}},$$

где g_k – значение аномалии УСТ на контрольном галсе в точке K , находящейся на середине расстояния между съемочными галсами; g_{c1} и g_{c2} – значения аномалии УСТ на смежных съемочных галсах, между которыми расположена точка K , в точках пересечения с контрольными; N – число точек K в съемке.

СКО погрешности съемки не учитывает систематического расхождения результатов измерений на повторных пунктах и имеет вид

$$m_{к.п} = \sqrt{\frac{\sum (d_{п.п} - r)^2}{2(n-1)}},$$

где $r = \frac{\sum d_{п.п}}{n}$.

В связи с тем что морские геофизические работы часто выполняются без заключительных опорных измерений, а начальные опорные измерения имеют недостаточную продолжительность для достоверной оценки дрейфа нуля-пункта гравиметра, существенной возможностью является расчет и ввод поправки за неучтенную скорость смещения нуля-пункта по разности результатов измерений УСТ в точках пересечения профилей (рис. 8).

Другой важной процедурой является уравнивание результатов съемки, при котором рассчитываются и вводятся в каждый профиль средние значения невязок в его точках пересечения с другими профилями съемки.

Значения всех поправок, введенных при обработке данных, наравне с параметрами обработки сохраняются в протоколах работы программы, которые формируются автоматически.

Результаты обработки съемки могут быть экспортированы для дальнейшей обработки и геофизической интерпретации в различных форматах. Это прежде всего межведомственный формат МВФ78, регламентированный Инструкцией по морской гравиметрической съемке, а также текстовый формат XYZ, пригодный для загрузки в большинство современных пакетов обработки геофизических данных.

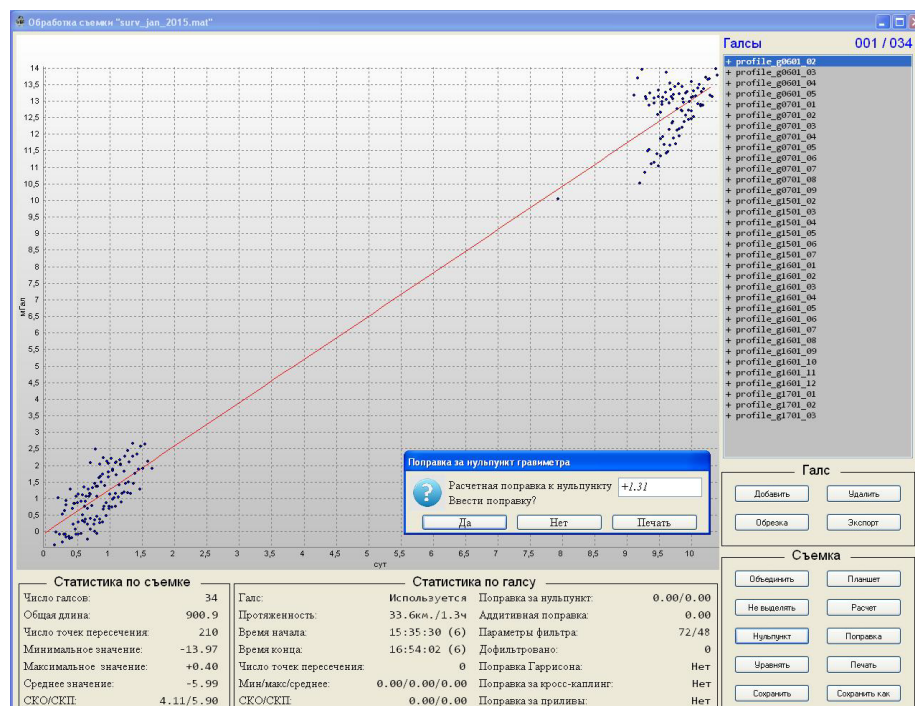


Рис. 8. Ввод поправки к скорости смещения нуль-пункта гравиметра

Система управления базой данных

Результаты гравиметрических съемок, прошедшие полную камеральную обработку, могут быть сохранены в единой базе данных, для управления которой была разработана специализированная СУБД. Среди основных задач СУБД можно выделить: хранение результатов гравиметрических съемок, анализ изученности ГПЗ для заданного района, комплексирование различной гравиметрической информации, построение гравиметрических карт.

Интерфейс программы обеспечивает удобный поиск необходимой съемки, просмотр вспомогательной статистической информации и при необходимости редактирование данных (рис. 9). Для повышения наглядности графического представления схемы галсов съемок отображаются различными цветами в зависимости от величины СКП съемки.

На основании загруженных в базу данных результатов съемок могут строиться гравиметрические карты, причем как по данным одной, так и нескольких съемок. Карты формируются в нормальной равноугольной цилиндрической проекции Меркатора в масштабах, назначаемых пользователем. На гравиметрических картах изображаются изолинии поля с задаваемым пользователем шагом, пункты с числовыми значениями, а также рамка и картографическая сетка с оцифровкой (рис. 10). СУБД позволяет автоматически формировать зарамочное оформление карт, которое включает в себя заголовок, шкалу раскраски, схему гравиметрической изученности района и схему распределения СКП аномалий. Элементы зарамочного оформления могут быть отредактированы пользователем и размещены в любом месте карты. Гипсометрическая раскраска площадей между изолиниями выполняется автоматически по задаваемым пользователем диапазонам.

№ 2 (89), 2015

Заключение

Одно из преимуществ новой модификации мобильного гравиметра «Чекан-АМ» – наличие в его составе комплекса ПМО, обеспечивающего не только прием и первичную обработку данных, но и контроль качества полевых материалов, полную камеральную обработку результатов съемки, а также ведение соответствующей геофизической базы данных и построение гравиметрических карт. Использование в структуре ПМО математической модели кварцевого чувствительного элемента гравиметра «Чекан-АМ» позволяет повысить как точность, так и пространственное разрешение гравиметрических измерений. Разработанное ПМО позволяет выполнять оперативный полевой контроль качества данных непосредственно на борту судна или самолета, что существенно повышает эффективность запланированных работ. Созданная СУБД обеспечивает не только работу с гравиметрической базой данных, но и позволяет подготавливать итоговый материал, включая печать карт, без использования дополнительных геофизических пакетов программ.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
(проект № 14-29-00160).*

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С. Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 1. - С. 39-50.
3. 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.
4. Степанов О.А., Блажнов Б.А., Кошаев Д.А. Исследование эффективности использования спутниковых измерений при определении ускорения силы тяжести на летательном аппарате // Гироскопия и навигация. – 2002. - № 3. – С. 33-47.
5. Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Локальное многомасштабное оценивание силы тяжести по данным аэрогравиметрии // Геофизические исследования. – 2014. - № 3. – С. 38-49.
6. Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Голован А.А., Якушик Л.Ю. О применении многоантенной GPS в аэрогравиметре GT-2A для съемок в полярных районах // Материалы XXII Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015.- С.190-193.
7. Краснов А.А., Соколов А.В. Методика и программное обеспечение камеральной обработки аэрогравиметрических измерений // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2013. - № 27. - С.487-491.
8. 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 // В сб.: Г.Б.Вольфсон, В.Г.Пешехонов «Применение гравиинерциальных технологий в геофизике». - С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2002.- С. 33–44.
9. Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 26-34.
10. 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.

11. Краснов А.А., Одинцов А.А., Семенов И.В. Система гироскопической стабилизации гравиметра // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 4. – С. 54-69.
12. Железняк Л.К., Краснов А.А., Соколов А.В. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра «Чекан-АМ» // Физика Земли. - 2010. - № 7. - С. 29-32.

Abstract. A new mathematical software set for gravimeter «Chekan-AM» is discussed. The structure of the mathematical software consisting of both real-time programs and post-processing program set is given. The main algorithms and features of data processing applied to data obtained when carrying out marine and gravimetric surveys with gravimeter «Chekan –AM» are presented.

Key words: gravimeter, mathematical software, data processing

Материал поступил 27.04.2015