

© А.А. Симанов, 2008

УДК 550.831.017

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

## **ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ**

**Введение.** В настоящее время для обработки, интерпретации и комплексного анализа геолого-геофизических данных на ЭВМ, наряду с широким использованием специализированных автоматизированных систем (например, использующихся во всем мире программных продуктов GeoSoft), интенсивное развитие получили геоинформационные системы (ГИС) [1]. При решении практических задач заметно возрос интерес к возможностям ГИС и, главное, появилось понимание того, что многие прикладные задачи решаются значительно эффективнее с применением геоинформационных технологий. Анализ места ГИС среди других автоматизированных систем показал, что комплексная автоматизированная обработка информации в ГИС не имеет прямых аналогов с технологией обработки в других системах. В то же время геоинформационные системы сочетают в себе на разных этапах преобразования информации обкатанные элементы технологий систем автоматизации проектирования, экспертных систем, а также специализированных автоматизированных систем. Требуется лишь стыковка дополнительно используемых программных модулей, предназначенных для решения наиболее актуальных для разработчика задач, с этой интегрированной системой – Геоинформсистемой [2].

**Подсистема первичной обработки.** В рамках описанного выше подхода в Горном институте УрО РАН г. Пермь разработана информационно-аналитическая система (ИАС) хранения, обработки и анализа данных крупномасштабных гравиметрических съемок на базе лицензированного продукта ГИС ArcGIS версии 9.0 (ESRI).

Одной из важных частей созданной ИАС является подсистема первичной обработки гравиметрических данных, решающая следующие задачи:

- первичная обработка гравиметрических данных;
- введение различного рода поправок;
- вычисление аномальных значений силы тяжести;
- создание каталогов гравиметрических пунктов;
- подготовка данных для внесения в базу данных;
- построение графиков, карт и др.

Первичная обработка гравиметрических данных осуществляется набором программных модулей, реализующих увязку полевых гравиметрических данных; введение различного рода поправок; вычисление аномальных значений силы тяжести с созданием каталогов гравиметрических пунктов и построение карт.

**Вычисление аномальных значений силы тяжести и создание каталога.** При вычислении аномальных значений силы тяжести и создании каталогов гравиметрических пунктов используется модуль «Catalog». Алгоритм вычисления аномалий силы тяжести включает вычисления географических координат (поскольку обычно известны прямоугольные координаты гравиметрических пунктов), нормального поля силы тяжести и собственно аномалий. Исходными данными служат массивы координат пунктов и наблюдаемых значений силы тяжести. Кроме того вводятся массивы поправок  $\delta g_p$  за влияние рельефа окружающей местности, вычисленные в отдельном модуле.

Результаты вычислений представляют собой готовый каталог гравиметрических пунктов в формате *shp*-файла (точечная тема) со следующими атрибутивными полями:

- географические и прямоугольные координаты пунктов наблюдений;
- нормальное гравитационное поле;
- аномалии Фая;
- поправка за влияние рельефа с плотностью промежуточного слоя 2,67;
- аномалии Буге для плотности промежуточного слоя 2,67 с поправкой за рельеф и без нее;
- аномалии Буге с реальной плотностью промежуточного слоя с поправкой за рельеф и без нее.

С помощью встроенных модулей ArcGis (Spatial Analyst, Алгебра карт) реализуется построение различных карт в растровых форматах GRID (рис.1).

**Определение топографических поправок за рельеф местности.** Одной из самых трудоемких процедур при обработке результатов полевых гравиметрических измерений является введение поправок за влияния окружающего рельефа местности, учет которого, согласно действующей «Инструкции по гравиразведке», должен осуществляться в радиусе 200 км (для масштабов 1:50 000 и мельче).

При традиционном подходе к определению  $\delta g_p$  вследствие необходимости подготовки и ввода в ЭВМ массивов высотных отметок большой размерности, особенно в центральной зоне радиусом 100–300 м, признано целесообразным использование вычислительных средств. Вычисление поправки за влияние центральной зоны осуществляется вручную с использованием крупномасштабных карт рельефа [3] либо материалов радиального

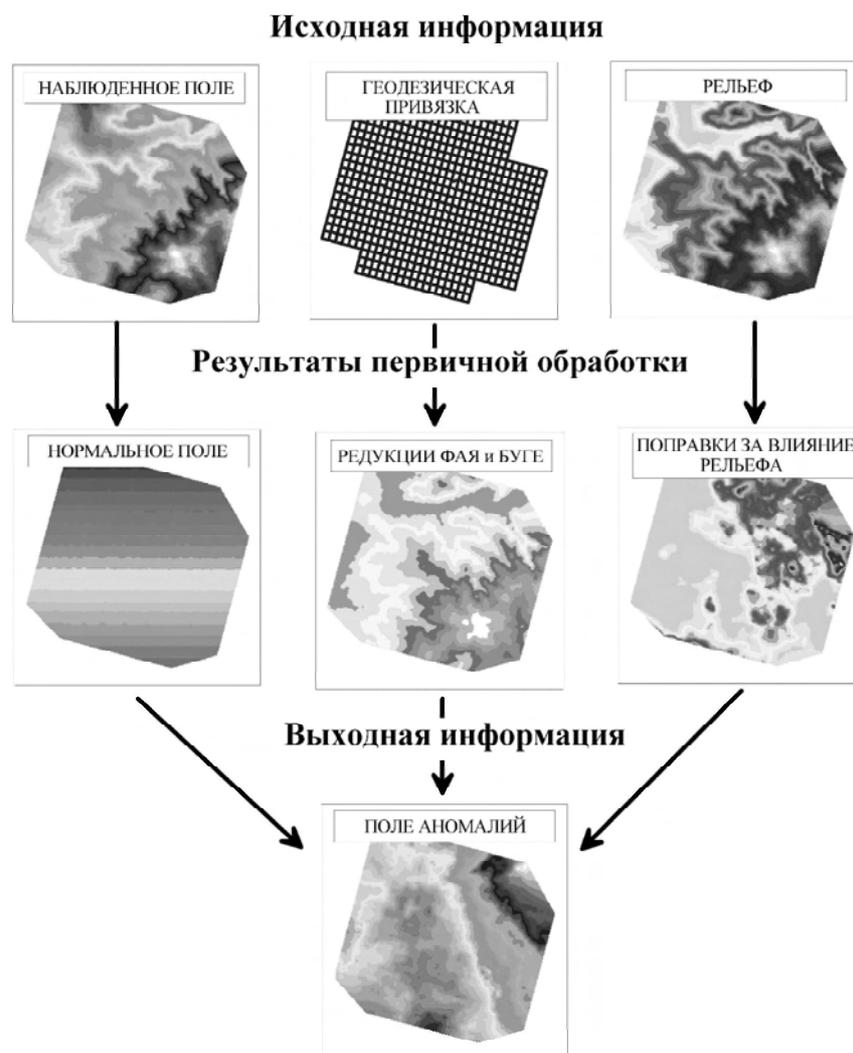


Рис.1. Блок-схема первичной обработки гравиметрических данных

нивелирования вокруг пунктов (метод «звездочек»). Для определения поправок в дальних зонах составляются матрицы высот, снятых вручную с топографических карт крупного и среднего масштабов; как правило, после вычисления значений  $\delta g_p$  в узлах квадратной сети производится интерполяция значений поправок в пункты гравиметрических наблюдений. Таким образом, вся процедура учета влияния рельефа местности весьма трудоемка и занимает, согласно нормам, не менее половины времени камеральных работ. Кроме того, при таком подходе точность аппроксимации рельефа может быть достаточно низкой.

Развитие вычислительной и периферийной техники, а также современного программного обеспечения и ГИС-технологии позволяет осуществить принципиально новый подход к учету влияния рельефа поверхности Земли при вычислении аномалий Буге с использованием новых источников информации.

Для определения поправок  $\delta g_p$  за влияние рельефа местности при гравиметрической съемке разработан отдельный модуль, который позволяет решать следующие задачи:

- построение аналитической модели рельефа (АМР) на основе исходной цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ);
- вычисление и суммирование топографических поправок  $\delta g_p$ ;
- выполнение оценки точности определения топографических поправок.

Для построения АМР, а также для высокоточного вычисления поправки  $\delta g_p$  необходимо использовать высокоточные цифровые модели рельефа большой размерности. В настоящее время основными способами получения данных о рельефе местности для решения поставленных задач являются:

- топографо-геодезические работы (топографические высоты пунктов гравиметрических наблюдений, метод «звездочек»);
- использование крупномасштабных топографических карт (картографические высоты точек цифровой модели рельефа);
- применение Internet-ресурсов.

Бурное развитие спутниковой геодезии и сети Интернет в последние годы обеспечило создание принципиально новых ЦМР, отличающихся высокой детальностью описания рельефа местности.

Наибольшее практическое значение для разведочной геофизики получил проект NASA по измерению высот земной поверхности с помощью спутникового радиointерферометра SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Через Интернет свободно можно получить доступ к архивам данных о высотах рельефа поверхности Земли с шагом 3 угловые секунды почти на всю поверхность материков. В частности, для территории Пермского края цифровая модель рельефа, построенная по данным радиointерферометра – ЦМР<sub>SRTM</sub>, представляет собой матрицу размером ~7000 строк, ~5000 столбцов, с расстояниями между узлами сети высотных отметок ~50 м по широте, ~90 м – по долготе.

С целью оценки возможности использования ЦМР<sub>SRTM</sub> для учета влияния рельефа местности при гравиметрических наблюдениях нами выполнен ряд вычислительных экспериментов.

Для трех площадей Западного Урала, характеризующихся различными типами рельефа земной поверхности и разной степенью залесенности, были определены расхождения между топографическими высотами (полученными инструментальным путем для пунктов гравиметрических наблюдений) и высотами, представленными в ЦМР<sub>SRTM</sub> (табл. 1).

Таблица 1

Номер площади	Диапазон высот, м	Заселенность, %	Разница между топографическими высотами и высотами ЦМР <sub>SRTM</sub> , м			
			Минимум	Максимум	Среднее	СКО
1	173–460	95	–46,38	34,32	–4,3	±5,21
2	133–350	50	–27,33	25,56	1,05	±4,92
3	10–149	25	–23,20	13,18	–2,61	±4,06

Очевидно, что среднеквадратические ошибки, характеризующие точность отображения высот на ЦМР<sub>SRTM</sub>, сопоставимы с ранее полученными автором оценками для ЦМР, построенных путем векторизации карт 1:50 000 масштаба и составляющими около ±6 м (т.е. примерно 0,5 сечения горизонталей рельефа) [4]. Результаты экспериментов показали, что ЦМР, подготовленные средствами ГИС с использованием Интернет-ресурсов, позволяют получать вполне достоверные сведения о форме земной поверхности. Показатели точности описания рельефа ЦМР<sub>SRTM</sub> не ниже точности представления рельефа на государственных топографических картах масштаба 1:50 000.

Следовательно, можно рекомендовать применение ЦМР<sub>SRTM</sub> в качестве исходных данных для учета поправок  $\delta g_p$  за влияние рельефа местности в радиусе более 1 км от гравиметрического пункта, при этом погрешности определения поправок не превысят ±(0,01–0,02) мГал.

Значение топопоправки в точке  $P(x_p, y_p, z_p)$  определяется выражением

ем  $\delta g_p(x_p, y_p, z_p) = \sigma_s \sum_{i=1}^M g_{\text{пар}}$ , где  $\sigma_s$  – плотность промежуточного слоя;  $g_{\text{пар}}$  –

гравитационный эффект единичного параллелепипеда при плотности  $\delta = 1$  г/см<sup>3</sup>;  $M$  – количество параллелепипедов. Вычисление  $g_{\text{пар}}$  выполняется по формуле Ремпеля [5]:

$$g_{\text{пар}} = \frac{\lambda}{dR} \left[ \sqrt{(z - z_p)^2 + (R + 0,5d)^2} - \sqrt{(z - z_p)^2 + (R - 0,5d)^2} + d \right],$$

где  $R = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 - 0,075d^2}$ ;  $x, y, z$  – координаты центра основания параллелепипеда;  $d$  – шаг матрицы высот;  $\lambda$  – гравитационная постоянная.

Алгоритм вычисления  $\delta g_p$  базируется на построении линейных аналитических аппроксимаций рельефа поверхности Земли, что было впервые предложено академиком В.Н. Страховым [6]. Необходимость аппроксимации обусловлена объективно существующими различиями высотных отметок на топографических картах и высот пунктов гравиметрических наблюдений, полученных инструментально [7]. Аналитическая модель рельефа в общем случае представляет собой не значения высот, а некоторый набор параметров сложной функциональной зависимости, которая с необходимой

точностью определяет взаимосвязь высотной отметки  $z$  произвольно заданной точки земной поверхности и ее горизонтальных координат  $x, y$ .

Построение АМР позволяет минимизировать различия «инструментальных» и «топографических» высот путем «проецирования» нерегулярной сети точек измерений поля силы тяжести  $(x_p, y_p, z_p)$  на поверхность рельефа, а также оптимизировать сам процесс вычислений. Ее неоспоримое преимущество – возможность восстановления значений высот рельефа  $z$  в узлах произвольной сети точек.

В качестве системы аппроксимирующих рельеф функций  $z \approx \psi(x, y, c_0, c_1, \dots, c_n)$  выбираются тригонометрические функции, а далее используется представление высотных отметок  $z$  отрезком двойного ряда Фурье:

$$z \approx \psi(x, y) = \sum_{u=0}^P \sum_{v=0}^Q C_{uv} \exp\left(-2\pi i \left[\frac{ux}{L_x} + \frac{vy}{L_y}\right]\right),$$

где  $L_x, L_y$  – линейные размеры исследуемой площади по осям координат  $OX$  и  $OY$  соответственно;  $C_{uv}$  – коэффициенты Фурье;  $u = 0, 1, 2, \dots, P$ ;  $v = 0, 1, 2, \dots, Q$ ;  $P, Q$  – номера граничных гармоник спектра Фурье.

При расчете коэффициентов  $C_{uv}$  применяется алгоритм БПФ, существенно ускоряющий решение задачи на компьютере:

$$C_{uv} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z_{mn} \exp\left(-in v \frac{2\pi}{N}\right) \right] \exp\left(-imu \frac{2\pi}{M}\right),$$

т.е. двумерное дискретное преобразование Фурье сводится к последовательному вычислению одномерных преобразований сначала для строк, а затем для столбцов матрицы  $\{z\}$ .

Известно, что наибольшая точность аппроксимации будет обеспечиваться при выборе  $P_{\max} = M/2, Q_{\max} = N/2$  [8]. Для оптимизации вычислительного процесса производится усечение ряда Фурье (выбор необходимых значений  $P < P_{\max}$  и  $Q < Q_{\max}$ ), при этом число  $K_{\text{отб}}$  отброшенных коэффициентов  $C_{uv}$  выбирают в зависимости от характеристики расчлененности рельефа – среднеквадратического отклонения (СКО) высот  $\sigma$  и требуемой точности  $\Delta$  вычисления топопоправок  $\delta g_p$ .

С целью определения статистической зависимости  $K_{\text{отб}} = \varphi(\sigma, \Delta)$  произведена серия вычислительных экспериментов. Исходные данные – пять ЦМР<sub>SRTM</sub> с различной дисперсией высот (табл. 2.).

В каждом цикле экспериментов выполнялась аппроксимация ЦМР двойным тригонометрическим рядом Фурье при различных параметрах  $P, Q$  и рассчитывались топографические поправки  $\delta g_p$  в радиусе от 1 до 10 км с использованием построенной АМР.

Таблица 2

Номер ЦМР	Характеристика рельефа местности, м			
	Минимум	Максимум	Среднее	СКО
1	77,9	309,5	164,3	±45,1
2	77,1	451,9	207,4	±67,0
3	115,6	677,9	311,2	±100,5
4	231,3	1355,8	622,4	±201,0
5	48	1622,1	586,0	±359,9

Установлено, что выражение, определяющее обобщенную регрессионную зависимость  $K_{\text{отб}} = \varphi(\sigma, \Delta)$ , имеет вид  $\ln(K_{\text{отб}}) = a + b\sigma + c\Delta^{0,5}$ , где  $a = -9,773$ ,  $b = 0,018$ ,  $c = 0,417$  – коэффициенты, рассчитанные методом наименьших квадратов. Графически эта зависимость показана на рис. 2.

Рассмотрим пример, демонстрирующий возможности алгоритма. Использовалась модель рельефа одной из площадей Западного Урала со следующими характеристиками: размер матрицы  $300 \times 300$ ; перепад высот 500 м; СКО высот  $\sigma \sim 150$  м. В результате применения алгоритма АМР составлена на основе исходной модели рельефа по 45 гармоникам, т. е. 70% отброшенных коэффициентов ряда Фурье; при этом погрешность аппроксимации  $\pm 3,5$  м, точность определения топографических поправок на основе АМР  $\pm 0,02$  мГал (рис. 3).

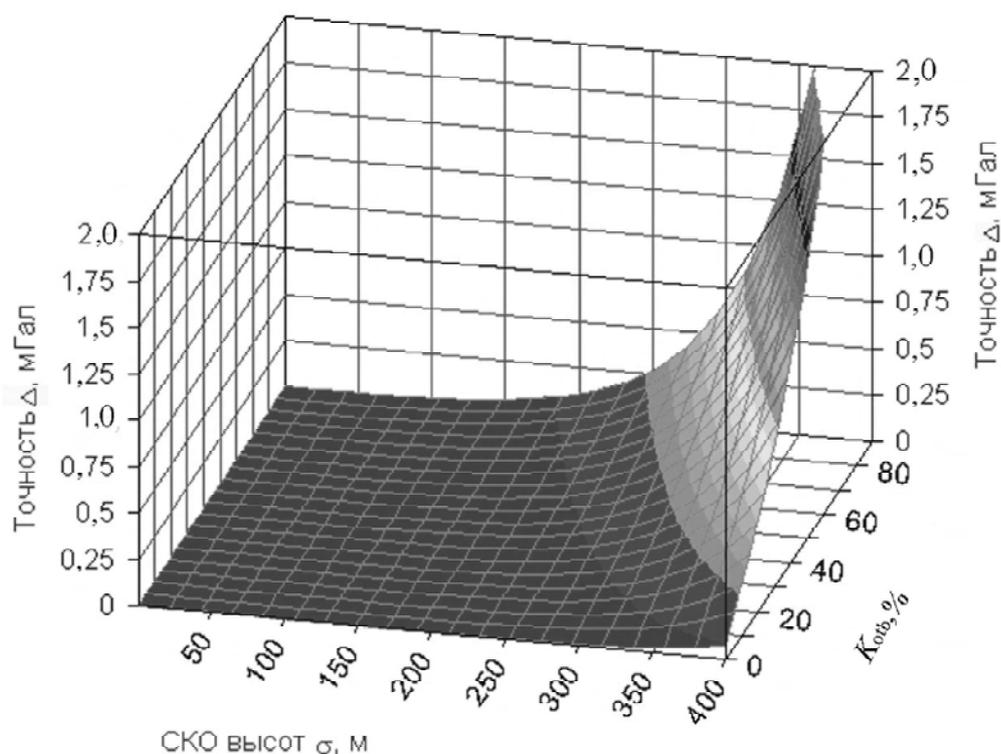


Рис. 2. Зависимость точности определения топопоправок  $\Delta$  от показателя расчлененности рельефа  $\sigma$  и количества  $K_{\text{отб}}$  отброшенных членов двойного ряда Фурье (для подобласти, ограниченной радиусами 1 – 10 км)

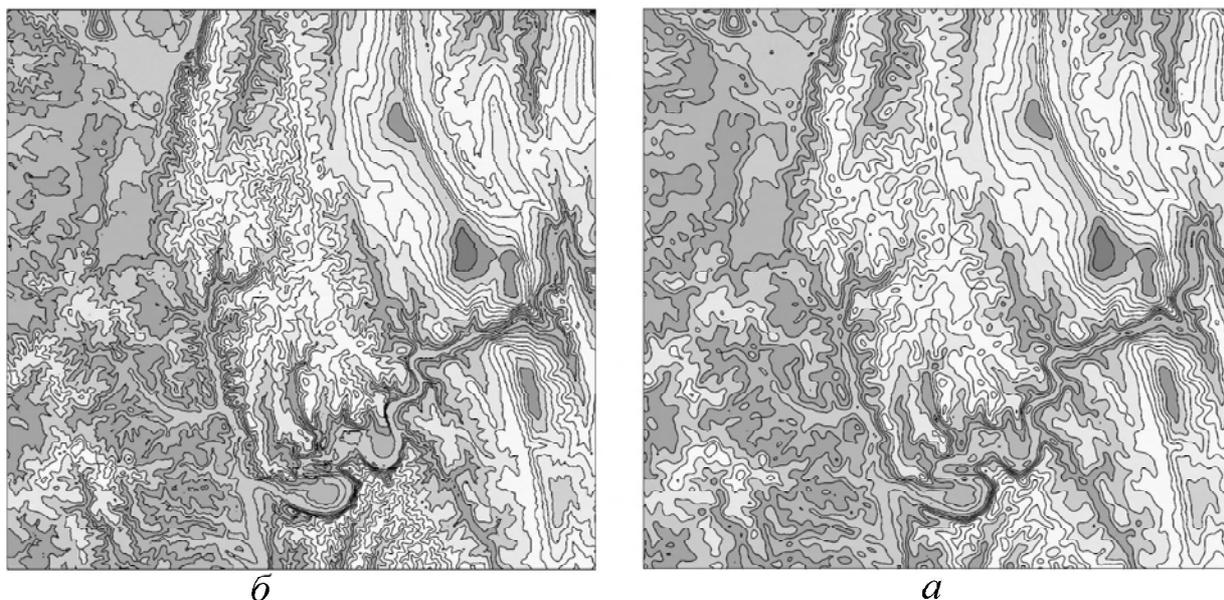


Рис. 3. Построение аналитической модели рельефа. *a* – исходная модель; *б* – восстановленная модель

Представленный практический пример убедительно свидетельствует, что для определения топографических поправок  $\delta g_p$  с точностью  $\Delta = \pm 0,02$  мГал в условиях Передовых складок Западного Урала, где СКО высотных отметок рельефа достигает  $\pm 250$  м, достаточно осуществлять построение АМР с использованием не более 50 % коэффициентов Фурье. Это влечет за собой существенное (приблизительно на порядок) увеличение скорости вычисления поправок  $\delta g_p$  для исследуемой территории при сохранении требуемой точности  $\Delta$ .

Созданная для всего региона исследований аналитическая модель рельефа может затем многократно использоваться при вычислении поправок за рельеф на других площадях гравиметрических работ. При этом АМР исследуемой площади строится с учетом полученной зависимости  $K_{\text{отб}} = \varphi(\sigma, \Delta)$  и с заданным шагом матрицы  $d$ . Построенная АМР может использоваться не только для определения топографических поправок  $\delta g_p$ , но и для решения разнообразных геоморфологических задач.

Оценка погрешности определения поправок за влияние рельефа местности может проводиться в двух вариантах и осуществляться для всех гравиметрических пунктов, расположенных в пределах исследуемой площади.

В первом варианте с помощью генерации серий случайных чисел моделируются произвольно ориентированные в пространстве отклонения гравиметрических пунктов в плане от их истинного местоположения [9]. Предполагается, что по каждой из координат  $x$  и  $y$  эти смещения происходят независимо, амплитуды смещений распределяются по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием  $M = 0$  и заданным СКО высот  $\delta$ . Смещения пунктов в плане приводят к появлению соответствующих оши-

бок высот  $z_p$  этих пунктов, т. е. моделируются погрешности вычисления поправок за влияние рельефа, обусловленные отклонениями в планово-высотной привязке пунктов измерений поля силы тяжести.

Во втором варианте с помощью генерации серий случайных чисел моделируются произвольно ориентированные в пространстве отклонения высот  $\Delta z$  ЦМР от их первоначальных значений, т. е. исходная матрица рельефа осложнялась помехой  $\pm \Delta z$ . Амплитуды отклонений высот распределяются по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием  $M = 0$  и заданным СКО. В данном случае амплитуда помехи  $\pm \Delta z$  обусловлена погрешностями значений высот, т. е. точностью описания рельефа поверхности Земли на исходной ЦМР.

**Заключение.** На основе созданной подсистемы (модули «Catalog», «Расчет топопоправок» и др.) и современных ГИС-технологий на новом уровне решается задача первичной обработки данных крупномасштабных гравиметрических съемок, при этом все перечисленные возможности существенно упрощают технологию и снижают вычислительные затраты, что влечет за собой уменьшение трудоемкости этапа обработки гравиметрических данных.

Работа выполнена при поддержке Уральского отделения РАН (по результатам конкурса научных проектов молодых ученых и аспирантов 2007 г.) и РФФИ (грант № 07-05-96011).

1. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемсина Е.Н. Геоинформационные системы. – М.: Информ. центр ВНИИгеосистем, 2005. – 345 с.
2. Ломтадзе В.В. Программное и информационное обеспечение геофизических исследований. – М.: Недра, 1993. – 268 с.
3. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях // Обзор ВИЭМС. Сер. Регион. развед. и промысл. геофизика. – 1974. – 90 с.
4. Симанов А.А. Картографические погрешности при обработке геофизических данных: причины возникновения и оценка // Шестая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сб. науч. материалов. – Пермь, 2005. – С. 213–217.
5. Ремпель Г.Г. Актуальные вопросы методики введения поправок, связанных с рельефом местности, с данными гравиразведки и магниторазведки // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1980. – № 12. – С. 75–89.
6. Страхов В.Н., Керимов И.А., Страхов А.В. Линейные аналитические аппроксимации рельефа поверхности Земли // Геофизика и математика: Материалы 1-й Всерос. конф. – М., 1999. – С. 199–212.
7. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Антипин В.В. Определение топографических поправок при гравиметрических наблюдениях на основе аналитических аппроксимаций рельефа // Геоинформатика. – 2003. – № 1. – С. 33–42.
8. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 575 с.
9. Долгаль А.С. Моделирование погрешностей учета влияния рельефа при гравиметрической съемке // Изв. РАН Сер. Физика Земли. – 1997. – № 8. – С. 88–93.