

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 δg_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 δg_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

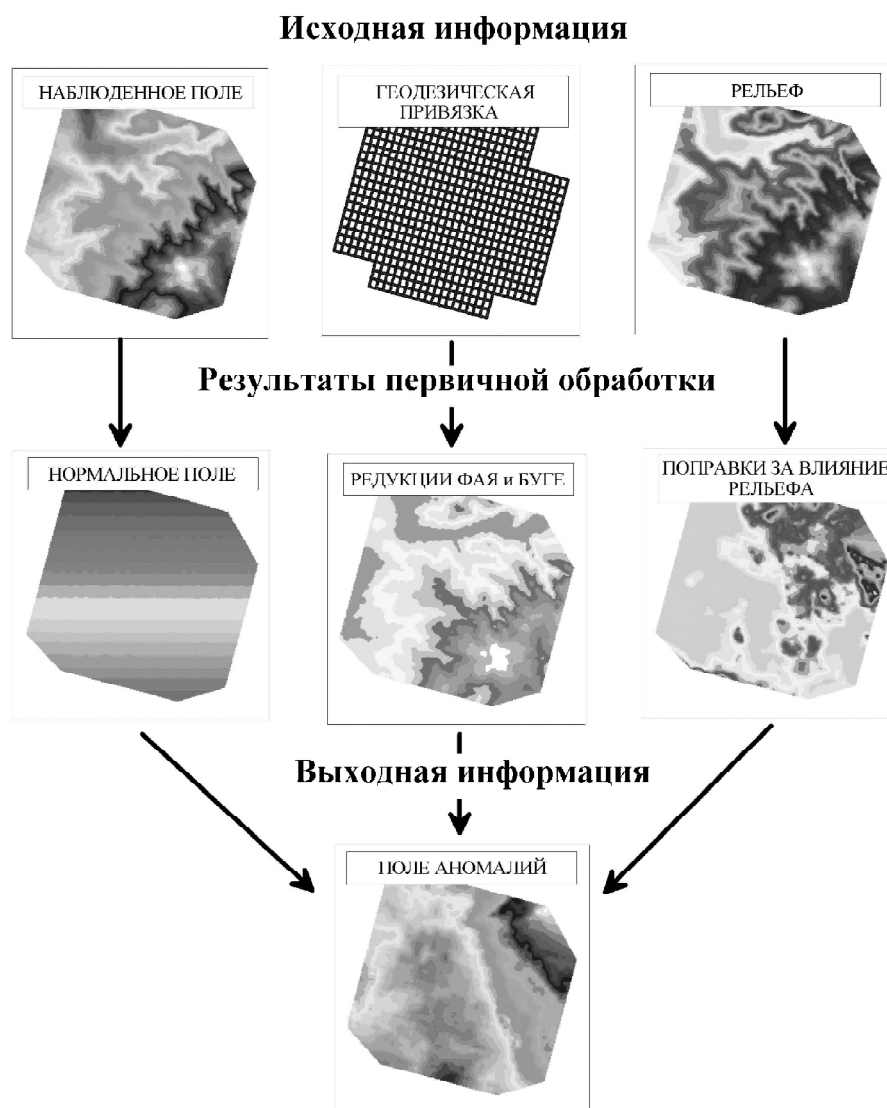


Рис.1. Блок-схема первичной обработки гравиметрических данных

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 δg_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 δg_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 δg_p ;
- выполнение оценки точности определения топографических поправок.

Для построения АМР, а также для высокоточного вычисления поправки δg_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_{SRTM}, 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_{SRTM} 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_{SRTM} (табл. 1).

Таблица 1

Номер площади	Диапазон высот, м	Заселенность, %	Разница между топографическими высотами и высотами ЦМР _{SRTM} , 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_{SRTM}, 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_{SRTM} не ниже точности представления рельефа на государственных топографических картах масштаба 1:50 000.

Следовательно, можно рекомендовать применение ЦМР_{SRTM} в качестве исходных данных для учета поправок δg_p за влияние рельефа местности в радиусе более 1 км от гравиметрического пункта, при этом погрешности определения поправок не превысят $\pm(0,01-0,02)$ мГал.

Значение топопоправки в точке $P(x_p, y_p, z_p)$ определяется выражением $\delta g_p(x_p, y_p, z_p) = \sigma_s \sum_{i=1}^M g_{\text{пар}}$, где σ_s – плотность промежуточного слоя; $g_{\text{пар}}$ – гравитационный эффект единичного параллелепипеда при плотности $\delta = 1$ г/см³; M – количество параллелепипедов. Вычисление $g_{\text{пар}}$ выполняется по формуле Ремпея [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; λ – гравитационная постоянная.

Алгоритм вычисления δg_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 σ и требуемой точности Δ вычисления топопоправок δg_p .

С целью определения статистической зависимости $K_{\text{отб}} = \varphi(\sigma, \Delta)$ произведена серия вычислительных экспериментов. Исходные данные – пять ЦМР_{SRTM} 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 δg_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	$\pm 45,1$
2	77,1	451,9	207,4	$\pm 67,0$
3	115,6	677,9	311,2	$\pm 100,5$
4	231,3	1355,8	622,4	$\pm 201,0$
5	48	1622,1	586,0	$\pm 359,9$

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 300×300 ; 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).

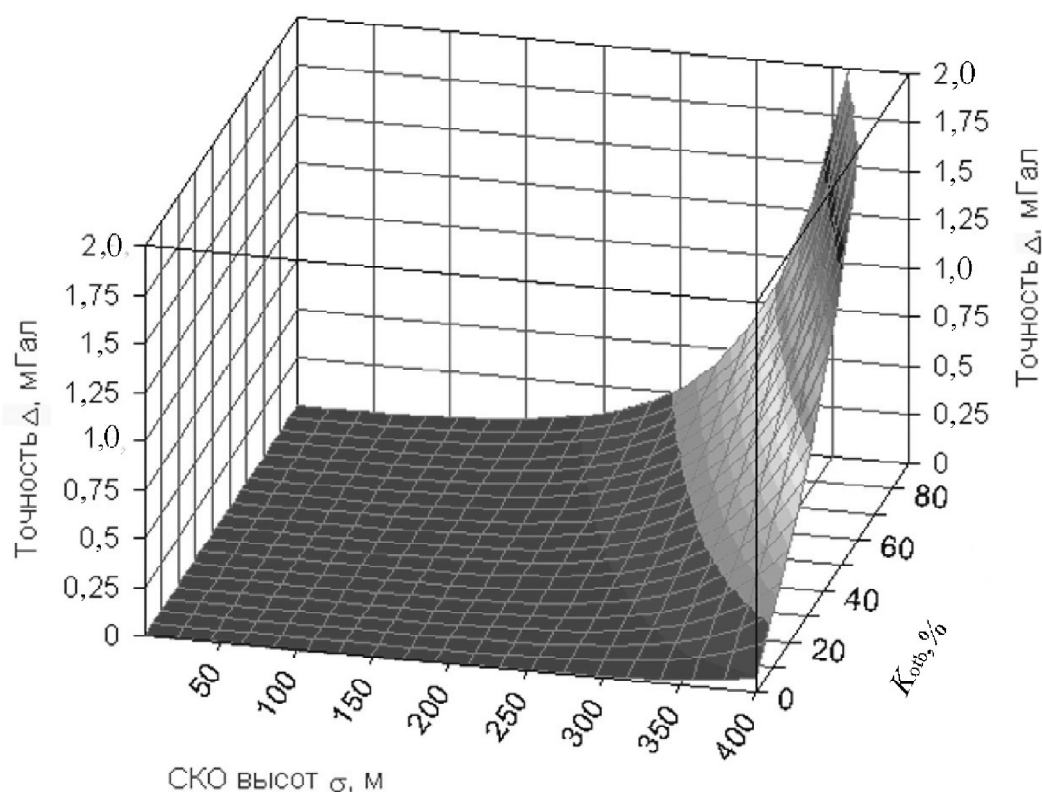


Рис. 2. Зависимость точности определения топопоправок Δ от показателя расчлененности рельефа σ и количества $K_{\text{отб}}$ отброшенных членов двойного ряда Фурье (для подобласти, ограниченной радиусами 1 – 10 км)

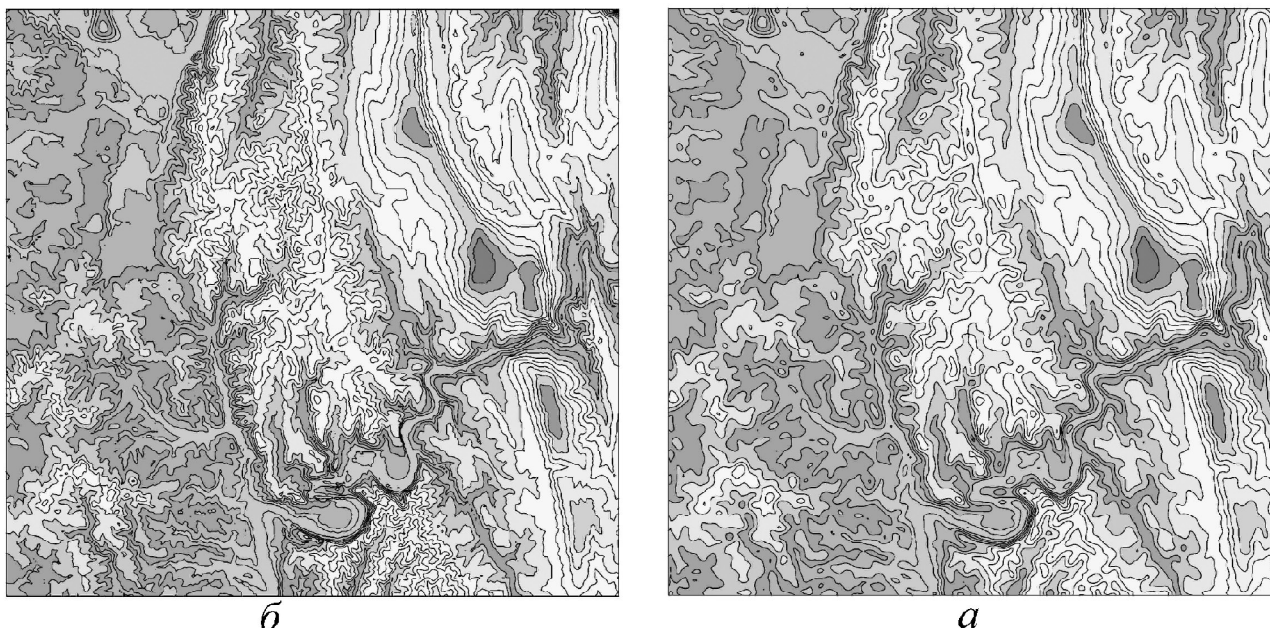


Рис. 3. Построение аналитической модели рельефа. *a* — исходная модель; *б* — восстановленная модель

Представленный практический пример убедительно свидетельствует, что для определения топографических поправок δg_p с точностью $\Delta = \pm 0,02$ мГал в условиях Передовых складок Западного Урала, где СКО высотных отметок рельефа достигает ± 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 δg_p для исследуемой территории при сохранении требуемой точности Δ .

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 δg_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 δ . 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 Δz 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.