

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

MODERN MARINE GRAVIMETRY

L. ZHELEZNYAK, V. SOLOVYEV, P. MIKHAILOV

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

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

УДК 550.831

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ³

д-р геол.-минерал. наук С.Г. БЫЧКОВ,

д-р физ.-мат. наук А.С. ДОЛГАЛЬ

(Горный институт Уральского отделения РАН, Россия);

д-р техн. наук В.И. КОСТИЦЫН

*(Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия);*

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

(Горный институт Уральского отделения РАН, Россия)

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

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

Ключевые слова: гравиметрия, обработка данных, аномалии Буге.

В гравиметрии основными исходными данными для получения информации о форме Земли и о геологическом строении территорий являются аномалии силы тяжести в редукции Фая или Буге [9]. Очевидно, что они должны быть свободны от всех помех негеологического характера.

Напомним основную формулу вычисления аномалий силы тяжести в редукции Буге (Δg_B) [3]:

$$\Delta g_B = g_{\text{набл}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{Фая}} - \delta g_{\text{пр.сл}} + \delta g_{\text{рф}}, \quad (1)$$

где $g_{\text{набл}}$ – наблюдаемое значение силы тяжести в гравиметрическом пункте на высоте H ;

γ_0 – нормальное значение силы тяжести, вычисляемое по формуле Ф. Гельмерта (1901–1909 гг.);

$\delta g_{\text{Фая}} = 0.3086H$ – поправка за высоту (свободный воздух или Фая), выведенная в предположении, что Земля является шаром;

$\delta g_{\text{пр.сл}} = 0.0419\sigma H$ – поправка за промежуточный слой представляющий собой плоскопараллельную горизонтальную пластину с постоянной плотностью σ ;

$\delta g_{\text{рф}}$ – поправка за влияние окружающего рельефа, т.е. отклонения физической поверхности Земли от плоскости. Процедуры редуцирования стандартизированы и обязательны для всех организаций, проводящих гравиметрические работы [5–6].

Принятые процедуры вычисления аномалий Буге, описанные в учебниках по геофизике и вошедшие в Инструкцию по гравиразведке [5] и Правила проведения гравиразведочных работ [6], формализовались в 1920–1930-е годы. Параметры формул опирались на известные в то время сведения о форме Земли, абсолютном значении силы тяжести и минимизировали вычислительные затраты. Несмотря на допущения и упрощения, эти процедуры с минимальным изменением продолжают использоваться и поныне для решения большого круга геолого-геофизических и геодезических задач.

В настоящее время произошли принципиальные изменения в аппаратном оснащении гравиметрических исследований. Если ранее при работе с гравиметрами ГНУ-КВ и оптическими нивелирами среднеквадратическая погрешность определения аномалий Буге составляла ± 0.10 – 0.15 мГал, то с современными гравиметрами, системой GPS и электронными тахеометрами погрешность составляет ± 0.02 – 0.04 мГал при точности определения наблюдаемых значений силы тяжести ± 0.005 – 0.015 мГал [1]. Существенным обра-

зом возросли наши знания о форме Земли, создана мировая опорная гравиметрическая сеть, в открытом доступе имеются детальные базы данных о фигуре геоида и рельефе Земли и, учитывая современные вычислительные мощности, нет никаких причин для применения упрощенных формул при вычислении поправок и редукиций в гравиметрические наблюдения.

Здесь необходимо отметить, что издания, ориентированные на геодезистов [8–9], как правило, отмечают недостатки формулы (1), а учебники и справочники по гравиразведке [3] крайне редко фиксируют упрощения, принятые в стандартных процедурах редуцирования.

Нами выполнен критический анализ существующих стандартов редуцирования полевых гравиметрических данных [2]. Показано, что повышение точности современных гравиметрических съемок требует пересмотра стандартных процедур редуцирования наблюдаемых значений силы тяжести. Предложены новые формулы для вычисления нормального гравитационного поля и его вертикального градиента, которые базируются на современных данных о фигуре Земли. Показаны ошибки, обусловленные заменой сферического промежуточного слоя плоскопараллельным. Обосновано использование эллипсоидальных высот при обработке гравиметрических данных, поскольку высоты гравиметрических пунктов определяются в России и в Беларуси в Балтийской системе, т.е. как превышение относительно поверхности геоида (уровня моря), в то время как нормальное гравитационное поле вычисляется на уровне эллипсоида.

Современные процедуры редуцирования

Предлагаются следующие модификации процедур редуцирования.

1. Нормальное значение силы тяжести:

$$\gamma_0 = 978032.84 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi), \quad (2)$$

где φ – широта гравиметрического пункта.

2. Поправка в значение нормальной силы тяжести за притяжение атмосферы:

$$\delta\gamma_a = 0.87e^{-0.116H^{1.047}}, \quad (3)$$

где H – высота пункта.

3. Вертикальный градиент силы тяжести (поправка в свободном воздухе):

$$\delta g_h = (0.3087727654 + 0.0004308698 \sin^2 \varphi)H - 7.21252 \times 10^{-8} H^2. \quad (4)$$

4. Поправка за промежуточный слой (формула Г.Г. Ремпеля [7]):

$$\delta g_{сф.сл} = 2\pi f \sigma \left(\begin{array}{l} \frac{1}{3R^2} (R^3 - R_0^3 + dL - d_0L_0) - \\ - R \sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \frac{d + R - R \cos \alpha}{d_0 + R_0 - R \cos \alpha} \end{array} \right), \quad (5)$$

где R_0 – радиус Земли, $R = R_0 + H$, $\alpha = S/R_0$ – телесный угол сферического сегмента, S – радиус сферического сегмента,

$$d = \sqrt{R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \alpha} = R\sqrt{2(1 - \cos \alpha)},$$

$$d_0 = \sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \alpha},$$

$$L = R^2 + R^2 \cos \alpha + 3R^2 \cos^2 \alpha - 2R^2 = R^2 (\cos \alpha + 3 \cos^2 \alpha - 1),$$

$$L_0 = R_0^2 + RR_0 \cos \alpha + 3R^2 \cos^2 \alpha - 2R^2.$$

Вычисление поправок за влияние рельефа является самой трудоемкой операцией при вычислении аномалий силы тяжести. Трудности связаны, прежде всего, с необходимостью создания детальной цифровой модели рельефа (ЦМР) для решения прямой задачи гравиразведки. Очевидно, что широко используемое ранее ручное снятие высот с топографических карт в узлах тех или иных палеток, применяемых для вычисления аномальных эффектов, не может обеспечить необходимую детальность построения ЦМР.

Нами предлагается технология вычисления поправок за рельеф местности при гравиметрических наблюдениях, которая базируется на автоматизированных методах подготовки первичной картографической информации и на современном математическом аппарате. Таким аппаратом являются линейные аналитические аппроксимации дискретно заданных функций, описывающих аномальное гравитационное поле и рельеф поверхности Земли [10]. В качестве исходной информации о рельефе местности используются результаты векторизации скан-образов крупномасштабных топографических карт и модели рельефа GTOPO30 и SRTM. Предложена методика вычисления поправок за влияние рельефа с учетом шарообразности Земли и алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для сферического параллелепипеда [4]. Разработанная технология характеризуется полной автоматизацией вычислений для всей области учитываемого влияния рельефа, включая центральную зону, высокой точностью определения поправок, быстротой вычислений и объективной стохастической оценкой точности результатов.

Пример вычисления аномалий силы тяжести

Рассмотрим пример вычисления аномалий силы тяжести на одном из участков гравиметрической съемки на востоке Пермского края, проведенной с нефтепоисковыми целями. Масштаб съемки 1:50 000; сеть наблюдений 1000×200 м; размеры площади примерно 18×27 км; перепад высот рельефа от 140 м до 500 м. Измерения на 2832 пунктах проведены высокоточными гравиметрами Autograv CG-5; топографо-геодезические работы выполнены с помощью спутниковой системы GPS-Глонасс Trimble-R8 и электронных тахеометров. Среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести на данной площади составила ± 0.033 мГал. Обработка полевых гравиметрических данных выполнена двумя способами: по формулам, принятым в Инструкции по гравirazведке [5] и с использованием описанных выше формул (2) – (5). Кроме того, во втором случае использовались высоты гравиметрических пунктов относительно референц-эллипсоида.

Основные характеристики расхождения величин поправок и аномалий Буге, вычисленных для данной площади различными способами, приведены в таблице. Как видно из таблицы, абсолютные величины расхождений поправок весьма существенны. Наибольшие погрешности вносят нормальное значение силы тяжести и косвенный эффект, однако они имеют региональный характер: стандартное отклонение этих величин в пределах площади минимально и практически не сказывается на морфологии локальных аномалий из-за небольших размеров площади съемки. Наибольшие относительные погрешности вносят неучет сферичности Земли при вычислении поправок в свободном воздухе и за промежуточный слой.

Таблица

Сравнение процедур редуцирования

Поправки, мГал	Расхождение поправок			
	Среднее	Минимальное	Максимальное	Стандартное отклонение
Косвенный эффект	0.768	0.741	0.822	0.018
Нормальное значение силы тяжести	-4.061	-4.065	-4.058	0.002
Поправка Фая	0.831	0.775	0.910	0.026
Промежуточный слой	-0.498	-0.849	-0.252	0.113
Поправка за атмосферу	0.843	0.822	0.857	0.007
Аномалии Буге при $\sigma = 2.67$ г/см ³	4.269	3.959	4.711	0.137

Разность аномалий Буге, вычисленных с использованием новых процедур и общепринятых стандартов редуцирования, показана на рисунке, где приведены их относительные величины. Как видно из рисунка, разность аномалий, вычисленных различными способами, достигает более 0.75 мГал, т.е. почти в 25 раз превосходит точность полевой съемки. Поскольку практически все составляющие формулы (1) зависят от высоты гравиметрического пункта, карта разности аномалий (рис., б) повторяет карту рельефа (рис., а). Тем не менее, в районе нефтеперспективной структуры – основного объекта исследований на данной площади амплитуда аномалии увеличилась на 0.15–0.20 мГал, что составляет примерно половину ожидаемого гравитационного эффекта структуры.

Возможности гравиразведки на современном этапе вступают в противоречие с существующими инструктивными требованиями к ее проведению и обработке полевых данных. Несомненно, что использование современной формулы вычисления нормального поля, а не выведенной Ф.Р. Гельмертом в 1909 г., учет влияния атмосферы и косвенного эффекта, эллипсоидальности Земли при определении вертикального градиента и промежуточного слоя, существенно повышают достоверность гравитационных аномалий. Необходимо переосмысление традиционных методик обработки гравиметрических данных и принятие процедур редуцирования, использующих принятый в России и Беларуси земной эллипсоид, современные данные о геоиде и рельефе Земли.

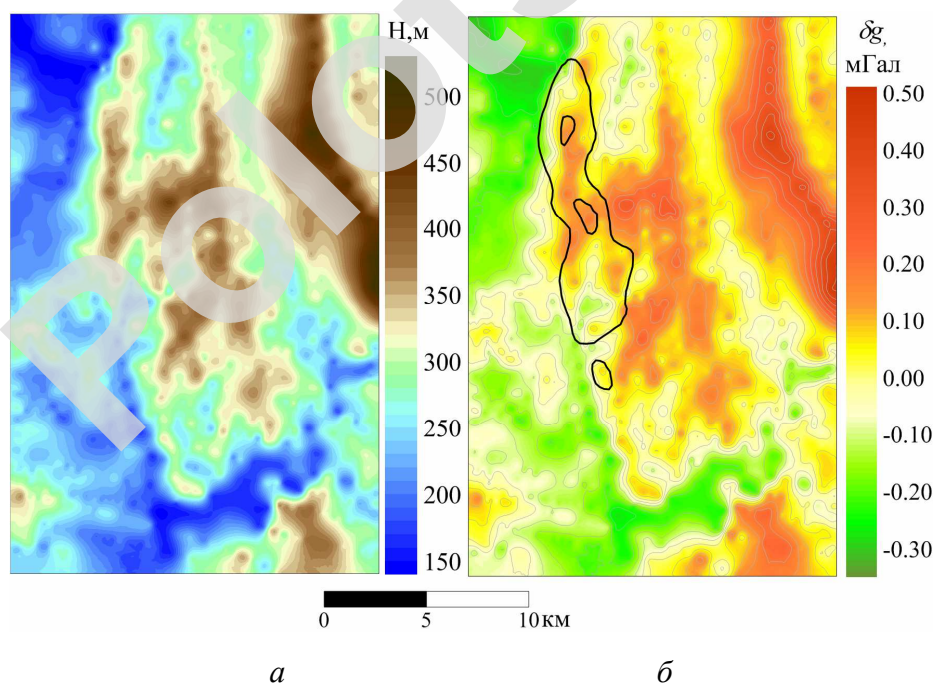


Рис. Сравнение аномалий Буге, вычисленных различным способом:
а – рельеф местности; *б* – разность аномалий
 (черной линией показан контур нефтеперспективной структуры)

Самое существенное изменение стандартных процедур редуцирования гравиметрических данных касается использования эллипсоидальных высот и учета криволинейности Земли при определении вертикального градиента и промежуточного слоя. Использование предлагаемых формул редуцирования особенно актуально при исследованиях больших площадей, поскольку существенным образом изменяется абсолютное значение и региональная составляющая гравитационного поля. Однако и для съемок на относительно небольших площадях погрешности в аномалии Буге, вносимые устаревшими процедурами редуцирования, во-первых, многократно превышают точность современной гравиметрической съемки, и, во-вторых, могут быть соизмеримы с гравитационными эффектами искомых геологических объектов.

Необходимо еще раз отметить, что в настоящее время нет никаких причин применения упрощенных формул вычисления аномалий Буге. Даже при составлении сводных гравиметрических карт с использованием ранее проведенных гравиметрических съемок, имея наблюдаемые значения силы тяжести и высоты пунктов, пересчитать аномалии Буге не составит трудностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков, С.Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии / С.Г. Бычков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2010. – 187 с.
2. Бычков, С.Г. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках / С.Г. Бычков, А.С. Долгаль, А.А. Симанов. – Пермь : УрО РАН, 2015. – 142 с.
3. Гравиразведка : справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. – М. : Недра. 1990. – 607 с.
4. Долгаль, А.С. Основные элементы технологии учета гравитационного влияния топографических масс для шарообразной Земли / А.С. Долгаль [и др.] // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 4. Вып. 28. – С. 40–46.
5. Инструкция по гравиразведке. – М. : Недра, 1980. – 79 с.
6. Правила проведения гравиразведочных работ : ТКП 14.04-06-2008 (02120) : утверждены Постановлением Минприроды РБ от 29 дек. 2008 г., № 10-Т. – Минск, 2008. – 52 с.
7. Ремпель, Г.Г. Актуальные вопросы введения поправок, связанных с рельефом местности, в данные гравиразведки и магниторазведки / Г.Г. Ремпель // Физика Земли. – 1980. – №12. – С. 75–89.
8. Шароглазова, Г.А. Гравиметрия : учеб.-метод. комплекс / Г.А. Шароглазова. – Новополюск : ПГУ, 2006. – 196 с.
9. Шимбирев, Б.П. Теория фигуры Земли / Б.П. Шимбирев. – М. : Недра, 1975. – 432 с.
10. Bychkov, S.G. Gravimetric survey terrain correction using linear analytical approximation / S.G. Bychkov, A.S. Dolgal, V.I. Kostitsyn, A.A. Simanov // Geophysical Prospecting. – 2015. – Vol. 63, № 3. – P. 727–739.

MODERN PROCEDURES REDUCTION OF HIGH-PRECISION GRAVITY DATA

*A. DOLGALEV, V. KOSTITSYN,
A. SHIMANE, V. KHOKHLOVA*

It is shown that abilities of gravitational exploration are at present contrary to existing directions for these works. We suggest new procedures of the reduction of gravity data which allows for modern data about the Earth's figure. The example of processing of gravity data observed on the Perm territory demonstrates that the application of modern procedures of processing allows increasing the information value of gravity data.

Keywords: *gravity, data processing, Bouguer anomalies.*

УДК 528.21

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ

*д-р техн. наук, проф. В.Г. БУРАЧЕК,
д-р техн. наук, проф. В.А. БОРОВОЙ,
Т.Н. МАЛИК, И.М. КОБЕРНИК*

(Университет новейших технологий, Украина)

Представлена методика определения нормальных высот, которая реализуется автоматизированным астрономическим прибором и прибором GNSS, с помощью которых измеряют астрономические и геодезические координаты рабочего астропункта.

Ключевые слова. *Нормальная высота, астрономический прибор, астрономические координаты, геодезические координаты.*

Известны способы астрономо-гравиметрического и астрономического нивелирования для определения нормальных высот [1–2]. Способ астрономо-гравиметрического нивелирования (АГН) Молоденского [1] имеет высокую точность, предусматривает определение высот квазигеоида (ВКГ) над референц-эллипсоидом с использованием астрономо-геодезических уклонений отвесной линии и данных региональной гравиметрической съемки.

Метод АГН позволяет определять астрономо-геодезические высоты квазигеоида только в астропунктах, по которым передавались превышения путем их последовательного суммирования, начиная от исходного пункта. При по-