

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕДУР ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Сергей Габриэльевич Бычков

Горный институт Уральского отделения РАН, 614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, тел. (342)216-10-08, e-mail: bsg@mi-perm.ru

Александр Сергеевич Долгал

Горный институт Уральского отделения РАН, 614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (342)216-10-08, e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Алексей Аркадьевич Симанов

Горный институт Уральского отделения РАН, 614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (342)216-10-08, e-mail: simanov@mi-perm.ru

Валерия Васильевна Хохлова

Горный институт Уральского отделения РАН, 614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, аспирант, тел. (342)216-10-08, e-mail: valxov@gmail.com

Показано, что возможности гравirazведки в настоящее время вступили в противоречие с существующими инструктивными требованиями к ее проведению. Предлагается использование новых процедур редуцирования гравиметрических данных, учитывающих современные данные о фигуре Земли. На конкретных примерах обработки данных гравиметрической съемки на территории Пермского края показано, что применение современных процедур обработки позволяет повысить информативность гравиметрических данных.

Ключевые слова: гравиметрия, обработка данных, аномалии Буге.

TESTING OF MODERN REDUCING OF HIGH-PRECISION GRAVITY SURVEY

Sergey G. Bychkov

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Russia, Perm, 78a Sibirskay St., D. Sc., Head of the Laboratory, tel. (342)216-10-08, e-mail: bsg@mi-perm.ru

Alexander S. Dolgal

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Russia, Perm, 78a Sibirskay St., D. Sc., Senior Research Fellow, tel. (342)216-10-08, e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Alexey A. Simanov

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Russia, Perm, 78a Sibirskay St., Ph. D., Research Fellow, tel. (342)216-10-08, e-mail: simanov@mi-perm.ru

Valery V. Khokhlova

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Russia, Perm, 78a Sibirskay St., A Graduate Student, tel. (342)216-10-08, e-mail: valxov@gmail.com

It is shown that the possibility of gravity has now entered into conflict with the existing guidance requirements to carry it out. It is proposed to use the new procedures reduction of gravity data, taking into account the current data on the Earth's shape. Specific examples gravimetric survey data in the Perm region shows that the application of modern processing procedures can improve the information content of gravimetric data.

Key words: gravity survey, data processing, Bouguer anomalies.

В вопросах вычисления аномалий силы тяжести, редуцирования гравиметрических данных сложилась парадоксальная ситуация. В геофизической литературе, учебниках по гравиразведке, изданных в 1950–1960-х годах, отмечалось, что существует косвенный эффект, обусловленный ундуляциями геоида, т. е. отклонениями геоида от эллипсоида, и что нормальный вертикальный градиент силы тяжести необходимо вычислять с учетом эллипсоидальности Земли. Активно обсуждались вопросы определения плотности промежуточного слоя и учета сферичности Земли, определения радиуса учета поправки за влияние рельефа. А.И. Каленицкий [4] констатирует, что еще в 1970–1980-х годах были разработаны методические рекомендации, утвержденные Министерством Геологии СССР в качестве практического руководства по существенному повышению качества редуцирования измеряемого гравитационного поля [5].

Однако Инструкция по гравиразведке, Справочник геофизика [3] и вслед за ними подавляющее большинство авторов учебников по гравиразведке приводят только формулу

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

где нормальное значение силы тяжести γ_0 вычисляется по формуле Гельмерта (1901–1909 гг.) на поверхности эллипсоида, поправка в свободном воздухе $\delta g_h = 0.3086H$, где H – высота пункта относительно геоида, поправка за промежуточный слой $\delta g_{пр.сл.} = 0.0419\sigma H$ – гравитационный эффект горизонтального слоя бесконечной протяженности с плотностью σ , поправка за влияние рельефа $\delta g_{рф}$ вычисляется в радиусе 200 км.

Нами выполнен критический анализ существующих формул редуцирования полевых гравиметрических данных [1]. 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 в Балтийской системе, т. е. как превышение относительно поверхности геоида (уровня моря), в то время как нормальное гравитационное поле вычисляется на уровне эллипсоида.

Предлагаются следующие формулы вычисления поправок в аномалии силы тяжести.

1. Нормальное значение силы тяжести:

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

где ϕ – широта гравиметрического пункта.

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

$$\delta\gamma_a = 0.87e^{-0.116H^{1.047}},$$

где H – высота пункта.

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

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

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

$$\delta g_{сф.сл} = 2\pi f \sigma \left(\frac{1}{3R^2} (R^3 - R_o^3 + dL - d_o L_o) - R \sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \frac{d + R - R \cos \alpha}{d_o + R_o - R \cos \alpha} \right),$$

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

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

$$d_o = \sqrt{R^2 + R_o^2 - 2RR_o \cos \alpha},$$

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

$$L_o = R_o^2 + RR_o \cos \alpha + 3R^2 \cos^2 \alpha - 2R^2.$$

Определение 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.

Нами разработана технология вычисления поправок за рельеф местности, которая базируется на автоматизированных методах подготовки первичной картографической информации и на современном математическом аппарате [8]. Таким аппаратом являются линейные аналитические аппроксимации дискретно заданных функций, описывающих аномальное гравитационное поле и рельеф поверхности Земли. Предложены методика вычисления поправок за влияние рельефа с учетом шарообразности Земли и алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для сферического параллелепипеда [6]. Предлагаемая 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.

Апробация предлагаемых процедур проведена на нескольких площадях гравиметрических съемок различных размеров, расположенных в разных геоморфологических условиях. Аномалии силы тяжести вычислены в двух вариантах: по традиционным формулам, принятым в Инструкции по гравиразведке, и с использованием описанных выше процедур редуцирования.

Разность аномалий силы тяжести, вычисленных различными способами, для одной из площадей приведены на рис. 1. На данной площади гравиметрическая съемка проведена с использованием гравиметров AUTOGRAV CG-5, электронных тахеометров Trimble и спутниковых систем GPS Trimble R8 по сети наблюдений 1000×200 м со среднеквадратической погрешностью определения наблюдаемых значений силы тяжести ± 0.033 мГал. Как видно из рисунка, разность аномалий достигает более 0.75 мГал, т. е. более чем в 20 раз превосходит точность полевой съемки. Поскольку практически все составляющие формулы (1) зависят от высоты гравиметрического пункта, карта разности аномалий (рис. 1, б) повторяет карту рельефа (рис. 1, 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.

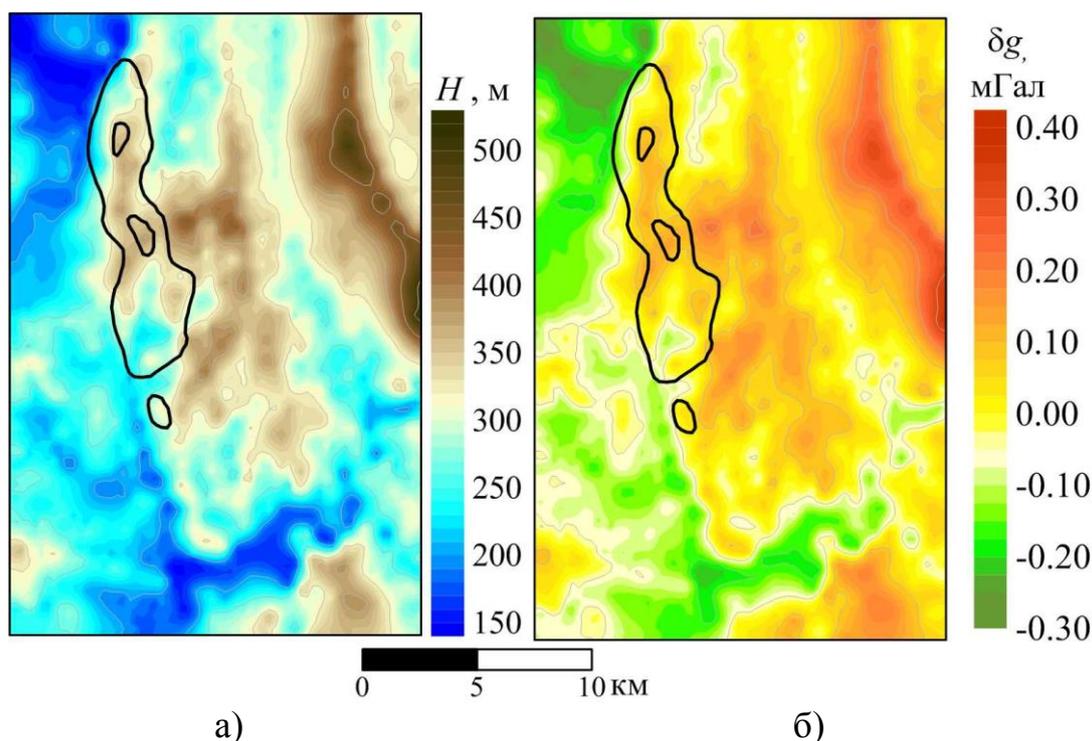


Рис. 1. Сравнение аномалий Буге, вычисленных различным способом: а) рельеф местности; б) разность аномалий (черной линией показан контур нефтеперспективной структуры)

Вычисления показали, что предлагаемые процедуры редуцирования изменяют прежде всего уровень аномалий силы тяжести на величину около 4 мГал за счет изменения параметров формулы вычисления нормального гравитационного поля Земли. Примерно на 1 мГал изменяется уровень поля за счет влияния притяжения атмосферы. Весьма нелинейна величина косвенного эффекта, которая вопреки ожиданиям слабо зависит от величины площади. Как считалось, ундуляции геоида имеют длину сотни километров и не сказываются при гравиметрических съемках на небольших площадях, однако даже на участках размерами до 100 км² величина и дисперсия косвенного эффекта, как правило, превышают погрешность съемки.

Наибольший вклад в локальные аномалии силы тяжести для всех рассмотренных площадей вносит замена сферического промежуточного слоя на плоский. Для этой поправки отмечаются наибольшие для всех площадей амплитуды и стандартное отклонение. В горных районах разница в поправках для «плоской» и «сферической» Земли на порядок превышает точность гравиметрической съемки.

Использование предлагаемых формул редуцирования особенно актуально при исследованиях сравнительно больших площадей (от первых тысяч квадратных километров), 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, весьма значительны.

Проведенный анализ разницы аномалий силы тяжести, вычисленных по стандартным и предлагаемым процедурам редуцирования, на наш взгляд, однозначно свидетельствует о необходимости перехода на новые стандарты вычисления аномалий Буге, поскольку, во-первых, ошибки применяющихся формул многократно превышают погрешности современной гравиметрической съемки [2] и, во-вторых, фиктивные гравитационные аномалии по амплитуде могут быть соизмеримы с эффектами от искомым геологических объектов.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С. Г., Долгаль А. С., Симанов А. А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. – Пермь: УрО РАН, 2015. – 142 с.
2. Бычков С. Г., Симанов А. А. Повышение точности и эффективности гравиметрических работ с использованием современного гравиметрического и геодезического оборудования // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 2, ч. 2. – С. 14–18.
3. Гравиразведка: справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
4. Каленицкий А. И. Еще раз о редуциях в гравиметрии // Вестник СГГА. – 2005. – Вып. 11. – С. 102–114.

5. Каленицкий А.И., Смирнов В.П. Методические рекомендации по учету влияния рельефа местности в гравиразведке. – Новосибирск: СНИИГиМС. – 1981. – 174 с.
6. Основные элементы технологии учета гравитационного влияния топографических масс для шарообразной Земли / А.С. Долгаль, С.Г. Бычков, А.А. Симанов, В.В. Хохлова // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – Вып. № 28. – С. 40–46.
7. Ремпель Г.Г. Актуальные вопросы введения поправок, связанных с рельефом местности, в данные гравиразведки и магниторазведки // Физика Земли. – 1980. – № 12. – С. 75–89.
8. 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, N 3. – P. 727–739, doi: 10.1111/1365-2478.12207

© С. Г. Бычков, А. С. Долгаль, А. А. Симанов, В. В. Хохлова, 2017