

В. Н. КОНЕШОВ, Д. В. АБРАМОВ, И. В. КОНЕШОВ

УТОЧНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Показано, что при обработке данных реальных съемок с использованием принятого вертикального градиента при построении карты возникает систематическая погрешность. Показано также, что следует применять более точную формулу нормального значения вертикального градиента, связывающую его значения с широтой места. Даются рекомендации, что при проведении съемок в гористой местности следует учитывать аномалию вертикального градиента, вызванную рельефом.

В настоящее время основной задачей аэрогравиметрической съемки является получение гравиметрической карты масштаба 1:200000. При этом в соответствии с существующими в России нормами требуется, чтобы систематическая погрешность построенной карты аномалий поля ускорения силы тяжести (УСТ) не превышала 1 мГал (RMS), а случайная погрешность – 0,9 мГал (RMS).

При обработке результатов аэрогравиметрической съемки, выполненной в арктических широтах на высотах полета от 2000 до 3000 м с использованием стандартной методики возникла ситуация, когда значения полученных аномалий в свободном воздухе превышали значения, снятые с карты аномалий. Это обстоятельство заставило внимательно посмотреть на значения вертикального градиента и оценки изменения его величины в зависимости от широты места. При этом оказалось необходимым уточнить аналитические выражения для всех используемых при обработке поправок и в первую очередь поправки за высоту полета, так как эта поправка была введена в первой половине прошлого века и описана без учета требований к точности выполнения аэрогравиметрической съемки.

По нормативной [6] и справочной [5] литературе поправка за высоту точки наблюдения определяется по формуле

$$\delta_{\text{св.в.}} = 0,3086 h \text{ [мГал]}, \quad (1)$$

где h – высота точки измерения в метрах. При этом предполагается, что ее величина не должна превышать нескольких сот метров. Необходимо отметить, что формула (1) является приближенной и определяет поправку за высоту точки наблюдения как среднее значение поправок за высоту точки наблюдения на полюсе ($\delta_{\text{св.в.}} = 0,3094 h$) и экваторе ($\delta_{\text{св.в.}} = 0,3077 h$) для модели Земли в виде невращающегося сфероида.

Конешов Вячеслав Николаевич. Доктор технических наук, заместитель директора Института физики Земли (Москва). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Абрамов Дмитрий Владимирович. Научный сотрудник Института физики Земли

Конешов Игорь Вячеславович. Инженер Института физики Земли.

Следует отметить, что из-за принятых допущений для модели Земли модуль вертикального градиента растет от экватора к полюсу.

Аналитический вывод формулы для вертикального градиента применительно к модели Земли в виде эллипсоида вращения приведен в [1] и [2], эти выводы схожи по результату. Линейный коэффициент вертикального градиента нормального поля силы тяжести $\delta \gamma / \delta n$ необходимо вычислять по формуле [1]

$$\delta \gamma / \delta n = - (2\gamma_e/a)[1+\alpha +q+(2,5q-3\alpha) \sin^2\varphi], \quad (2)$$

где γ_e – ускорение силы тяжести на экваторе; a – большая полуось эллипсоида; φ – широта точки измерения; α – полярное сжатие эллипсоида; $q = \omega^2 a / g_e$; ω – угловая скорость вращения Земли. Подставив в выражение (2) числовые значения входящих в него параметров в соответствии с последними справочными данными [7, 8]: $\gamma_e = 978016,0$ мГал (вычислено по формуле нормального гравитационного поля Земли 1971 года);

$$\alpha = 1/298,258;$$

$$a = 6378136 \text{ м};$$

$$\omega = 7,292115 \times 10^{-5} \text{ рад/с},$$

получим формулу для расчета изменения $\delta \gamma / \delta n$ в зависимости от широты места φ

$$\delta \gamma / \delta n = - 0.3087693[1-0.0013795\sin^2\varphi]. \quad (3)$$

Формула (3), как и предполагалось, позволяет более точно вычислить линейный коэффициент вертикального градиента в зависимости от широты. График изменения этого коэффициента показан на рисунке.

Североамериканская гравиметрическая база данных [GEOPHYSICS, 2005], в отличие от российских нормативных документов, содержит несколько иную формулу

$$\delta \gamma / \delta n = -0,3087691[1-0.0014243\sin^2\varphi]. \quad (4)$$

Отличие зависимости (4) от формулы (3) обусловлено разницей в используемых национальных эллипсоидах. Для формулы (4) применен эллипсоид GRS80.

Квадратичный коэффициент вертикального градиента нормального поля силы тяжести находится по формуле [1]

$$\delta^2 \gamma / \delta n^2 = 3\gamma_e/a^2. \quad (5)$$

Подставив в (5) ранее приведенные числовые значения γ_e и a , получим значение квадратичного коэффициента $\delta^2 \gamma / \delta n^2 = 7.2124 \times 10^{-8}$.

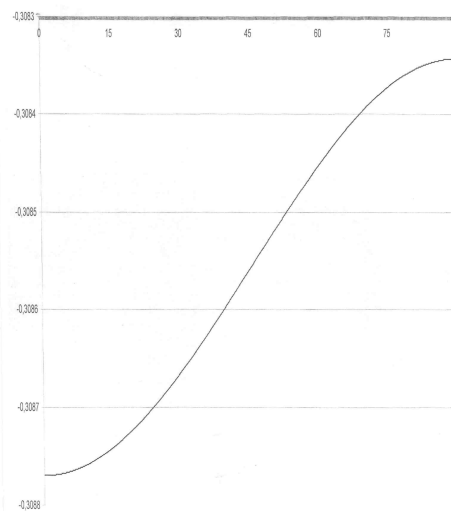


График изменения вертикального градиента нормального поля в зависимости от широты

При расчетах аномалий в свободном воздухе по формулам (3,4) высота точки измерений h относительно эллипсоида предполагается в метрах.

Подстановка уточненных значений коэффициентов вертикально градиента (3,5) при выполнении расчетов аномалий в свободном воздухе по сравнению с вычислением по формуле (1) позволило устранить систематическую погрешность в результатах аэрогравиметрической съемки.

Определение термина «аномалия в свободном воздухе» введено в начале прошлого века. Это понятие предполагало, что точки измерения расположены либо на морской поверхности, либо на небольшой высоте от земной поверхности. При аэрогравиметрической съемке целесообразно использовать высоты, при которых амплитуда значимых составляющих спектра аномалий невелика [9]. Так, при выполнении съемки масштаба 1:200 000 высота полета может составлять 3000 м. Если полеты выполняются над морем, то восстановление значений аномалий в свободном воздухе на геоиде не представляет затруднений (с учетом выше сказанного) и не содержит систематических погрешностей.

Иное дело – проведение гравиметрической съемки горных районов, которая ранее, как правило, не выполнялась. Причиной этому была их труднодоступность для наземных методов съемки, в связи с чем не существует и специальной методики выполнения наземной гравиметрической съемки горной местности.

Если район аэрогравиметрических съемок находится над горным районом, то при планировании и выполнении этих работ необходимо помнить об одной их особенности – наличии аномалеобразующего эффекта, обусловленного горными массивами, и увеличении вертикального градиента гравитационного поля. Выполним ориентировочную оценку этого эффекта.

Для примера вычислим гравитационный эффект и дополнение к вертикальному градиенту от горного массива высотой 1000 м. Целесообразно выполнить упрощенный расчет, представив горный массив в виде параллелепипеда длиной L , шириной B и высотой H . Рассмотрены типичные размеры горного массива, задававшиеся в метрах. Плотность пород взята средняя и составила в расчетах $2,5 \text{ г/см}^3$. Основные результаты влияния горного массива на появление дополнительной аномалии и дополнительного вертикального градиента ddG/dh от нее приведены ниже.

	L	B	H	На h	Эффект аномалии, мГал	ddG/dh , мГал/м
А	120000	90000	1000	1000 3000	103,9 98,3	0,0019 0,0019
Б	120000	45000	1000	1000 3000	103,3 81,2	0,0030 0,0031
В	120000	20000	1000	1000 3000	101,3 81,15	0,0070 0,0062
Г	120000	10000	1000	1000 3000	97,4 56,4	0,0146 0,0081
Д	120000	5000	1000	1000 3000	89,0 35,7	0,0299 0,0178

В приведенном расчете эффект дополнительной аномалии и дополнительного вертикального градиента ddG/dh дан как на поверхности

горного массива $h=1000$, так и на максимальной предполагаемой высоте полета ($h=3000$).

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Используемое в настоящее время нормальное значение вертикального градиента вносит существенную систематическую погрешность в вычисление аномалии силы тяжести в аэрогравиметрии при больших высотах полета. Получена уточненная формула зависимости вертикального градиента силы тяжести от широты места, позволяющая существенно уменьшить указанную погрешность.
2. Выполненный ориентировочный расчет учета аномалеобразующего эффекта гор показывает следующее:
 - карта аномалий в свободном воздухе над горными районами будет содержать дополнительные положительные систематические составляющие аномалий, так как должна учитывать только влияние вертикального градиента нормального поля Земли;
 - при выполнении полетов аэрогравиметрической съемки высота полетов над горным районом должна быть постоянной. В противном случае из-за разных значений вертикального градиента на разных высотах необходимо учитывать дополнительные систематические погрешности, полученные в разных полетах.

Авторы благодарит сотрудников ИФЗ РАН Н.В.Дробышева, Л.К. Железняк и Э.А.Боярского за обсуждение материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Делинджер П. Морская гравиметрия. - М.: Недра, 1982. 312 с.
2. Heiskanen W.A. and Vening Meinesz F.A. The Earth and Gravity Field, McGraw-Hill, New York, 1958, 470 p.
3. Шимберев Б.П. Теория фигуры Земли. М., Недра, 1975, 432 с.
4. Xiong Li, Hans-Jurgen Gotze. Elipsoid, geoid, gravity, geodesy and geophysics. Geophysics, Vol. 66, 2001.
5. Гравиразведка. Справочник геофизика. М., Недра., 1990.
6. Инструкция по гравиразведке. М., Недра., 1980.
7. Инструкция по морской гравиметрической съемке (ИГ-78). Министерство обороны СССР, 1979.
8. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли. (Параметры Земли 1990 года). М., РИО ТС ВС, 1991, 68с.
9. О погрешностях «портретов» гравитационных аномалий, полученных по измерениям с воздуха / Л.В.Афанасьева [и др.]. Геофизический вестник. Министерство природных ресурсов РФ, М., №4, 2002.
10. GEOPHYSICS, 2005, Vol. 70, N 4; P. J25-J32.

Abstract. When processing the results of airborne gravity survey in the Arctic at flight heights of 2000 to 3000 m, the authors encountered the conditions when the free-air gravity anomaly exceeded the values taken from the anomaly map. The formula for the calculation of the vertical gradient as a function of latitude has been refined. The tentative calculations reported in the paper also indicate that free-air gravity anomaly above the mountainous areas contains additional positive systematic components, since only the effect of the vertical gradient of the normal gravity is taken into account here; and the flight height should be held constant during the survey, otherwise it would be needed to consider additional bias errors for different flights.

Материал поступил 10.12.10