

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

«Воронежский государственный технический университет»
Кафедра кадастра недвижимости, землеустройства и геодезии

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ГРАВИМЕТРИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Для выполнения практических работ
по дисциплине «Спутниковые системы и технологии
позиционирования»
для студентов направления 21.03.03
«Геодезия и дистанционное зондирование»
(профиль: Геодезия)
всех форм обучения**

Воронеж 2022

УДК 528.2
ББК 26.21я7

Составитель: В.В. Шумейко; Н.В. Невинская.

Геодезическая гравиметрия: метод. Указания для выполнения лабораторных работ / сост.: В.В. Шумейко; Н.В. Невинская.

Методические указания предусмотрены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Геодезическая гравиметрия» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование». /ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. В.В.Шумейко, Н.В. Невинская Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. 33 с.

Основная цель указаний состоит в рассмотреть основные понятия геодезической гравиметрии и даны краткие сведения различных разделов геодезической гравиметрии. Даны основные задачи, которые решает современная геодезическая гравиметрия и рассмотрены методы их решения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ГГ_ПЗ.pdf.

УДК 528.2
ББК 26.21я7

Рецензент – доцент кафедры «Кадастр недвижимости, землеустройство и геодезия» к. г. н. Самбулов Н.И.

Издается по решению редакционно-издательского совета ВГТУ

Введение

По направлению 21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование» учебным планом предусматривается изучение дисциплины «Геодезическая гравиметрия».

Цель дисциплины «Геодезическая гравиметрия» - освоение основных положений гравиметрического метода определения физической поверхности и гравитационного поля Земли, а так же формирование практических навыков решения геодезических задач методами гравиметрии.

В ходе учебного процесса студент должен прослушать курс лекций по данной дисциплине, выполнить лабораторные работы и сдать экзамен.

Настоящие методические указания предусмотрены для выполнения лабораторных работ по геодезической гравиметрии с использованием базовых данных и электронных справочников.

Выполнение лабораторных работ направлено на решение следующих задач:

изучение методики проведения гравиметрических измерений на местности; их последующей обработки, оценки точности; вычисления аномалий силы тяжести и построения гравиметрических карт; вычисления уклонений отвесной линии и аномалии высоты.

Знания, полученные при изучении дисциплины «Геодезическая гравиметрия» необходимы в дальнейшем, для изучения других дисциплин. и применения гравиметрических данных в прикладной геодезии.

Лабораторная работа № 1

Обработка гравиметрического рейса

Цель работы: Освоение приемов первичной обработки гравиметрических измерений.

Оборудование: электронные справочники и базы данных, таблицы с исходными данными (прил. 1. табл. 7.).

Задание: вычислить абсолютное значение ускорения силы тяжести на пунктах гравиметрической сети по результатам измерений, полученным по одной из методик, указанных в задании.

Общие теоретические сведения.

Гравиметрические измерения выполняются отдельными *рейсами*. Рейс – это непрерывная последовательность измерений с гравиметром, объединенная общим смещением нуль-пункта, которая начинается и заканчивается на опорном пункте.

Часть рейса между двумя соседними по времени опорными пунктами называется *звеном*. Основным типом рейса является однодневный. Наблюдения в рейсах проводятся, как правило, по однократной методике. При наблюдениях используются, обычно, два гравиметра.

При проведении съемок в труднодоступных районах наблюдения выполняют тремя гравиметрами одновременно. Это исключает необходимость повторения рейса в случае обнаружения брака в измерениях одним из гравиметров.

Если гравиметры показывают стабильность в смещении нуль-пункта, обеспечивающую точность результатов наблюдения, то допускается увеличение продолжительности рейса.

Измерения в рейсе начинают и заканчивают на опорных гравиметрических пунктах (ОГП), на которых известно абсолютное значение ускорения силы тяжести g_0 .

Порядок выполнения работы.

По исходным данным следует выполнить все необходимые расчеты в следующей последовательности:

- 1) Выписать исходные данные из ведомости обработки гравиметрических измерений: номера съемочных точек, средние моменты времени снятия отчетов по шкале микрометра в долях часа и средние отсчеты в оборотах микрометра (прил. 1. табл. 7).
- 2) Вычислить эффективные значения силы тяжести в точках наблюдения по формулам:

$$g_i^s = (g_i^s)' + f(s) + \delta g_{л.с.}; (g_i^s)' = C_{T_i} \cdot \bar{S}_i, \quad (1.1)$$

$$C_{T_i} = C_0 + \alpha_c(T_i - T_0), \quad (1.2)$$

где C_{T_i} - цена оборота микрометрического винта гравиметра при температуре T_i в мГал/оборот;

- 3) Вычислить поправки на смещение нуля-пункта гравиметра по формулам:

$$(\delta g_{\text{н.п.}})_i = k \cdot \Delta t_i, \quad \Delta t_i = t_i - t_0, \quad (1.3)$$

$$k = \frac{(g_{01}^s - g_{02}^s) - (g_{01} - g_{02})}{t_2 - t_1}, \quad (1.4)$$

где k - коэффициент (скорость) смещения нуля-пункта гравиметра в рейсе, в мГал/час;

- 4) Вычислить приращения силы тяжести между определяемым и исходным пунктами по формуле:

$$\Delta g_i = g_i^s - g_0^s + (\delta g_{\text{н.п.}})_i, \quad (1.5)$$

где g_i^s и g_0^s - эффективные значения силы тяжести соответственно на определяемом и опорном пунктах;

$(\delta g_{\text{н.п.}})_i$ - поправка за смещение нуля-пункта гравиметра на определяемом пункте.

- 5) Вычислить абсолютное значение силы тяжести на всех точках съемочной сети по формуле:

$$g_i = g_0 + \Delta g_i, \quad (1.6)$$

где Δg_i - приращение силы тяжести между исходным и определяемым пунктами, получаемое из обработки гравиметрических измерений.

- 6) После выполнения вычислений составляются ведомости значений силы тяжести на пунктах съемочной сети и производится оценка точности результатов измерений.
- 7) Начертить график шкаловых поправок гравиметра ГНУ-КВ.

Пример обработки гравиметрического рейса

Гравиметрический рейс выполнен в прямом ходе между двумя опорными пунктами с абсолютными значениями силы тяжести 981 245,000 мГал и 981 217,500 мГал.

Измерения проведены гравиметром ГНУ-КВ № 111 с ценой оборота отсчетного устройства $C_0 = 7,0001$ мГал/оборот и эквивалентным температурным коэффициентом $\alpha_C = -13,17 \cdot 10^{-4}$ мГал/(оборот \cdot градус).

Результаты обработки полевого гравиметрического журнала (средний отсчет по шкале микрометра S_i и время его снятия t_i (в долях часа), название i -го пункта, а также температура гравиметра) вносятся в графы 1–4 ведомости обработки гравиметрического рейса.

Значения шкаловых поправок $f(s)$ для каждого оборота микрометричного винта можно выбрать из табл. 6. При этом значение поправки на доли оборота определяется линейной интерполяцией.

Для определения $f(s)$ можно построить график изменения $f(s)$ по табличным значениям и «снимать» с него величину поправки. Пример такого графика приведен на рисунке 1.

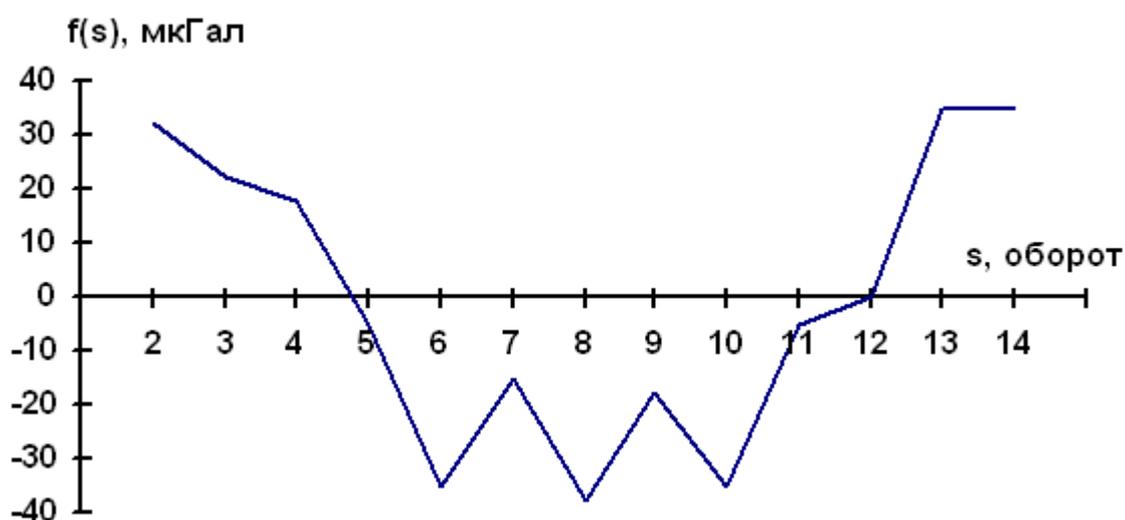


Рис. 1. График шкаловых поправок $f(s)$ гравиметра ГНУ-КВ № 111

После выполнения вычислений составляются ведомости значений силы тяжести на пунктах съемочной сети и производится оценка точности результатов измерений.

Лабораторная работа № 2

Вычисление аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе

Цель работы: ознакомиться с методикой вычисления гравитационных аномалий и получить представление об их величине в различных регионах и морфоструктурах земного шара.

Оборудование: электронные справочники и базы данных, таблицы с исходными данными (прил. 2. табл. 9.).

Задание: вычислить аномалии силы тяжести в свободном воздухе и Буге для точек, расположенных:

1. На поверхности Земли в равнинном районе;
2. На поверхности Земли в горном районе;
3. На поверхности моря;
4. На дне моря;
5. Над Землей;
6. В скважине.

Общие теоретические сведения.

Гравитационной аномалией силы тяжести называется разность между измеренными g и нормальными γ значениями силы тяжести в данной точке, расположенной на физической поверхности Земли или ниже (выше):

$$\Delta g = g - \gamma, \quad (2.1)$$

В гравиметрии широкое распространение получили аномалии в свободном воздухе и Буге:

$$\Delta g_{св.в.} = g - (\gamma_0 + \delta g_1), \quad (2.2)$$

$$\Delta g_B = g - (\gamma_0 + \delta g_1 + \delta g_2), \quad (2.3)$$

где δg_1 – поправка за высоту точки H^γ над уровнем моря,

$$\text{мГал, } \delta g_1 = -0,30855(1 + 0,00071 \cos 2B)H^\gamma,$$

где H^γ – нормальная высота точки, м;

γ_0 – нормальное значение силы тяжести на поверхности эллипсоида,

$$\gamma_0 = 978\,030 \left(1 + 5,302 \cdot 10^{-3} \sin^2 B - 7 \cdot 10^{-6} \sin^2 2B\right) - 14 \text{ мГал}, \quad (2.4)$$

где B – геодезическая широта места наблюдения.

Значения γ_0 , уменьшенные на 14 мГал.

В формуле δg_2 – поправка, учитывающая влияние масс, заключенных между уровнем точки наблюдения и поверхностью эллипсоида, представляемых, в равнинных районах, плоскопараллельным слоем толщиной H' . В горных районах массы, расположенные между эллипсоидом и физической поверхностью Земли, аппроксимируются промежуточным слоем. Ее значение вычисляется по формуле:

$$\delta g_2 = -2\pi f \sigma \cdot H' \cdot 10^5 \text{ (мГал)}, \quad (2.5)$$

где f – гравитационная постоянная, равная $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 / (\text{г} \cdot \text{с}^2)$; $\pi = 3,1416$; $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$ (средняя плотность пород промежуточного слоя).

Если сила тяжести измерена на дне моря или на глубине h_m под его поверхностью, то для получения гравитационной аномалии необходимо ввести поправку за глубину и за притяжения водного слоя между уровнем моря и точкой наблюдения.

Влияние притяжения водного слоя над точкой наблюдения на силу тяжести равно двойной величине притяжения этого слоя, так как слой, находясь сверху, уменьшает силу тяжести, а, находясь внизу, когда точка наблюдения перенесена на уровень моря, увеличивает ее на ту же величину δg_3 , которую можно определить по формуле:

$$g_3 = -2 \cdot 2 \pi f \sigma_m \cdot h_m \cdot 10^5 \text{ (мГал)}, \quad (2.6)$$

где σ_m – средняя плотность морской воды, равная $1,03 \text{ г/см}^3$; h_m – глубина от поверхности моря до точки наблюдения (отрицательная), м.

Аналогичные рассуждения справедливы и для случаев изменения g в скважинах и в шахтах с той лишь разницей, что в качестве ρ нужно брать среднюю плотность горных пород, заключенных в слое толщиной h_c над точкой наблюдения.

Порядок выполнения работы.

Вычисление аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе.

Для точек 1 и 2, расположенных на поверхности Земли:

$$\Delta g_{св.в.} = g - (\gamma_0 + \delta g_1), \quad (2.7)$$

Точка 3 находится на поверхности моря, где $H^\gamma = 0$. Поэтому, согласно теории М.С. Молоденского, в первом приближении имеем:

$$\Delta g_{св.в.} = g - \gamma_0, \quad (2.8)$$

Если сила тяжести измерена на дне моря (точка 4) на глубине h_m , то для получения аномалии $\Delta g_{св.в.}$ необходимо применить формулу:

$$\Delta g_{св.в.} = g - (\gamma_0 + \delta g_1) + \delta g_3, \quad (2.9)$$

Следует помнить, что при вычислении поправки δg_1 необходимо вместо H^γ брать отрицательную величину h_m .

Для точки 5 высота складывается из нормальной высоты H_γ и высоты полета летательного аппарата $h_{л}$ над физической поверхностью Земли, т. е.

$$H = H_\gamma + h_{л}, \quad (2.10)$$

Аномалия $\Delta g_{св.в.}$ для этой точки определяется по формуле, в которой при вычислении δg_1 вместо H_γ необходимо брать величину H , полученную по формуле.

Аномалия силы тяжести для точки 6, расположенной в скважине на глубине h_c от поверхности Земли, вычисляется по формуле. В этом случае, при вычислении поправки δg_1 , необходимо брать высоту:

$$H = H_\gamma - h_c, \quad (2.11)$$

При вычислении поправки δg_3 величину ρ следует принимать равной средней плотности горных пород в слое, над точкой наблюдения, толщиной h_c . Глубина h_c – величина отрицательная. Пример вычисления $\Delta g_{св.в.}$ приведен в таблице 1.

Таблица 1

Пример вычисления $\Delta g_{св.в.}$

Номера точек	$B, ^\circ$	$H_\gamma, \text{м}$	$h_c^{**}, \text{м}$	$(H^\gamma + h), \text{м}$	$g, \text{мГал}$	$\gamma_0, \text{мГал}$	$\delta g_1, \text{мГал}$	$\gamma, \text{мГал}$	$\delta g_3, \text{мГал}$	$\Delta g_{св.в.}, \text{мГал}$
1	52 13	5	0	5	981 274,8	981 248,6	-1,5	981 247,4	-	27,7

Продолжение Таблицы 1

2	36 48	384	0	384	979 851,0	979 870,4	-118,5	979 751,9	-	99,1
3	4 22	0	0	0	978 072,8	978 045,9	0	979 045,9	-	26,9
4	25 45	0	-125	-125	979 069,3	978 990,5	38,6	979 029,1	10,8	51,0
5	67 17	143	500	643	982 192,2	982 424,7	-198,2	982 226,3		-34,3
6	48 50	125	-40	85	980 924,7	980 947,9	-26,2	980 921,4	8,9*	-12,5

* поправка δg_3 вычислена с плотностью $\rho_n = 2,67 \text{ г/см}^3$.

** h_k – высоты точек над или под поверхностями Земли или моря.

Вычисление аномалий силы тяжести в редукции Буге.

При вычислении аномалий Буге следует различать два случая:

1. Точка наблюдения расположена на суше;
2. Точка наблюдения расположена на море.

В первом случае для точек 1, 2, 5, 6, расположенных на суше, аномалия Буге вычисляется по формуле:

$$\Delta g_B = \Delta g_{св.в.} + \delta g_2, \quad (2.12)$$

Для точек 3 и 4, расположенных на море, поправка за влияние промежуточного слоя вычисляется по формуле:

$$\delta g_2 = -2\pi f(\sigma - \sigma_m) \cdot h_m, \quad (2.13)$$

Аномалия Буге в этом случае вычисляется по предыдущим формулам с учетом δg_2 . Пример вычисления Δg_B приведен в таблице 2.

Таблица 2

Пример вычисления Δg_B

Номера точек	$H \gamma, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$\Delta g_{св.в.}, \text{ мГал}$	$\delta g_2, \text{ мГал}$	$\Delta g_B, \text{ мГал}$
1	5	0	27,7	-0,6	27,1
2	384	0	99,1	-43,0	56,1
3	0	-3 820	26,9	262,4	289,3

4	0	-125	51,0	8,6	59,6
5	143	500	-34,3	-16,0	-50,3
6	125	-40	12,5	-14,0	-1,5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните понятия «смешанная аномалия» и «чистая аномалия».
2. Раскройте смысл понятия «редукция»?
3. Объясните физический смысл редукций Буге и в свободном воздухе.
4. Как называется коэффициент перед H_γ и чему он равен для эллипсоида?
5. Как изменяется сила тяжести на поверхности эллипсоида и вне его?

Лабораторная работа № 3

Построение гравиметрических карт аномалий силы тяжести с редуциями Буге и в свободном воздухе

Цель работы: освоение методики построения гравиметрических карт аномалий силы тяжести с редуциями в свободном воздухе и Буге.

Оборудование: электронные справочники и базы данных, таблицы с исходными данными (прил. 3. Табл. 10-11.), электронная программа CorelDraw.

Задание: вычислить аномалии силы тяжести с редуцией в свободном воздухе и Буге для 25 гравиметрических пунктов, расположенных по трапеции $2^\circ \times 2^\circ$ через $30'$ по широте и долготе,. Построить гравиметрические карты аномалий силы тяжести в масштабе $1 : 1\,000\,000$ с сечением изоаномал 10 мГал.

Общие теоретические сведения.

Гравитационной аномалией силы тяжести называется разность между измеренными g и нормальными γ значениями силы тяжести в данной точке:

$$\Delta g = g - \gamma = g_0 - \gamma_0,$$

где g_0 – редуцированное значение силы тяжести с физической поверхности Земли к соответствующей точке на поверхности геоида, γ_0 – нормальное значение силы тяжести на поверхности эллипсоида.

Это значение вычисляется по формуле:

$$\gamma_0 = 978030 \left(1 + 5,302 \cdot 10^{-3} \sin^2 \varphi - 7 \cdot 10^{-6} \sin^2 2\varphi \right) - 14 \text{ мГал}, \quad (5.78)$$

где φ – широта места наблюдения.

В гравиметрии широкое распространение получили аномалии:

1. В свободном воздухе:

$$\Delta g_{св.} = g - (\gamma_0 + \delta g_1); \quad (3.1)$$

2. Аномалия Буге:

$$\Delta g_B = g - (\gamma_0 + \delta g_1) + \delta g_2, \quad (3.2)$$

где δg_1 – поправка за высоту точки H^γ над уровнем моря, мГал. Вычисляется по формуле:

$$\delta g_1 = -0,30855 (1 + 0,00071 \cos 2\varphi) H^\gamma; \quad (3.3)$$

δg_2 – поправка, учитывающая влияние масс, заключенных между уровнем точки наблюдения и поверхностью геоида – промежуточный плоскопараллельный слой толщиной H^γ .

Определяется, как $\delta g_2 = -0,0419\rho H^\gamma$,

где ρ – средняя плотность пород промежуточного слоя, принята равной $2,67 \text{ г/м}^3$.

Порядок выполнения работы.

1. Вычислить нормальные значения силы тяжести на поверхности эллипсоида.
2. Вычислить аномалии силы тяжести с редукцией в свободном воздухе по формуле.
3. Вычислить аномалии силы тяжести с редукцией Буге.
4. Построить гравиметрическую карту аномалий силы тяжести в масштабе 1:1 000 000 с сечением изоаномал через 10 мГал.

Пример выполнения работы

Результаты вычисления аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе приведены в таблицах 3 – 6.

Таблица 3

Исходные данные варианта № 1

φ λ		103,0°	103,5°	104,0°	104,5°	105,5°
44,0°	$\frac{g}{H^\gamma}$	980301.5 630	980312.4 600	980292.9 750	980289.1 820	980231.0 1080
43,5°	$\frac{g}{H^\gamma}$	980219.9 800	980217.0 850	980203.5 1000	980205.5 1000	980175.5 1130
43,0°	$\frac{g}{H^\gamma}$	980174.1 930	980141.4 1010	980131.6 1070	980113.8 1150	980093.0 1200
42,5°	$\frac{g}{H^\gamma}$	980116.2 1000	980091.4 1030	980076.6 1100	980031.2 1190	980016.8 1240
42,0°	$\frac{g}{H^\gamma}$	980056.2 980	980032.6 1090	980020.7 1130	979990.0 1220	979957.3 1310

Таблица 4

Нормальные значения силы тяжести на поверхности эллипсоида

φ	42,0°	42,5°	43,0°	43,5°	44,0°
γ , мГал	980 511,4	980 465,2	980 421,1	980 376,0	980 331,0

Таблица 5

Результаты вычислений аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе

$\varphi \backslash \lambda$	103,0°	103,5°	104,0°	104,5°	105,5°
44,0°	52,9	83,1	126,0	56,0	46,5
43,5°	57,6	91,6	61,2	22,2	29,8
43,0°	42,3	57,0	95,9	58,5	22,1
42,5°	22,8	19,5	21,8	76,9	42,3
42,0°	30,7	20,7	12,1	6,7	32,6

Таблица 6

Результаты вычислений аномалий силы тяжести в редукции Буге

$\varphi \backslash \lambda$	103,0°	103,5°	104,0°	104,5°	105,5°
44,0°	-67,9	-85,9	-97,8	-102,9	-118,0
43,5°	-68,8	-72,9	-80,9	-128,9	-138,1
43,0°	-92,0	-82,9	-66,4	-106,0	-148,0
42,5°	-116,0	-126,0	-126,0	-91,0	-120,0
42,0°	-115,9	-135,9	-147,9	-149,9	-133,0

Построение гравиметрической карты аномалий силы тяжести масштаба 1 : 1 000 000 с сечением изоаномал через 10 мГал с помощью пакета SURFER и CorelDraw.

1. Запускаем Surfer.
2. Создаем новую таблицу New worksheet. Заполняем ее.

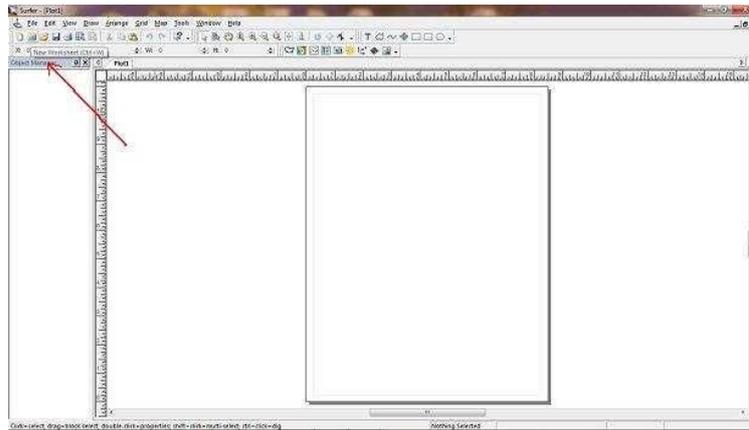


Рис.2 Создание новой таблицы New worksheet

3. В верхнем меню выбираем Grid→Data.

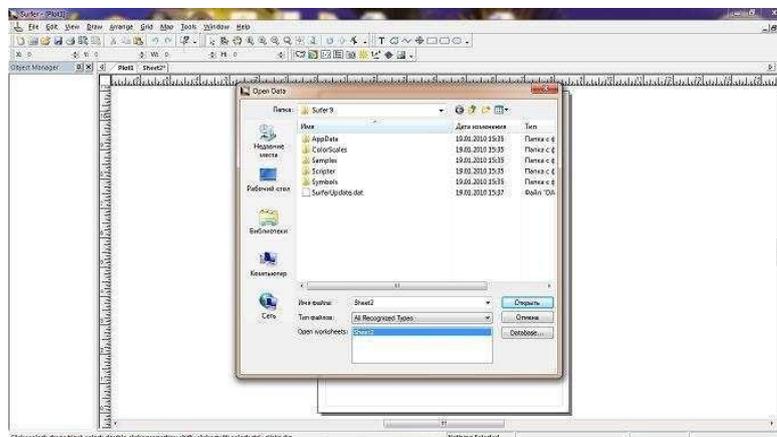


Рис.3 Пример верхнего меню

4. В появившемся окне нажимаем Sheet2.
5. Ставим X – Column B, а Y – Column A.

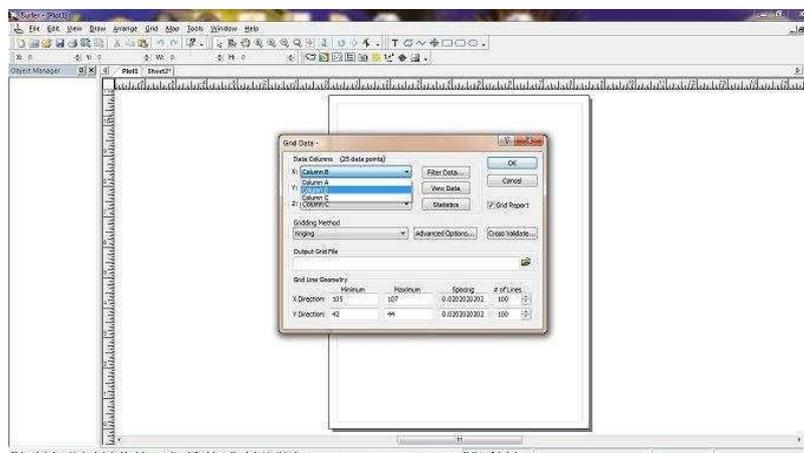


Рис.4 Пример всплывающего окна

6. Появляется еще одно окно, в строке output grid fail справа нажимаем на папку и выбираем место, где будет сохранен файл.
7. Нажимаем ОК, дальше появляется report (отчет).

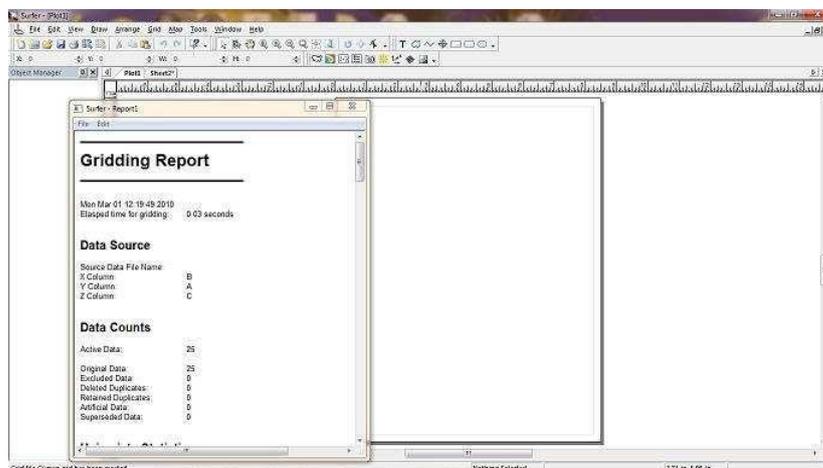


Рис.5 Пример report

8. Теперь нажимаем File→Open выбираем недавно сохраненный нами файл.

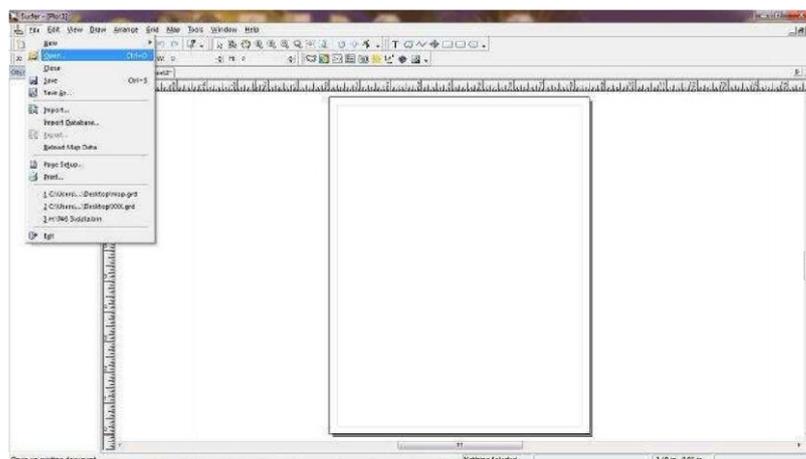


Рис.6 Пример меню File

9. Нажимаем правой кнопкой мыши по рисунку и убираем галочку с Show nodes.

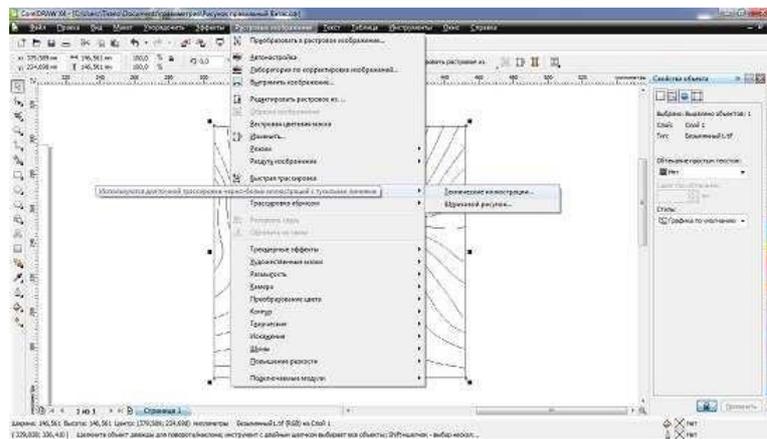


Рис.9 Пример векторизования

19. Выделяем изображение и меняем его размеры по ширине – 160 по высоте – 200 (размеры меняются под строкой меню).

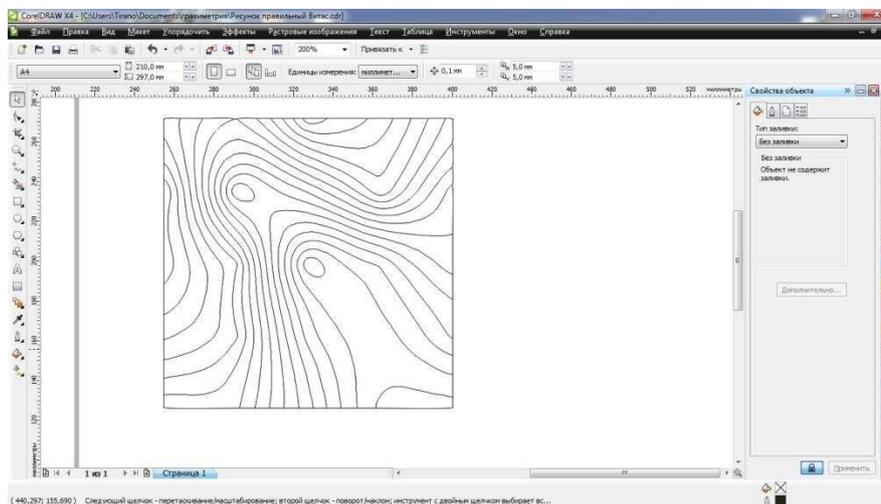


Рис.10 Пример изменения размера изображения

20. Строим внешнюю рамку карты. Делаем отступ от границы рисунка (карты) 0,8 см, проводим линии по долготе и по широте. Толщина линии внешней рамки должна быть 1 мм.

21. Создаем координатную сетку. Координатная сетка должна выходить за пределы рисунка (самой карты), но не заходить за пределы рамки. Координатная сетка имеет размеры 4,5 см по широте, 3,5 см по долготе.

Далее необходимо выполнить подписи изоаномал. Подписывать нужно каждую пятую изолинию, а также те, которые остались обособленными по краям карты.

В данной работе подписи изоаномал выполнены с помощью программы Paint (стандартная программа Windows, достаточно проста в обращении).

В программе Paint набираем нужную нам подпись (например, число «75»). Выбираем подходящий шрифт для дальнейшего перенесения этой

подписи в программу Corel Draw. Уменьшаем картинку до необходимых для карты размеров.

Сохраненный рисунок копируем в программу Word, обрезаем его до минимальных размеров, т. е. до размеров подписи.

Теперь подпись можно поворачивать под любым углом (так как это рисунок), против или по часовой стрелке.

Этот рисунок, уже под нужным нам углом и с нужной подписью помещаем на соответствующую изоаномалу.

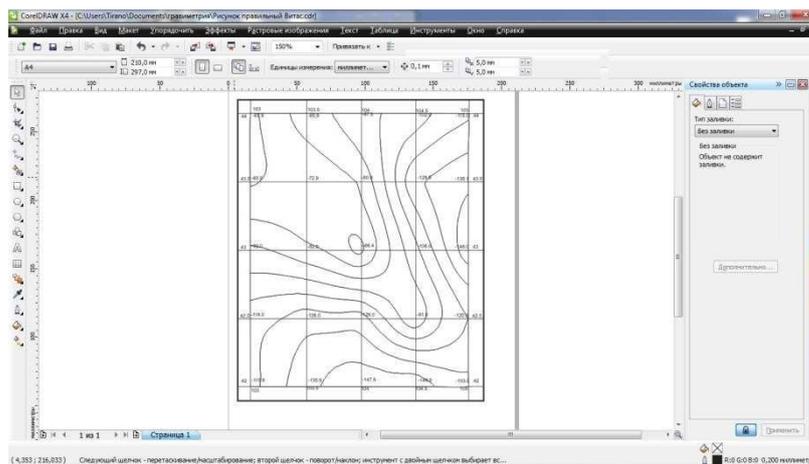


Рис.11 Пример готового изображения полилиний

На рисунке (прил. 4. рис. 3.) представлен конечный «продукт» – гравиметрическая карта аномалий силы тяжести с редукции Буге в необходимом оформлении.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определение силы тяжести. Размерность силы тяжести в СИ. Чему равен 1 мГал в СИ?
2. Распределение силы тяжести на поверхности эллипсоида.
3. Аномалии силы тяжести.
4. Редукции силы тяжести, их физический смысл и формулы. Гравиметрические карты. Их назначение и сферы применения.

Лабораторная работа № 4

Вычисление составляющих уклонения отвеса

Цель работы: освоение методики вычисления составляющих уклонения отвеса и высоты квазигеоида по гравиметрическим данным.

Оборудование: гравиметрическая карта аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе ($\Delta g_{св}$) в масштабе 1 : 1 000 000, палетка, вычислительные схемы (прил. 5. табл. 12-14.).

Задание: на основании формулы Гельмерта найти приближенные средние величины уклонения отвеса θ и вычислить составляющие уклонения отвеса.

Общие теоретические сведения.

Астрономические координаты (φ и λ) контролируются направлением отвесной линии, а геодезические широты и долготы (B и L) определяются положением нормали к референц-эллипсоиду. Следовательно, уклонения отвесных линий получаются как разность астрономических и геодезических координат.

Для практических целей нужно знать проекции V_g на плоскость меридиана (ξ) и плоскость первого вертикала (η). Эти составляющие необходимы для перехода от астрономических к геодезическим координатам и обратно.

Для вычисления ξ , η и ζ используют гравиметрические карты аномалий силы тяжести Δg с редукцией в свободном воздухе. Учитываемую область – круг с радиусом (в данном примере) 100 км, разбивают концентрическими окружностями и радиусами, проведенными из центра круга, на площадки (ячейки), оказывающие равное влияние на точку вычисления.

Получившаяся сетка из окружностей и линий называется *палеткой*. Области палетки, заключенные между двумя окружностями называются *зонами*, они обозначаются римскими цифрами, а между двумя радиусами – *секторами*, которые нумеруются арабскими цифрами.

Порядок выполнения работы.

Учитываемую область разбивают на две зоны: центральную, от 0 до r_0 , и внешнюю – от r_0 до r_i . В практике вычислений уклонений отвеса радиус центральной зоны r_0 принят равным 5 км, а внешней, в данном случае, от 5 до 100 км. В центральной зоне вычисления проводят по формулам.

На основании формулы Гельмерта для астрономического нивелирования по приращениям аномалии высоты можно найти приближенные средние величины уклонения отвеса θ . При небольших

(несколько километров) расстояниях l между пунктами 2 и 1 величина θ в азимуте линии l :

$$\theta \approx -\frac{\xi_2 - \xi_1}{l}, \quad (4.1)$$

точка 2 восточнее или севернее точки 1. Используем это выражение для оценки составляющих уклонения отвеса.

В нашем случае четыре вычислительные точки образуют прямоугольник с меридиональными сторонами:

$$x_1 - x_3 = x_2 - x_4 = \Delta x = 4,62 \text{ км}$$

и долготными сторонами:

$$y_2 - y_1 = y_4 - y_3 = \Delta y = 5,01 \text{ км.}$$

Поэтому дважды получим составляющие местного гравиметрического уклонения отвеса в плоскости меридиана

$$\xi_{1-3} = -\frac{\xi_1 - \xi_3}{\Delta x}, \quad \xi_{2-4} = -\frac{\xi_2 - \xi_4}{\Delta x}, \quad (4.2)$$

и дважды — в плоскости первого вертикала

$$\eta_{2-1} = -\frac{\xi_2 - \xi_1}{\Delta y}, \quad \eta_{4-3} = -\frac{\xi_4 - \xi_3}{\Delta y}, \quad (4.3)$$

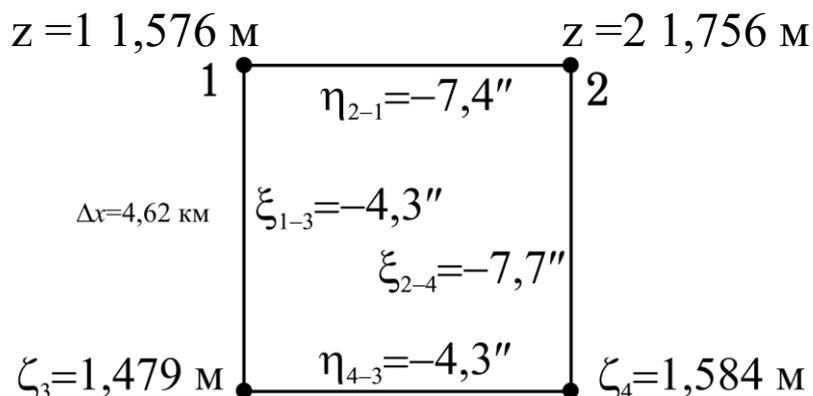


Рис. 2. Местное гравиметрическое уклонение отвеса

Пример вычислений уклонений отвеса квазигеоида.

$$\xi_{1-3} = -\rho'' \frac{1,576 - 1,479}{4,62 \cdot 10^3} = -4,33''$$

$$\xi_{2-4} = -\rho'' \frac{1,756 - 1,584}{4,62 \cdot 10^3} = -7,7''$$

$$\eta_{2-1} = -\rho'' \frac{1,756 - 1,576}{5,01 \cdot 10^3} = -7,4''$$

$$\eta_{2-1} = -\rho'' \frac{1,584 - 1,479}{5,01 \cdot 10^3} = -4,3''$$

Где $\rho'' = 206\,265''$.

Как видно на рисунке 2, изменение уклонения отвеса на расстоянии несколько километров может составить несколько секунд дуги.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение уклонения отвеса.
2. Назвать виды уклонений отвеса и дать их определения.
3. Величины уклонений отвеса и их размерность.
4. Где и каким образом используются уклонения отвесной линии.
5. Что означает высота квазигеоида, как она определяется, пределы ее изменения на земном шаре, размерность.
6. Для чего нужно знать высоту квазигеоида?

Библиографический список

1. **Гравиметрия.** М.: Издательство **геодезической** литературы, 1960. 540 с.
12. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1979. 180 с.
13. ЯворсПоклад, Геннадий Гаврилович. Геодезия [Текст] : учеб. пособие : рек. УМО. - М. : Академический проект : Парадигма, 2011 (Ульяновск : ОАО "Обл. тип. "Печатный двор", 2011). - 537 с.
2. Попов Б.А. Основы геодезии [Электронный ресурс]: практикум/ Попов Б.А., Нестеренко И.В.— Электрон. текстовые данные.— Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2016.— 88 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/72927.html>.— ЭБС «IPRbooks»
3. Полежаева Е.Ю. Современный электронный геодезический инструментарий (Виды, метод и способы работы) [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Полежаева Е.Ю. – Электрон. текстовые данные. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. – 108 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20520>.
4. Автоматизация высокоточных измерений в прикладной геодезии. Теория и практика [Электронный ресурс]/ В.П. Савиных [и др.].— Электрон. текстовые данные.— М.: Академический Проект, Альма Матер, 2016.— 400 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/60080.html>.— ЭБС «IPRbooks»
5. Кочетова Э.Ф. Инженерная геодезия [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Кочетова Э.Ф.— Электрон. текстовые данные.— Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012.— 153 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/15995.html>.— ЭБС «IPRbooks»
6. Полежаева Е.Ю. Геодезия с основами кадастра и землепользования [Электронный ресурс]: учебник/ Полежаева Е.Ю.— Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2009.— 260 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20457.html>.— ЭБС «IPRbooks»
7. Акинъшин С.И. Геодезия [Электронный ресурс]: курс лекций/ Акинъшин С.И.— Электрон. текстовые данные.— Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012.— 304 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22652.html>.— ЭБС «IPRbooks»
8. Нестеренок М.С. Геодезия [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Нестеренок М.С. – Электрон. текстовые данные. – Минск: Высшая школа, 2012. – 288 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20208>

Таблица П1.1

Назв. пункта в	t_i , час	T , °C	\bar{s}_i , обор.	(g_i^s) , мГал	$f(s_i)$, мкГал	$\delta g_{лс}$, мГал	$g_{ис}$, мГал	Δt_i , ч	$(\delta g_{ин.})_i$, мГал	Δg_i , мГал	g_i , мГал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОГП1	9,00	12,0	4,500	-31,572	6	-	-31,566	0,00	0,000	0,000	981 245,000
1	9,20	12,0	5,200	-36,483	-11	-	-36,494	0,20	-0,009	-4,937	240,063
2	9,30	12,0	6,400	-44,402	-28	-	-44,930	0,30	-0,014	-13,378	231,622
3	9,70	12,5	2,000	-14,033	32	-	-14,011	0,70	-0,032	17,533	262,533
4	9,90	12,5	6,200	-43,503	-33	-	-43,536	0,90	-0,040	-12,010	232,990
5	10,00	12,5	5,100	-35,784	-8	-	35,792	1,00	-0,045	-4,451	240,549
ОГП2	11,00	13,0	8,400	-58,945	-31	-	-58,976	2,00	-0,090	-27,500	981 217,500

Ведомость обработки результатов гравиметрических измерений

Таблица П1.2

Исходные данные для лабораторной работы № 3

$\phi \backslash \lambda$		103,0°	103,5°	104,0°	104,5°	105,0°
		44,0°	g 980 301,5	g 980 312,4	g 980 292,9	g 980 289,1
	$H \gamma$ 630	$H \gamma$ 600	$H \gamma$ 750	$H \gamma$ 820	$H \gamma$ 1 080	
43,5°	g 980 219,9	g 980 217,0	g 980 203,5	g 980 205,5	g 980 175,0	
	$H \gamma$ 800	$H \gamma$ 850	$H \gamma$ 1 000	$H \gamma$ 1 000	$H \gamma$ 1 130	
43,0°	g 980 174,1	g 980 141,4	g 980 131,6	g 980 113,8	g 980 093,0	
	$H \gamma$ 930	$H \gamma$ 1 010	$H \gamma$ 1 070	$H \gamma$ 1 150	$H \gamma$ 1 200	
42,5°	g 980 116,2	g 980 091,4	g 980 076,6	g 980 031,2	g 980 016,8	
	$H \gamma$ 1 000	$H \gamma$ 1 030	$H \gamma$ 1 100	$H \gamma$ 1 190	$H \gamma$ 1 240	
42,0°	g 980 056,2	g 980 032,6	g 980 020,7	g 979 990,0	g 979 957,3	
	$H \gamma$ 980	$H \gamma$ 1 090	$H \gamma$ 1 130	$H \gamma$ 1 220	$H \gamma$ 1 310	

Приложение 2
Таблица П 2.1

Исходные данные для лабораторной работы № 2

№ п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>	№ п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>
1 1	37°54'	19		980 059,5	2 1	51°53'	215		981180,9
2	44 11	873		980 345,2	2	44 10	629		980 397,6
3	67 31	0	385	982 428,1	3	67 32	0	3 650	982 356,7
4	27 20	0	13	979 261,5	4	35 32	0	216	979 894,2
5	42 38	93	100	980 421,8	5	42 37	91	100	980 426,0
6	8 58	7	10	978 242,1	6	12 08	131	11	978 283,3
3 1	67 17	13		982 386,8	4 1	70 40	16		982 631,7
2	44 06	643		980 380,4	2	44 02	488		980 387,3
3	70 20	0	819	982 777,7	3	67 36	0	940	982 421,2
4	35 54	0	10	979 823,8	4	35 34	0	27	979 823,5
5	42 35	88	100	980 381,6	5	42 34	92	100	980 418,8
6	16 31	3519	12	977 467,3	6	0 13	2 815	13	977 913,4
5 1	52 06	5		981 269,0	6 1	52 13	25		981 267,6
2	103 03	1 042		978 039,8	2	4 38	2 592		977405,4
3	67 37	0	4 160	982 469,2	3	67 38	0	4 091	982 483,5
4	37 49	0	58	979 992,4	4	37 19	0	72	980 142,8
5	42 34	86	100	980 421,9	5	42 35	86	100	980 417,3
6	43 59	807	14	980 261,9	6	43 57	808	15	980 345,1
71	55 45	44		981 558,2	81	38 43	76		980 089,6
2	43 56	1610		980 007,3	2	1 15	1636		977 540,0
3	67 39	0	891	982 548,8	3	64 37	0	5 011	982 267,2
4	39 38	0	99	980 225,4	4	40 01	0	245	980 264,2
5	42 38	85	100	980 313,9	5	42 34	92	100	980 320,5
6	1 23	27	16	978 029,1	6	43 54	823	21	980 293,3
91	69 58	27		982 621,5	10 1	59 55	31		981 926,7
2	43 49	829		980 219,4	2	4 22	439		977 924,6
3	67 46	0	4 076	982 495,7	3	67 47	0	4 206	982 499,9
4	41 36	0	73	980 363,2	4	46 58	0	135	980 878,0
5	42 28	5	100	980 409,6	5	42 30	10	100	980 419,4
6	4 22	450	18	977 915,2	6	43 46	202	19	980 399,3
11 1	48 50	66		980 940,6	12 1	52 23	86		981 274,1
2	43 46	876		980 285,3	2	43 46	1 429		980 170,1
3	67 47	0	1 396	982 412,2	3	67 47	0	4 179	982 442,4
4	50 22	0	125	981 189,8	4	4 48	0	45	978 094,5
5	42 31	22	100	980 420,4	5	42 33	52	100	980 415,3

Продолжение Таблицы П 2.1

п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>	№ п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>
6	6 49	7	22	978 132,0	6	35 02	61	23	979 722,2
15 1	59 21	45		981 846,7	16 1	51 25	9		981 195,5
2	43 32	1213		980 177,4	2	43 34	355		980 359,8
3	67 49	0	3970	982 544,1	3	67 50	0	3846	982 502,3
4	12 48	0	135	978 318,2	4	14 41	0	20	978 400,3
5	42 32	183	100	980 271,1	5	43 33	350	150	980 360,5
6	69 58	27	24	982 623,7	6	69 26	150	25	982 604,5
17 1	50 04	96		981 061,4	18 1	60 10	20		981 915,3
2	4 22	450		977 926,9	2	43 28	2348		979 801,6
3	67 51	0	4476	982 499,4	3	67 55	0	1800	982 501,7
4	16 46	0	33	978 461,2	4	17 56	0	120	978 556,5
5	43 36	352	150	980 454,8	5	43 34	351	150	980 465,4
6	43 29	253	16	980 360,7	6	1 23	11	27	978 036,5
19 1	55 55	129		981 584,2	20 1	37 41	141		979 875,6
2	43 18	3210		979 473,1	2	43 36	502		980 369,9
3	67 59	0	3712	982 508,6	3	68 06	0	2629	982 481,5
4	19 09	0	250	978 639,4	4	35 59	0	140	979 961,8
5	43 35	351	150	980 465,5	5	43 18	76	110	980 353,3
6	6 56	7	28	978 098,5	6	8 58	7	30	978 241,1
21 1	43 32	7		980 509,2	22 1	37 47	35		979 979,0
2	43 17	1577		980 067,0	2	43 16	1848		979 882,5
3	68 09	0	4540	982 535,1	3	68 09	0	1900	982 510,8
4	27 36	0	100	979 161,6	4	22 25	0	18	978 861,2
5	35 15	34	200	979 729,2	5	35 13	198	200	979 712,5
6	9 58	3	31	978 169,7	6	1 19	19	32	978 081,3
23 1	33 53	30		979 686,4	24 1	14 24	5		978 385,5
2	43 16	1741		979 951,7	2	43 07	911		980 165,3
3	68 12	0	1930	982 530,4	3	68 16	0	1710	982 513,8
4	4 01	0	50	978 097,1	4	42 06	0	30	980 392,7
5	35 13	258	200	979 586,1	5	35 13	378	200	979 551,1
6	69 14	15	33	982 577,7	6	6 56	7	34	978 140,5
25 1	12 20	23		978 314,2	26 1	61 15	48		981 940,0
2	43 16	346		980 315,5	2	43 03	1419		980 021,7
3	67 01	0	1840	982 523,4	3	68 17	0	3290	982 492,3
4	20 21	0	55	978 689,8	4	5 44	0	45	978 094,1
5	43 35	251	250	980 470,3	5	35 14	673	200	979 609,9

Окончание Таблицы П 2.1

№ п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>	№ п/п	<i>B</i>	<i>H, м</i>	<i>h, м</i>	<i>g, мГал</i>
6	67 42	215	38	982 422,5	6	67 40	48	39	982 468,1
29 1	38 54	1		980 119,4	30 1	22 20	1		978 803,9
2	35 13	1 058		979 565,7	2	35 12	955		979 590,8
3	68 23	0	1 650	982 531,5	3	68 33	0	1 985	982 531,4
4	8 07	0	20	978 174,7	4	9 18	0	49	978 242,2
5	43 18	153	250	980 300,4	5	43 00	157	400	980 215,7
6	67 35	175	40	982 432,5	6	66 58	150	41	982 459,7
31 1	40 38	5		980 227,4	32 1	45 24	83		980 622,5
2	43 00	1722		979 960,1	2	35 12	918		979 600,2
3	68 33	0	2 660	982 508,7	3	68 33	0	4 375	982 575,7
4	10 07	0	65	978 208,3	4	11 12	0	70	978 257,2
5	35 12	726	200	979 599,4	5	43 00	219	200	980 302,5
6	21 16	120	42	978 660,1	6	14 24	5	43	978 385,5
33 1	12 20	23		978 314,5	34 1	8 58	7		978 242,4
2	43 03	1 047		980 108,3	2	43 00	1714		979 932,2
3	68 17	0	2 600	982 425,7	3	68 38	0	3 215	982 506,7
4	4 55	0	33	978 078,0	4	32 35	0	75	979 570,9
5	35 14	614	200	979 621,2	5	35 11	722	200	979 598,2
6	67 36	6	36	982486,3	6	19 20	2268	44	977 940,7
35 1	22 54	29		978 805,1	36 1	37 46	1		979 987,5
2	42 48	1219		980 059,4	2	42 47	1584		979 986,3
3	68 44	0	2 740	982 708,4	3	68 46	0	1 855	982 523,8
4	32 53	0	80	979 527,6	4	21 27	0	150	978 779,6
5	35 10	890	200	979 481,6	5	35 11	986	200	979 541,5
6	4 22	430	25	977 927,4	6	1 22	46	11	978 022,2
37 1	15 20	2		978 320,6	38 1	29 53	3		979 291,4
2	42 46	1139		980 097,5	2	35 11	1043		979 590,5
3	68 51	0	1 050	982 643,3	3	68 52	0	2290	982 517,1
4	34 35	0	85	979 668,1	4	12 21	0	89	978 303,8

Таблица П 3.1
Исходные данные для лабораторной работы № 3

Долгота а	Широта	101°	101,5°	102°	102,5°	103°
44°		980 301,5 630	980 312,4 600	980 292,9 750	980 289,1 820	980 231,0 1 080
43,5°		980 219,9 800	980 217,0 850	980 203,5 1 000	980 205,5 1 000	980 175,0 1 130
43°		980 174,1 930	980 141,4 1 010	980 131,6 1 070	980 113,8 1 150	980 093,0 1 200
42,5°		980 116,2 1 000	980 097,4 1 010	980 076,6 1 100	980 031,2 1 190	980 016,6 1 240
42°		980 056,2 980	980 032,6 1 090	980 020,7 1 130	979 990,0 1 220	979 957,3 1 310
41,5°		980 006,0 976	979 972,7 1 130	979 952,9 1 180	979 924,7 1 230	979 904,3 1 310
41°		979 993,2 900	979 972,4 960	979 940,7 1 070	979 901,3 1 240	979 861,5 1 300
40,5°		979 942,3 850	979 924,5 920	979 915,6 950	979 872,1 1 100	979 874,3 1 150
40°		979 887,8 870	979 879,0 950	979 839,2 1 000	979 792,8 1 180	979 765,0 1 240
Долгота а	Широта	103,5°	104°	104,5°	105°	105,5°
44°		980 128,4 1 510	980 020,3 2 000	980 129,1 1 420	980 104,2 1 470	980 112,9 1 350
43,5°		980 104,1 1 470	980 135,4 1 270	980 071,7 1 350	980 033,2 1 500	980 010,1 1 500
43°		980 092,2 1 250	980 069,8 1 450	80 025,9 1 470	979 974,0 1 520	979 940,3 1 600
42,5°		979 994,2 1 300	979 990,3 1 320	979 989,9 1 500	979 970,7 1 450	979 907,2 1 550
42°		979 919,6 1 400	979 901,7 1 430	979 905,6 1 400	979 906,8 1 480	979 702,3 2 530
41,5°		979 831,0 1 520	979 827,0 1 530	979 785,7 1 750	979 719,8 2 000	979 638,5 2 600
41°		979 809,2 1 520	979 766,5 1 620	979 697,7 1 800	979 657,8 200	979 557,0 2 670
40,5°		979 795,1 1 400	979 752,4 1 500	979 688,1 1 720	979 519,8 2 520	979 483,7 3 060

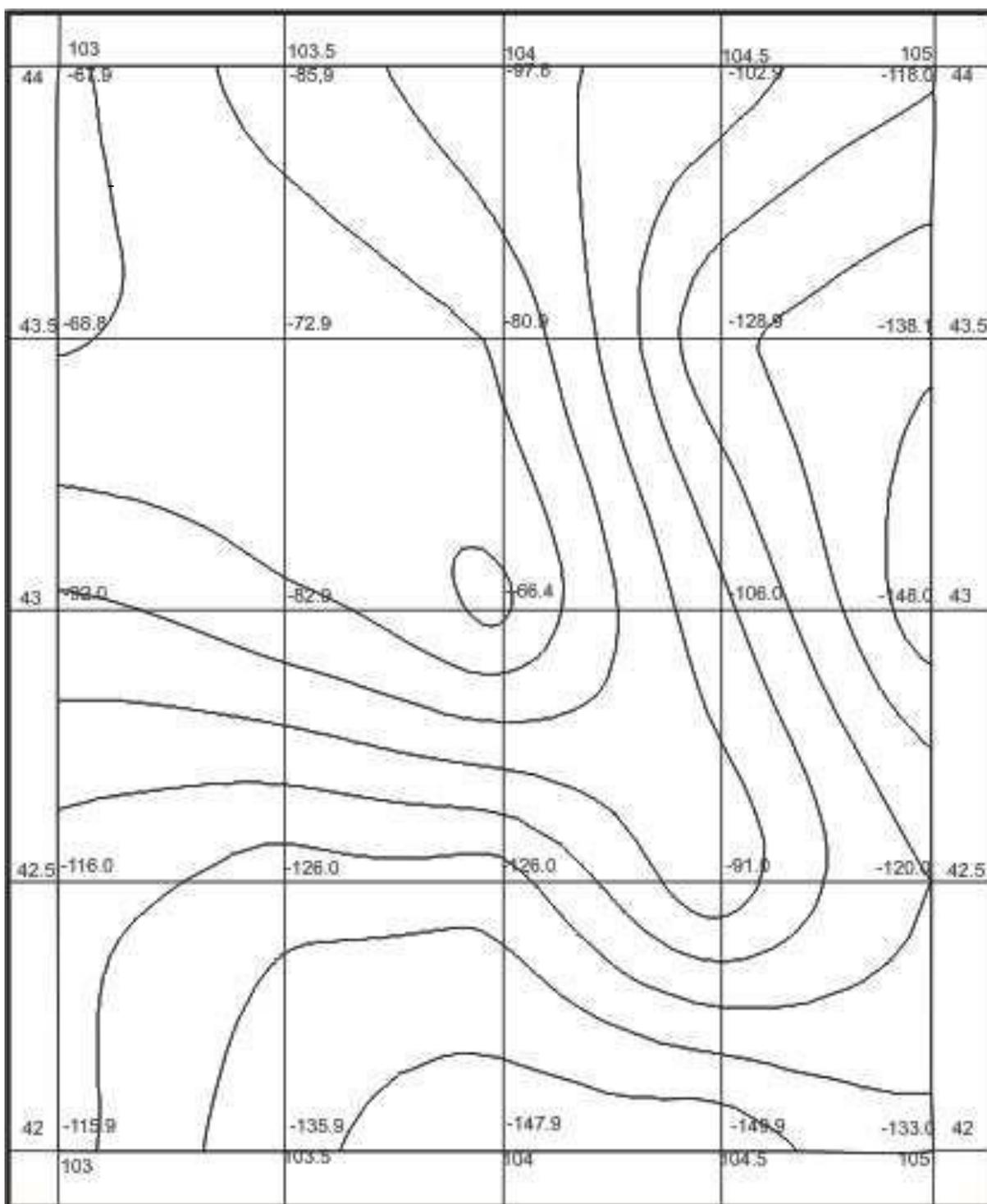


Рис П 4.1. Гравиметрическая карта аномалий силы тяжести с редукцией Буге в масштабе 1 : 1 000 000. Изоаномалы проведены через 10 мГал.

Приложение 5

Таблица П 5.1

Вычисление уклонений отвесной линии за влияние аномалий в центральной зоне 0–5 км

Номер сектора	2	6	10	14	16	8	4	12	$\zeta, \text{М}$
ξ	–	+	+	–	–	+	0	0	0,00032
η	–	–	+	+	0	0	–	+	Σ
0	–38	–47	–49	–42	–38	–50	–42	–47	–353
Σ	16	0,0186	ξ_1''	–0",2976	–12	0,0263	ξ''_2	–0",3156	–0",11296
Σ	–16	0,0186	η_1''	–0",1116	–5	0,0263	η''_2	–0",1315	
							ξ''_{0-5}	–0",6132	
							η''_{0-5}	–0",2431	

Таблица П 5.2

Окончательное значение гравиметрических уклонений отвесной линии для пункта

Зона	ξ_{gp}	η_{gp}
Центральная зона 0–5 км	–0",61	–0",24
5–100 км	–8",662	–3",522
100–300 км		
300–1000 км		
Σ	–9",13	–3",74

Таблица Таблица П 5.2

Окончательное значение высоты квазигеоида для пункта

Область интегрирования	$\xi, \text{М}$
Центральная точка	–0,11
$\Delta g_0 = -44 \cdot 0,00255 = -0,1122$	
Граница центральной области 0–5 км	–0,11
5–100 км	–2,57
Σ	–2,79

Оглавление

Введение.....	3
1. Лабораторная работа № 1. Обработка гравиметрического рейса.....	4
2. Лабораторная работа № 2. Вычисление аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе.....	7
3. Лабораторная работа № 3. Построение гравиметрических карт аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе.....	12
4. Лабораторная работа № 4. Вычисление составляющих уклонения отвеса.....	20
Библиографический список.....	23
Приложение 1.....	24
Приложение 2.....	25
Приложение 3.....	28
Приложение 4.....	29
Приложение 5.....	30
Оглавление.....	31

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ГРАВИМЕТРИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для подготовки курсового проекта
для студентов направления
21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование»

Составитель:

Шумейко Вячеслав Владиславович
Невинская Надежда Владимировна

Подписано к изданию
Уч.-изд. л. 1,1.
Объем данных 570 Кб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14