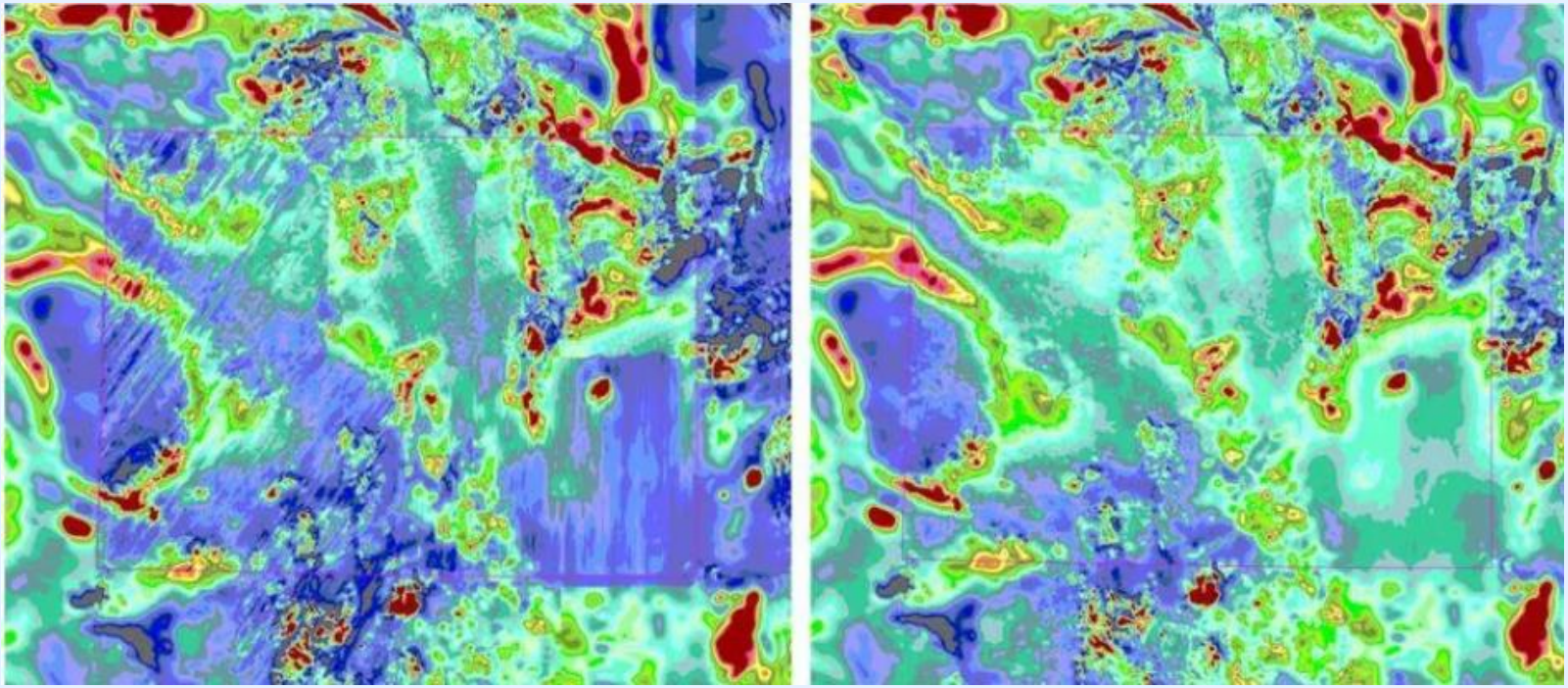
Л12. Применение гравиметрии в решении геодезических задач. Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений



Лектор Кенесбаева А.

Содержание

- Применение гравиметрии в решении геодезических задач
- Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений
- Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений

Как известно, сжатие Земли по результатам гравиметрических измерений можно определить по теореме Клеро. Обратимся к формулам (2.36) –(2.40), иллюстрирующим эту теорему

$$\gamma_0 = \gamma_e(1+\beta\sin^2 B - \beta_1 \sin^2 2B), \qquad (2.36)$$

γ – значение нормальной силы тяжести на поверхности уровенного эллипсоида;
γ *e* – значение нормальной силы тяжести на экваторе;
B − широта точки;
β – коэффициент, показывающий избыток силы тяжести на полюсе по сравнению с экватором, выраженный в относительной форме:

$$\beta = \frac{\gamma_P - \gamma_e}{\gamma_P}, \qquad (2.37)$$

где γ P – значение нормальной силы тяжести на полюсе;
γ P = 983,2 гал, γ *e* = 978,0 гал;
β1 – коэффициент, зависящий от сжатия Земли:

$$\beta_1 = \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha\,\beta}{4}. \qquad (2.38)$$

Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений

Вторая формула теоремы Клеро с членами второго порядка записывается в виде

$$\alpha + \beta = \frac{5}{2} q - \frac{17}{14} \alpha q , \qquad (2.39)$$

Из (2.39) может быть вычислено сжатие α эллипсоида:

$$\alpha = \frac{\frac{5}{2} q - \beta}{1 + \frac{17}{14} q} . \qquad (2.40)$$

Вторая формула теоремы Клеро (2.40) позволяет определить сжатие α земного эллипсоида по результатам гравиметрических измерений на поверхности Земли.

В формуле (2.36) коэффициент β1 относится к постоянным высшего порядка малости, уверенно определяемым при задании параметров нулевого порядка и порядка сжатия. Поэтому можно его считать известным и равным 0,000 007.

Таким образом, в формулу 2.36 входят два неизвестных коэффициента: γe и β .

Для их определения достаточно иметь значение γ0 в двух точках.

Но так как нормальную силу тяжести нельзя получить по результатам измерений, то для нахождения неизвестных γe и β используют измерения силы тяжести в точках поверхности Земли.

Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений

В этом случае γ0 выражается из формулы для определения аномалии в свободном воздухе в точке, расположенной внутри Земли.

$$(g-\gamma)_{св.в} = g-(\gamma_0+0{,}3086H)+4\pi f\delta\cdot H\,, \qquad (6.1)$$

$$\gamma_0 = g-\Delta\gamma+\Delta_1 g-(g-\gamma)_{св.в}\,, \qquad (6.2)$$

где $\Delta\gamma = 0{,}3086\,H$, а $\Delta_1 g = 4\pi f\delta H$.

Подставляя (6.2) в (2.36), запишем

$$\gamma_e+\gamma_e\beta\cdot\sin^2 B-(g-\Delta\gamma+\Delta_1 g+\gamma_e\beta_1\cdot\sin^2 2B) = -(g-\gamma)_{св.в}\,. \qquad (6.3)$$

Введем обозначения:

$$x=\gamma_e-978000,\qquad y=\gamma_e\cdot\beta\,,\qquad b=\sin^2 B\,,\qquad v=-(g-\gamma)_{св.в}\,,$$

$$l=-(g-\Delta\gamma+\Delta_1 g+\gamma_e\beta_1\sin^2 2B)+978000\,.$$

Тогда уравнение (6.3) примет вид

$$x+b\cdot y+l=v\,. \qquad (6.4)$$

Уравнение (6.4) рассматривают как уравнения погрешностей; их число равно числу точек с измеренными значениями силы тяжести.

Определение сжатия Земли по результатам гравиметрических измерений

Неизвестные x и y определяют под условием $[\,vv\,] = \min$ из решения системы нормальных уравнений

$$\left.\begin{aligned} n \cdot x + [b]y + [l] &= 0 \\ [b]x + [bb]y + [bl] &= 0 \end{aligned}\right\}, \qquad (6.5)$$

где n – число измерений или число точек с измеренными значениями силы тяжести.

После решения системы уравнений (6.5) находим определяемые коэффициенты $\gamma_e = x + 978000$ мГал, $\beta = \dfrac{y}{\gamma_e}$.

Сжатие α определим по формуле (2.40), параметр q в которой равен отношению центробежной силы $w^2 a$ на экваторе к силе тяжести γ_e на экваторе; для a = 6378,2 км, $w^2 = 53{,}175 \cdot 10^{-10}$(рад/с)^2 , γ_e = 978,0 Гал параметр q равен 0,003468.

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

Мы уже знаем, что гравитационное поле Земли неоднородно, так как оно зависит от:

- ✓ распределения масс внутри Земли и на ее поверхности,
- ✓ наличия искусственных сооружений,
- ✓ хозяйственной деятельности человека,
- ✓ формы Земли, рельефа и т.д.

Неоднородность гравитационного поля Земли для геодезистов проявляется в факте непараллельности между собой уровенных поверхностей и в аналогичной непараллельности отвесных линий, проходящих через различные точки земной поверхности.

Поэтому результаты геодезических измерений, выполненные в реальном гравитационном поле при положениях основных осей геодезических инструментов, совпадающих с уровенными поверхностями и направлениями отвесных линий, нуждаются во введении поправок, учитывающих эту неоднородность (см. рис. 1).

Так результаты угловых измерений, например, необходимо исправить поправками за уклонения отвесных линий, а в результатах нивелирования должна быть учтена непараллельность уровенных поверхностей.

Запишем формулы поправок за неоднородность гравитационного поля в каждый вид геодезических измерений.

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

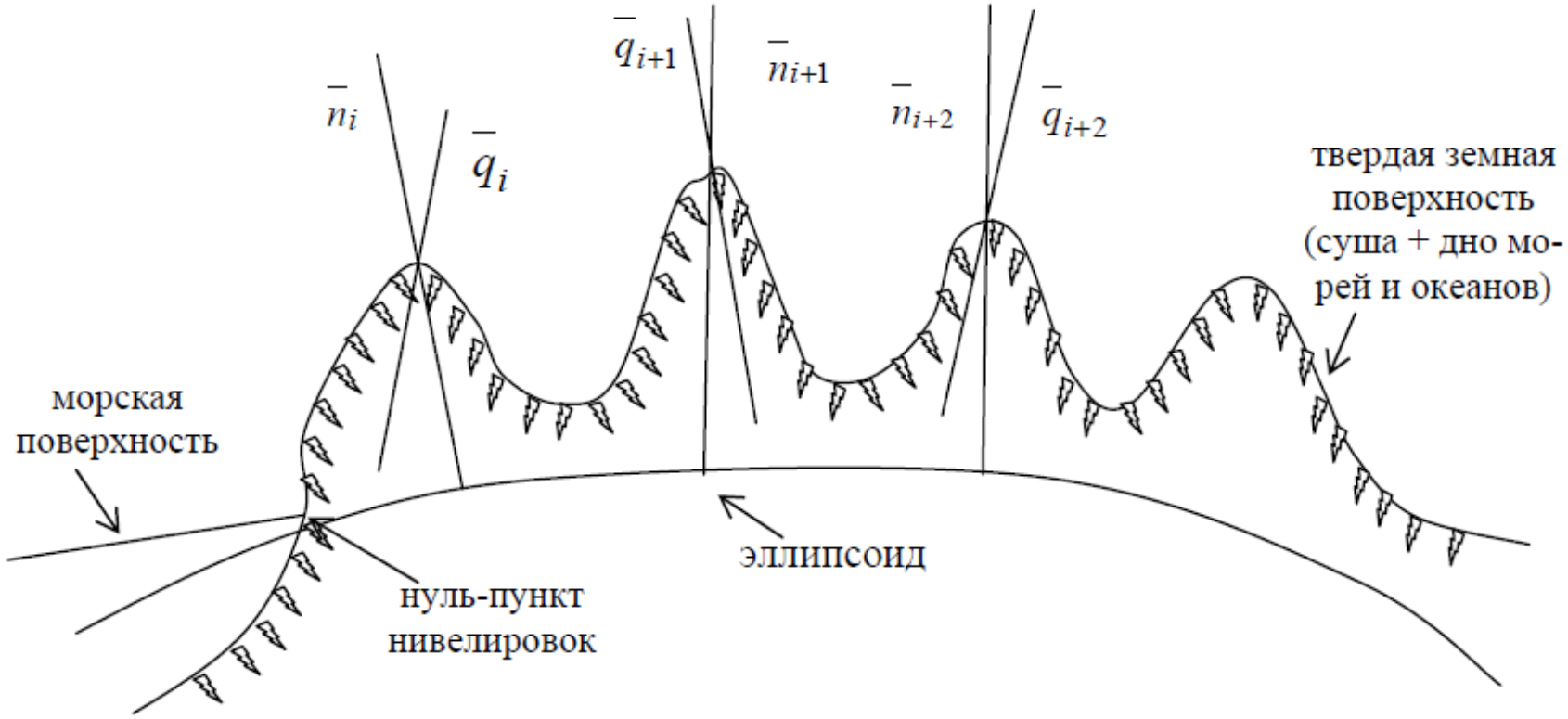


Рис. 1. Иллюстрация к проблеме редуцирования результатов геодезических измерений: $\bar{q}_i, \bar{q}_{i+1}, \bar{q}_{i+2}\ldots$ – направления отвесных линий, совпадающие с осями вращения геодезических инструментов в момент измерений; $\bar{n}_i\ldots$ – направления нормалей к эллипсоиду

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

1. Поправка за уклонение отвесных линий в *горизонтальное направление*

$$\delta_{\alpha_{in}} = -(\xi_i \sin A_{in} - \eta_i \cos A_{in}) \operatorname{ctg} Z_{in}, \qquad (6.6)$$

где $\delta_{\alpha_{in}}$ – поправка за уклонение отвесных линий в наблюдаемое горизонтальное направление *in*;

ξ_i, η_i – составляющие уклонения отвесных линий в меридиане и в первом вертикале в пункте наблюдения;

A_{in} – азимут направления *in*;

Z_{in} – зенитное расстояние направления *in*.

При обработке государственных геодезических сетей данная поправка учитывается всегда в триангуляции 1 класса и в горных районах триангуляции 2 класса, начиная с углов наклона свыше 2°. Заметим, что в этом случае в формуле (6.6) должны использоваться составляющие *астрономо-геодезического* уклонения отвесной линии.

2. Поправка за уклонение отвесных линий в *зенитное расстояние* δZin вычисляется по формуле

$$\delta_{Z_{in}} = \xi_i \cos A_{in} + \eta_i \sin A_{in}, \qquad (6.7)$$

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

По величине поправка δZin , как правило, значительно превосходит первую из перечисленных поправок, то есть $\delta\alpha in$.
Однако практически она никогда не вводится в результаты измерений из-за низкой точности определения зенитного расстояния.
Поправка за уклонение отвесных линий в зенитное расстояние в точности совпадает со значением уклонения отвеса в азимуте направления in , обычно обозначаемого ϑin . Таким образом,

$$\vartheta_{in} = \xi_i \cos A_{in} + \eta_i \sin A_{in} . \qquad (6.8)$$

3. *Влияние уклонения отвеса на измеренные расстояния.* Формула для вычисления поправки за уклонение отвесных линий в *длину линии* имеет вид

$$\delta_{S_{in}} = (\xi_i \cos A_{in} + \eta_i \sin A_{in}) \cdot h_{in} , \qquad (6.9)$$

где δsin – поправка в измеренное расстояние; hin – превышение между концами линии (точками i и n).
Расчеты показали, что при измерении линий с точностью порядка 1·10–6 поправку δs следует учитывать при углах наклона между концами измеряемой линии свыше 5°.
Однако следует помнить, что данная поправка вводится только в том случае, если линия измерена мерными проволоками, что в настоящее время достаточно редко.

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

В случае производства линейных измерений светодальномерами необходимость во введении данной поправки отпадает, так как положение оптических центров приборов, между которыми дает расстояние светодальномер, не зависит от состояния гравитационного поля.

4. Поправка δhin за неоднородность гравитационного поля в результаты *геометрического нивелирования* определяется по формуле

$$\delta_{h_{in}} = -\vartheta_{in} \cdot S_{in} = -(\xi_i \cos A_{in} + \eta_i \sin A_{in}) \cdot S_{in}, \qquad (6.10)$$

где h_{in} – превышение по секции; S_{in} – длина секции.

$$\text{При } \vartheta = 0,5'', \quad S = 2 \text{ км} \quad \Rightarrow \quad \delta_{h_{in}} = \frac{0,5'' \cdot 2 \cdot 10^6}{206265''} \approx 5 \text{ мм}.$$

Для длины секции в 2 км точность нивелирования I и II классов характеризуется ошибкой $m_{h_{in}} = 0,7 \text{мм} \cdot \sqrt{2 \text{км}} \approx 1$ мм. Таким образом, расчеты показывают необходимость учета неоднородности гравитационного поля в результатах высокоточного геометрического нивелирования.

Проанализировав приведенные формулы, можно заметить, что они все включают в себя составляющие уклонения отвесной линии в меридиане и в первом вертикале, соответственно ξi и ηi .

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

Из ранее пройденного материала мы знаем, что эти составляющие можно получить по формулам Венинг-Мейнеса (3.10)

$$\xi_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\cos A\, d\psi\, dA;$$
$$\eta_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\sin A\, d\psi\, dA, \qquad (3.10)$$

где A – азимут направления на текущую точку;

$Q(\psi)$ – функция Венинг-Мейнеса вида

$$Q(\psi) = \frac{1}{2\gamma \sin 1''}\cos^2\frac{\psi}{2}\left[\operatorname{cosec}\frac{\psi}{2} + 12\sin\frac{\psi}{2} - 32\sin^2\frac{\psi}{2} + \right. \qquad 3.11$$
$$\left. + \frac{1}{1+\sin\frac{\psi}{2}} - 12\sin^2\frac{\psi}{2}\cdot\ln\left(\sin\frac{\psi}{2}+\sin^2\frac{\psi}{2}\right)\right].$$

ψ −сферическое расстояние от текущей точки до точки, в которой определяется возмущающий потенциал.

Учет неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений

Однако следует помнить, что *по формулам Венинг-Мейнеса определяются составляющие гравиметрического уклонения отвесной линии*, то есть ξ *гр.* и η*гр.* , в то время как при обработке *государственных сетей* в формулах (6.6) – (6.10) надо *использовать составляющие астрономо-геодезического уклонения отвеса*.

В самом деле, в этом случае направление отвесной линии заменяется направлением нормали к эллипсоиду и при редуцировании результатов геодезических измерений с поверхности Земли на поверхность эллипсоида вводится поправка за угол между направлением нормали к эллипсоиду и направлением отвесной линии, то есть за астрономо–геодезическое уклонение отвесной линии.

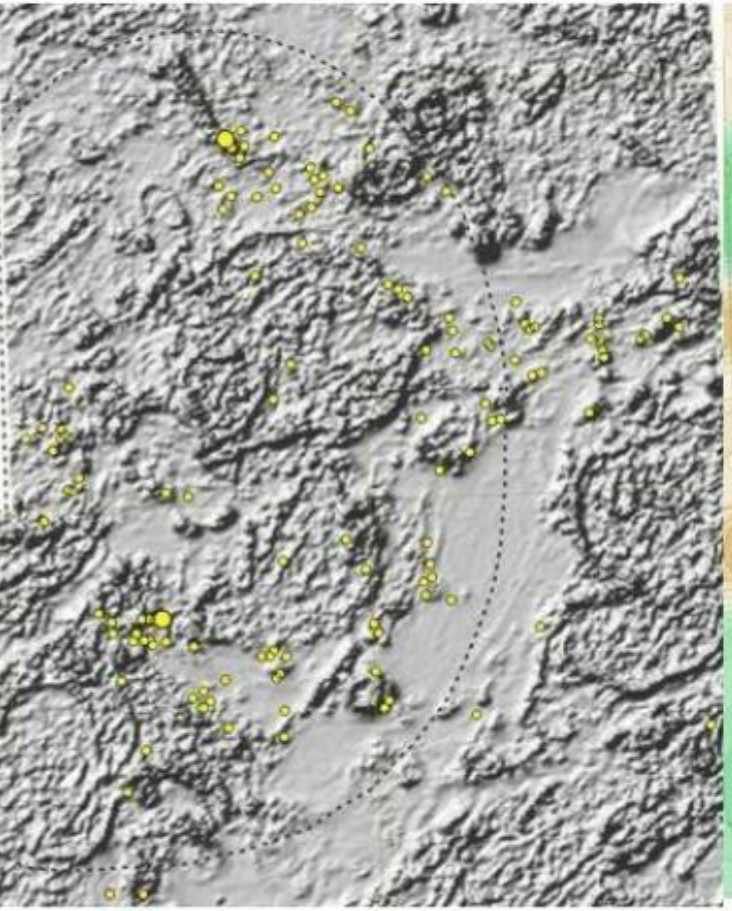
Переход от ξ *гр.*и η*гр.* к составляющим астрономо-геодезического уклонения отвеса для референц-эллипсоида Красовского осуществляют по формулам

$$\left.\begin{aligned} \xi_{а-г.} &= \xi_{гр.} + 0{,}171 \cdot H^{\gamma}_{км} \sin 2B \\ \eta_{а-г.} &= \eta_{гр.} \end{aligned}\right\}. \qquad (6.11)$$

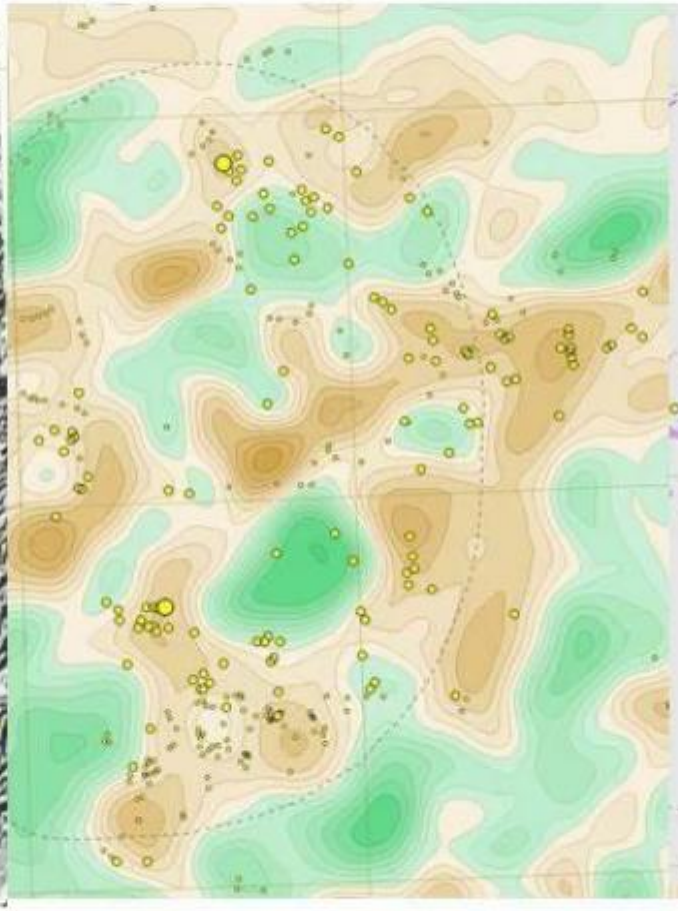
В (6.11) $\xi_{гр.}$, $\eta_{гр.}$ определяются по формулам Венинг-Мейнеса.

Основные геофизические признаки золотого оруденения

Месторождения и появления золота контролируются зонами высоких градиентов потенциальных полей и радиогеохимическими зонами с урановой специализацией



Модуль полного градиента магнитного поля



Вертикальный градиент гравиметрического поля



Карта U и Th-U зон в пределах вулканогенно-осадочных образований (технология АРК)

MyShare

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Вопросы учета неоднородности гравитационного поля при развитии инженерно-геодезических построений довольно новые, так как в общем случае до последнего времени считалось, что инженерно-геодезические работы выполняются на небольших территориях и гравитационное поле в пределах промышленной площадки следует считать однородным.

При этом силовые линии и уровенные поверхности гравитационного поля в инженерной геодезии используют в качестве материализованной координатной системы.

Такой взгляд на поле в подавляющем большинстве случаев оправдан, так как монтаж оборудования ведут с погрешностью 10-4 – 10-5, а съемочные работы с еще меньшей точностью.

При работах с погрешностью 10-5 – 10-6 гипотеза об однородности гравитационного поля в пределах промышленной или стройплощадки перестает себя оправдывать и приходится различать выбранные нами и потому геометрически определенные координатные линии от реально существующих неизвестных нам силовых линий.

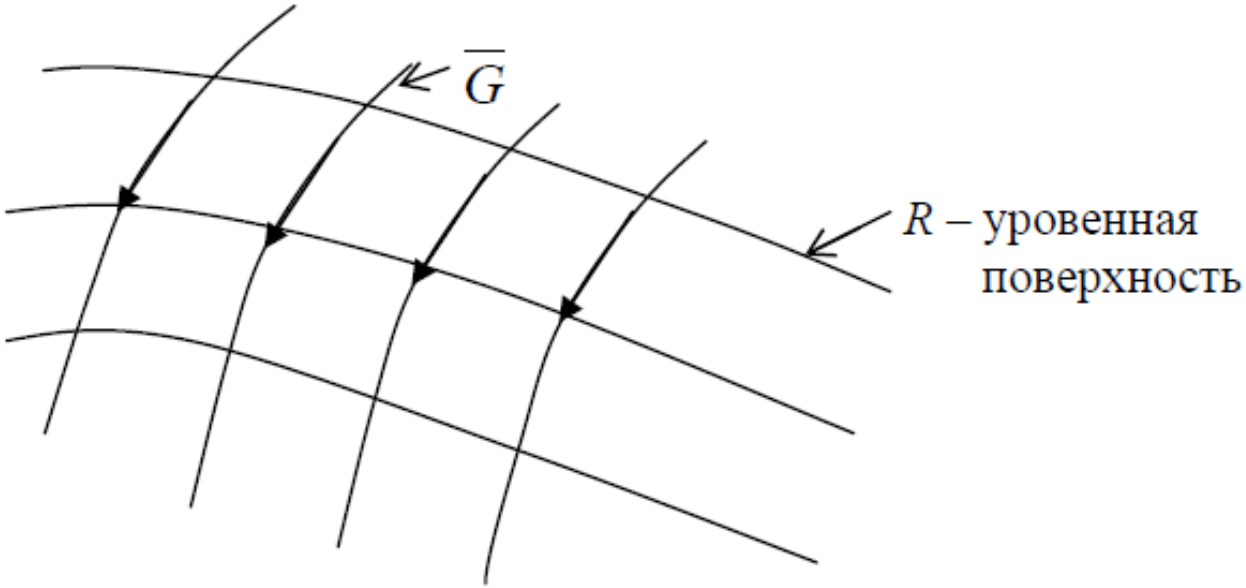
Как вам известно, силовой линией называется кривая, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором силы тяжести g .

Силовую линию на практике обычно считают плоской кривой, а касательную к ней называют отвесной линией. В действительности силовые линии имеют кривизну, они не совпадают с отвесными линиями и непараллельны друг другу.

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Вместе с силовыми линиями искривляются и поверхности, ортогональные силовым линиям (уровенные поверхности потенциала силы тяжести). Работать геодезисту в таких условиях становится трудно.

Но если не принимать все это во внимание, то точность 10-6 останется недосягаемой, что на практике в современных условиях может оказаться необходимым, так как в последние десятилетия требования к строительству таких инженерных сооружений как крупные радиотелескопы, ГЭС, ядерные ускорители, горные тоннели, дома повышенной этажности и т.д. очень возросли.



Ускоритель заряженных частиц

Ускори́тель заря́женных части́ц — класс устройств для получения заряженных частиц (элементарных частиц, ионов) высоких энергий.

Самые крупные ускорители являются дорогостоящими комплексами требующими международного сотрудничества.

К примеру, Большой адронный коллайдер в ЦЕРН представляющий собой кольцо длиной почти 27 километров является результатом работы десятков тысяч учёных из более чем ста стран.

Работа ускорителя основана на взаимодействии заряженных частиц электрическим и магнитным полями.

Электрическое поле способно совершать работу над частицей, то есть увеличивать её энергию. Магнитное же поле, создавая силу Лоренца, только отклоняет частицу, не изменяя её энергии, и задаёт орбиту, по которой движутся частицы.

Конструктивно ускорители можно принципиально разделить на две большие группы.

Это *линейные ускорители*, где пучок частиц однократно проходит ускоряющие промежутки, и *циклические ускорители*, в которых пучки движутся по замкнутым кривым, проходя ускоряющие промежутки по многу раз.

Можно также классифицировать ускорители по назначению: коллайдеры, источники нейтронов, бустеры, источники синхротронного излучения, установки для терапии рака, промышленные ускорители.

Ускоритель заряженных частиц



Применение:
Научные исследования
Стерилизация продуктов питания, медицинского инструмента
Лечение онкологических заболеваний, радиодиагностика
Производство полупроводниковых устройств Радиационная дефектоскопия
Радиационное сшивание полимеров
Радиационная очистка топочных газов и сточных вод

Вид на ускорительный центр Fermilab, США. Тэватрон (кольцо на заднем плане) и кольцо-инжектор

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

При выполнении различных видов геодезических измерений требуется учитывать и различные неправильности гравитационного поля.

При измерениях горизонтальных и вертикальных углов влияет отклонение оси вращения теодолита от координатной линии z, а при разбивке кривой с заданными геометрическими свойствами приходится учитывать форму уровенных поверхностей и расположение их относительно координатных.

В инженерной геодезии могут возникнуть и свои специфические задачи. Например, фундамент должен быть не плоскостью вообще, а непременно горизонтальной плоскостью. Поэтому, если требования к точности построения фундамента очень высокие, то выносить в натуру придется не плоскость, а уровенную поверхность потенциала силы тяжести, чтобы давление ей всюду было ортогонально. В подобных случаях необходимо различать геодезические высоты от динамических, силовые линии – от отвесных и координатных, и сознательно все их использовать в соответствии с решаемой задачей.

При учете неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений, выполненных в инженерно-геодезических сетях, используют приведенные ранее формулы (6.6) – (6.10) со следующими замечаниями.

Если инженерно-геодезические сети занимают большие площади территории, и обработка результатов геодезических измерений этих сетях выполняется с использованием референц-эллипсоида, то учет неоднородности гравитационного поля в результатах высокоточных геодезических измерений может быть произведен по тем же формулам, что и в государственных геодезических сетях.

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Однако очень часто в прикладной геодезии используется местная система координат, и промышленная площадка занимает относительно небольшую по площади территорию.
В этом случае можно пренебречь кривизной Земли и считать, что геодезические работы выполняются на плоскости.
Тогда отпадает необходимость во введении референц-эллипсоида, а значит, и в вычислении астрономо-геодезических уклонений отвесных линий.
Тем не менее, при обработке результатов геодезических измерений здесь все равно сохраняется необходимость учета непараллельностей отвесных линий и уровенных поверхностей в пределах промышленной площадки и приведения их к началу выбранной системы координат.
Тогда формулы по учету влияния неоднородности гравитационного поля на результаты инженерно-геодезических измерений будут иметь вид:

$$\delta_{\alpha_{in}} = -\left[(\xi_i - \xi_o)\sin A_{in} - (\eta_i - \eta_o)\cos A_{in}\right] \cdot \operatorname{ctg} Z_{in}\,; \qquad (6.12)$$

$$\delta_{S_{in}} = \left[(\xi_i - \xi_o)\cos A_{in} + (\eta_i - \eta_o)\sin A_{in}\right] \cdot h_{in}\,; \qquad (6.13)$$

$$\delta_{h_{in}} = -\left[(\xi_i - \xi_o)\sin A_{in} + (\eta_i - \eta_o)\cos A_{in}\right] \cdot S_{in}\,. \qquad (6.14)$$

В формулах (6.12) – (6.14) 0 0 ξ ,η – составляющие гравиметрического уклонения отвеса в меридиане и первом вертикале в начале выбранной системы координат.

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Остальные обозначения те же, что и в предыдущих формулах. С помощью этих формул решается задача по приведению различных направлений отвесных линий и положений уровенных поверхностей в пределах площадки к единому началу.

Особенностью инженерно-геодезических сетей является наличие больших углов наклона, достигающих 30 – 40 градусов.

При таких углах ctg$Z$ в формуле (6.12) равен 0,58 – 0,84. Поэтому при производстве высокоточных угловых измерений поправку $\delta\alpha$ *in* в инженерно-геодезических сетях требуется вводить практически всегда, а уклонение отвесной линии нужно знать по крайней мере с той же точностью, с которой выполняют измерение горизонтальных углов.

Поправка δ *Sin* вводится при точности измерений стороны порядка $1 \cdot 10^{-6}$, начиная с углов наклона свыше 5°.

При выполнении линейных измерений электрооптическими дальномерами необходимость во введении этой поправки вообще отпадает.

Из-за недостаточной точности измерения зенитного расстояния поправка за уклонения отвесной линии в нем практически не учитывается, хотя по величине она значительно превосходит поправку $\delta\alpha$.

В результаты нивелирования поправка за неоднородность гравитационного поля вводится, начиная с расстояния свыше 1 км.

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Основные этапы учета неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений.

Решение вопроса о необходимости учета неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений зависит от точности геодезических работ, вида сетей, а также от самих величин уклонений отвеса в районе работ.

Как правило, эти поправки вводятся в случае, если они соизмеримы с ошибками геодезических измерений.

Учет влияния неоднородности гравитационного поля целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1) расчет предельных колебаний уклонений отвеса, при которых еще можно не учитывать их влияние на результаты измерений;
2) оценка возможных колебаний уклонений отвеса в районе работ, сравнение их с предельно допустимыми, заключение о необходимости их учета;
3) определение действительных уклонений отвеса (выбор метода определения, проектирование гравиметрической съемки, полевые работы);
4) вычисление поправок за уклонение отвеса в результаты геодезических измерений.

Расчет предельного колебания уклонений отвеса, при которых еще может не учитываться их влияние на результаты измерений, выполняется на основании анализа конкретных формул и вида измерений.

Для *оценки возможных колебаний уклонений отвеса в районе работ* можно использовать гравиметрические карты, результаты измерения вторых производных потенциала силы тяжести, данные о геологическом строении земной коры или топографические карты.

Учет неоднородностей гравитационного поля в инженерной геодезии

Удобнее всего использовать гравиметрические карты, с помощью которых можно вычислить уклонения отвеса по формулам Венинг-Мейнеса.

В предгорных и горных районах, где аномалии гравитационного поля в значительной степени обусловлены топографическими массами, можно использовать *топографические уклонения отвеса, вызванные притяжением только топографических масс*. В равнинных районах топографические уклонения отвеса малы, а вариации уклонения отвеса вызываются неоднородностью земной коры. Поэтому для ориентировочной оценки уклонений отвеса можно использовать данные о геологическом строении местности.

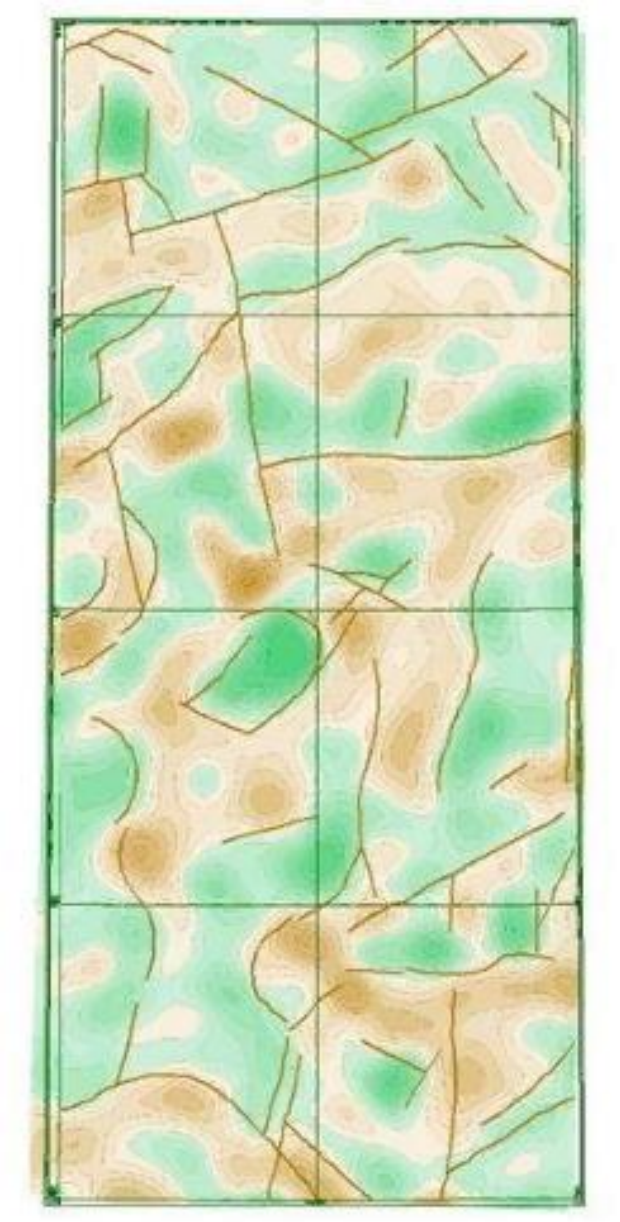
По известным положению, форме и аномальной плотности геологических тел можно вычислить создаваемый этими телами потенциал и его производные, то есть решить прямую задачу гравиметрической разведки.

Наконец, уклонения отвеса можно получить по результатам вариометрической съемки. Этот метод удобно применять в том случае, если в районе работ ожидаются значительные колебания уклонений отвеса, вызванные притяжением аномальных масс, залегающих на небольшой глубине.

При *определении действительных уклонений отвеса* используются те же методы, что и при оценке колебаний уклонений отвеса. Однако здесь необходимо более детальное знание неоднородностей гравитационного поля.

Поэтому при положительном заключении о необходимости учета неоднородности гравитационного поля на объекте проектируется либо гравиметровая съемка, либо вариометрическая съемка.

Выделение разломов по градиентам поля силы тяжести



Карта локальных аномалий силы тяжести

Полезные ссылки

- Кузьмин, В.И. Гравиметрия [Текст]: учеб. пособие / В.И. Кузьмин. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 193 с.
- Гравиметрия : учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия»/сост. и общ. ред. Г. А. Шароглазовой. – Новополоцк : ПГУ, 2006 – 196 с.
- http://www.myshared.ru/slide/922945/ Технология составления геофизической основы с прогнозом рудных полезных ископаемых на подготовительном этапе ГСР-200 (складчатые области). ЗАО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» - презентация
- https://present5.com/sovremennye-texnologii-interpretacii-gravimetricheskix-dannyx-pri-issledovaniyax-na/ Современные технологии интерпретации гравиметрических данных при исследованиях на нефть и газ