

АНАЛИЗ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Мирмахмудов Э.Р.¹, Минакова Е.В.²

¹Мирмахмудов Эркин Рахимжанович – кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра геодезии и геоинформатики,
Национальный университет Узбекистана;

²Минакова Екатерина Викторовна – ведущий технический редактор,
Государственное научно-производственное предприятие
«КАРТОГРАФИЯ»,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация: в данной работе приводится анализ первых гравиметрических измерений на территории бывшего Туркестана. Отмечается роль классических гравиметров при определении ускорения силы тяжести. На основе полевых измерений установлена гравиметрическая связь с Пулковской астрономической обсерваторией и Потсдамским телеграфным центром. Отмечается роль статических гравиметров, которые позволяют измерять разности ускорений силы тяжести на пунктах геодезической сети. В статье приводится традиционная модель, представляющая нормированные коэффициенты $S_{\text{пл}}$, $S_{\text{пл}}$ разложения потенциала силы тяжести по сферическим функциям. Перспективы использования спутниковых гравиметрических измерений изложены в работе.

Ключевые слова: ортометрическая высота, уклонение отвеса, сила тяжести, гравиметрическая сеть, спутниковый метод.

УДК 528.2

При определении координат пунктов, особенно высоты пункта относительно принятого значения, помимо неполярных и тектонических влияний, очень важную роль играет уклонение отвесной линии от нормали к поверхности эллипсоида [1]. Численные значения этих уклонений нужны для ориентирования референц-эллипсоидов, пересчета астрономических долгот, широт и азимутов в геодезические, приведение измеренных углов к значениям, которые будут получены после наклона вертикальной оси теодолита и ориентирования ее по нормали к эллипсоиду. Но выявить эти изменения косвенным способом представляется сложным и трудным, а использование геодезических измерений считается трудоемким и сложным. Например, для определения высоты точки “*b*” необходимо измеренное превышение относительно исходной точки “*a*”, которая должна быть учтена поправкой не параллельности уровенных

поверхностей, проходящих через указанные точки. Можно было бы эмпирически рассчитать эти изменения (рис. 1), но из-за неравномерности распределения плотности земного слоя, расположенного под исследуемым участком, величина будет приближенной. Поэтому поиски путей оптимального и точного определения поправок от принятого значения привели к проектированию определенных приборов и устройств, фиксирующих моменты колебания маятника. Такой прибор был разработан австрийским ученым Штернеке в 1881 (рис. 2). Один из таких приборов был приобретен Ташкентской астрономической обсерваторией (ТАО) для проведения измерений на территории бывшего Туркестана [2]. Тем самым решалась задача об определении фигуры поверхности, где производились геодезические измерения, но до этого надо было выполнить комплекс полевых измерений. Ответственным исполнителем этих исследований был опытный астроном ТАО, капитан Туркестанского военного округа Залесский П.К. С 1901 по 1916 гг. он выполнил измерения 400 точек с помощью маятникового прибора Штернеке относительно геодезического пункта ТАО, который использовался как исходный пункт для всех геофизических и геодезических исследований в Средней Азии, а также для координатной связи между удаленными регионами [3].

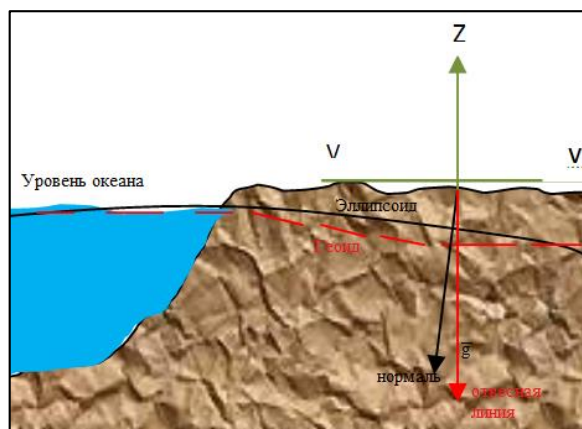


Рис. 1. Общая схема уклонения отвеса

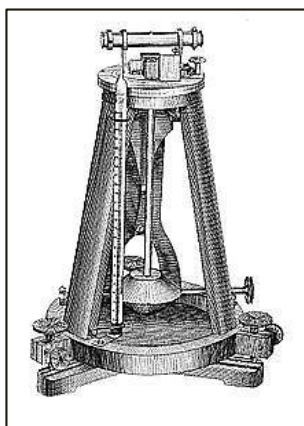


Рис. 2. Прибор Штернеке

Таким образом, впервые была установлена гравиметрическая связь с Пулковской астрономической обсерваторией и Потсдамским телеграфным центром (рис. 3).

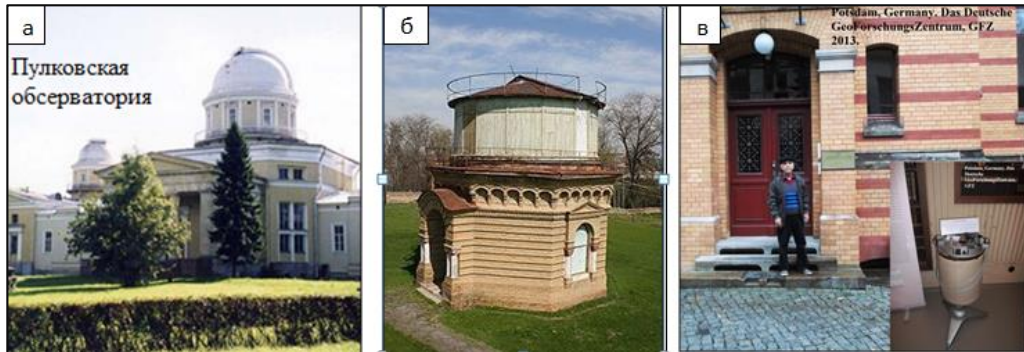


Рис. 3. Основные гравиметрические пункты: а - Пулковский, б - Ташкентский, в – Потсдамский

С 1930 г. измерения возобновились на новой методической основе четырехмаятниковым прибором Штюкрата под руководством Цукерваника Я.П. Были определены ускорения силы тяжести на 225 пунктах и осуществлена гравиметрическая связь между Ташкентом и Москвой [4]. В 1933 году начались работы по гравиметрической съемке всего региона СНГ с требованием определения 1 пункта на 1000км², но пункты астрономические не совпадали с тригонометрическими, тогда эти пункты были связаны с местными малыми полигонометрическими сетями. Были получены расхождения в координатах, с несомненностью подтвердившие первоначальный прогноз о наличии большого отклонения по широте $\Delta\varphi = -12.73''$ и долготе $\Delta\lambda = +16.31''$. Такое расхождение не могло быть объяснено ошибками, сопровождавшими определение координат, и поэтому можно предположить о наличии расхождения между геоидом и эллипсоидом [5].

В последние десятилетия полевые работы выполняются учреждениями, связанными с изучением физики Земли и производством геолого-геофизических разведок. Появление баллистических гравиметров привели к экономии трудовых ресурсов и повышению точности измерений, но эти приборы были дорогими и сложными в эксплуатации. Такие гравиметры используются в гравиметрических обсерваториях, где выполняются геофизические исследования Земли [6].

На производстве основной объем работ выполняется с помощью статических гравиметров, которые позволяют измерять разность ускорений силы тяжести на пунктах геодезической сети. Статические

гравиметры в сравнении с баллистическим гравиметром гораздо более мобильны (рис. 4 - а, б).

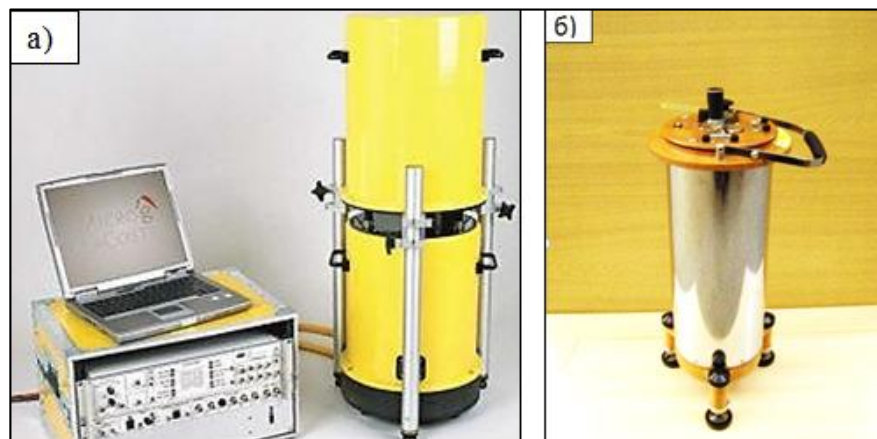


Рис. 4. Гравиметры: а – абсолютный (баллистический), б - статический

Гравиметрические измерения на территории Республики Узбекистан выполняются геофизическими и геологическими организациями для поиска и добычи полезных ископаемых. Однако эти измерения не пригодны для целей геодезии из-за специфики работ. Для того чтобы восполнить пробел в получении данных для геодезии, наиболее эффективным способом является использование спутникового метода измерений. Поскольку высоты на топографических картах получены путем геометрического и тригонометрического нивелирования, то уклонение отвеса приводит к значительным изменениям высот. Поэтому использование систематических геодезических измерений даст точную модель изучаемого региона. Для этого необходимо учитывать всевозможные изменения в окрестности исследуемого пункта, в первую очередь, это изменения географических координат с течением времени, обусловленные не только тектоникой плит, но и локальными смещениями.

В 1997 г. автор данной работы непосредственно участвовал в полевых геофизических измерениях с помощью статических гравиметров в окрестности Чадака, Папского района, Наманганской области (рис. 5- а, б). Эти измерения позволили выявить аномалии в местах, где имеются залежи месторождений, а также вариации ортометрических высот [7].

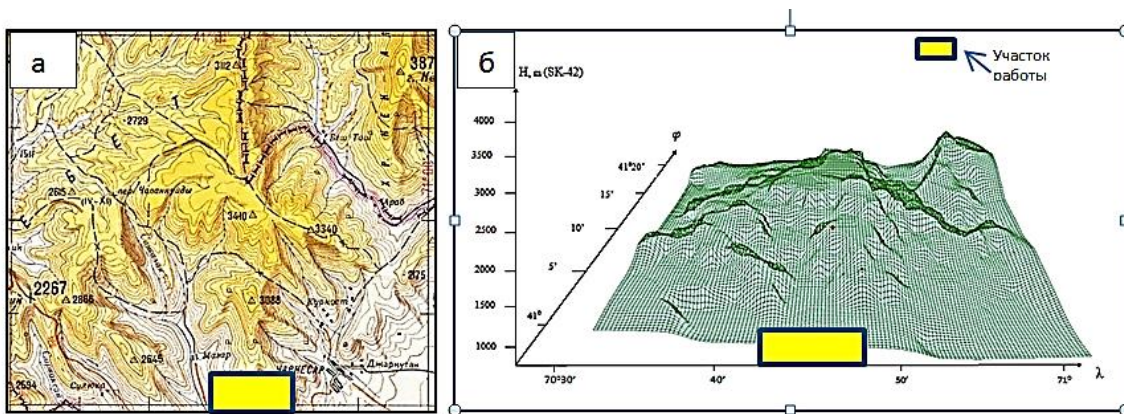


Рис.5. Фрагмент участка гравиметрических измерений в районе Чадака: а - топографическая карта, б - математическая модель

Система ортометрических высот имеет существенный недостаток – это изменение гравитационного поля на участке полевых измерений, которая зависит от распределения плотности вещества. Изучение неоднородности слоев можно путем бурения скважины до геоида на каждом репере, но это невозможно. Поправки за переход к системе ортометрических высот вычисляются на основе предположений о внутреннем строении, где прокладывают нивелирный ход. Поэтому ортометрические высоты реперов не являются строгими, тем не менее, эту систему высот используют во многих странах. Для территории Узбекистана и других сопредельных республик с 1977 года используются нормальные высоты.

В 2012 году на кафедре геодезии и картографии авторами данной статьи были произведены модельные расчеты определения колебаний частоты маятника для точки (point 2), которая является контрольной точкой геодезического четырехугольника географического факультета национального университета Узбекистана (рис. 6). Эти измерения выполнялись в рамках учебной программы “Космическая геодезия” и “Гравиметрия” для магистров направления “геодезия и картография” [8]. Дальнейшие исследования должны были привести к разработке оптимальной модели геоида.

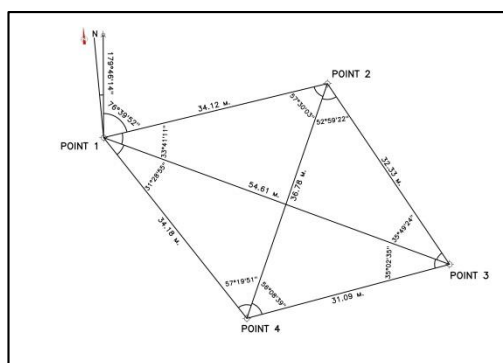


Рис.6. Учебный геодезический четырехугольник

В последнее время наибольшее распространение получили модели Земли, представляющие собой нормированных коэффициентов C_{nm} , S_{nm} разложения геопотенциала по сферическим функциям. Высота геоида ζ в точке со сферическими координатами r , φ , λ может быть вычислена по формуле

$$\zeta = \frac{GM}{r\gamma} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right]$$

где a – большая полуось, \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} -нормализованные гармонические коэффициенты, $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – нормализованные присоединенные функции Лежандра.

Нормальное значение ускорения силы тяжести на эллипсоиде определяется по формуле Сомильяна:

$$\gamma_0 = \frac{a\gamma_e \cos^2 B + b\gamma_p \sin^2 B}{(a^2 \cos^2 B + b \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}}$$

где a и b – большая и малая полуоси эллипсоида, γ_e и γ_p - ускорения силы тяжести на экваторе и на полюсе.

На практике эту формулу упрощают и дают в виде:

$$\gamma_0 + \gamma_e (1 + \beta \sin^2 B - \beta_1 \sin^2 2B)$$

С числовыми значениями формула приводится в следующий вид

$$\gamma_0 = \frac{978032.67714(1 + 0.00193185138639 \sin^2 B)}{(1 - 0.00669437999013 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}} 10^{-5} (\text{мгал}).$$

Указывая числовые значения коэффициентов β и β_1 . На высоте H метров по нормали над эллипсоидом сила тяжести γ равна:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial H} H \approx \gamma_0 - 0.3086H (\text{мГал}).$$

Поскольку исходными пунктами для географических исследований были пункты Ташкентской и Китабской обсерваторий, то были вычислены значения нормальной силы тяжести с интервалом $20'$ дуги по широте (рис. 7).

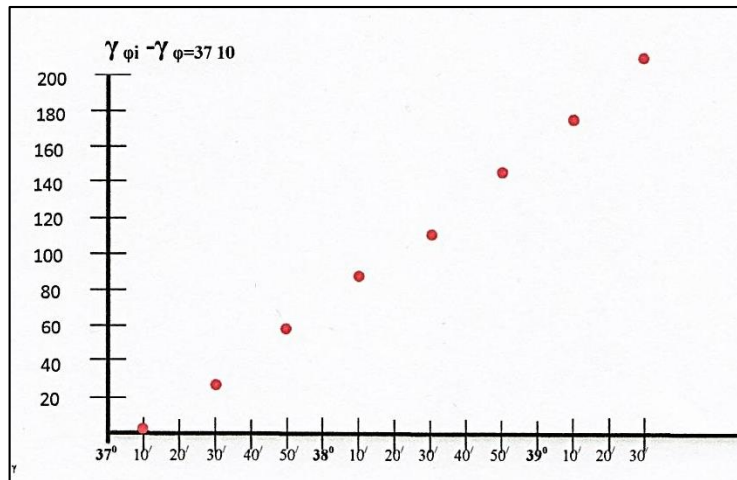


Рис. 7. Изменение значения нормальной силы тяжести для территории Кашкадарьинской области

Из рисунка 7 видно, что изменение на интервале 0.5° имеет линейный ход и возрастает пропорционально по диагонали. Что касается аномалии силы тяжести, то она зависит от рельефа местности и геологического состава исследуемого района.

Развитие гравиметрических исследований стимулировало достижения все более высокой точности моделей геопотенциала. В связи с этим перед сейсмологией и гравиметрией встает задача выявления горизонтальных плотностных неоднородностей в коре и мантии Земли с помощью спутниковых измерений [9].

Спутниковые измерения начались с момента запуска первого ИСЗ, но более детальные и точные определения начались в 1980-2000гг. с появлением высокочувствительных радиометрических приборов [10]. Особо следует подчеркнуть исследования, выполненные институтом изучения Земли г. Потсдам, Германия (GFZ). В 1995 году Федеральное министерство образования и научных исследований запустило флагманский проект спутника CHAMP (Challenging Mini Satellite Payload) совместно с NASA. Спутник массой 522 кг и длиной 8.33м был запущен 15 июля 2000г. и выведен на орбиту высотой 460км (рис.8). Позже в 2002 году были запущены высокоточные спутники GRACE-1 и GRACE-2, которые выполнили определение фигуры геоида с точностью 0.1- 0.2 м (рис. 9).

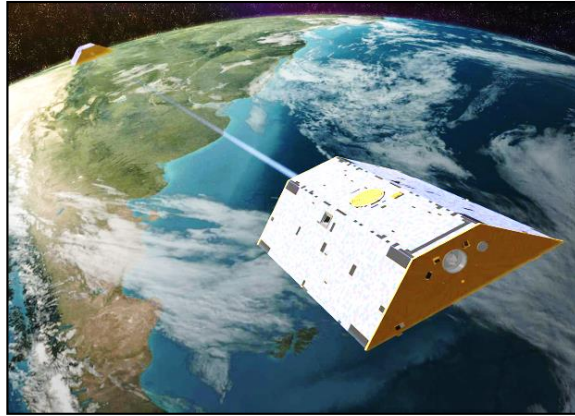


Рис. 8. ИСЗ CHAMP

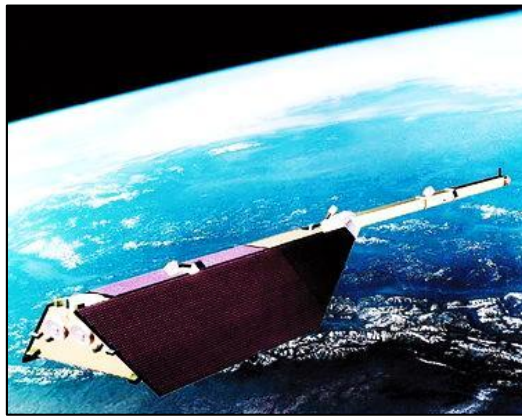


Рис. 9. Спутники GRACE-1 и GRACE-2

В последние годы были разработаны специализированные модули, которые установлены на спутнике GOCE (Gravity field and steady Ocean Circulation Explorer). Это точный геодезический прибор для исследования гляциологии и определения нуль-пункта отсчета высот с точностью 2-3см (рис. 10). Основная задача GOCE – это точнейшее измерение гравитационного поля Земли с точностью 0.01 мм/с^2 . Эти оценки базируются на сравнении геодезических данных о высоте с результатами ее измерения по спутникам системы GPS. Результаты геодезических измерений локальны, а модель движения спутников GPS- глобальны.

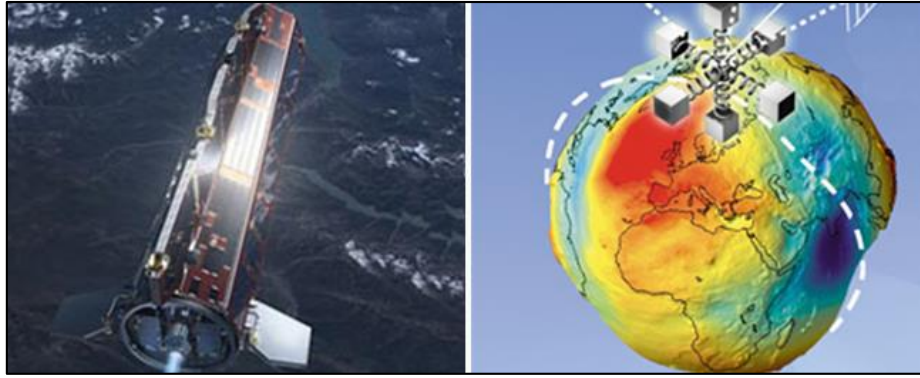


Рис. 10. Миссия GOCE

Из вышеописанного можно сделать вывод о том, что исследование гравитационного поля весьма сложная и трудоемкая задача, связанная с необходимостью объединения всех наземных и спутниковых измерений.

Список литературы

1. *Молоденский М.С.* Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. Тр. ЦНИИГАиК. Вып. 131. М.: Геодиздат, 1961. 252 с.
2. *Щеглов В.П.* Астрономическому институту 100 лет. Т.: Фан, 1973. 144 с.
3. *Залесский П.К.* Полный каталог астрономических пунктов Туркестанского военного округа и прилегающих к нему земель. Ташкент, 1914.
4. *Цукерваник Я.П.* Гравиметрические работы ТАО/Труды ТАО, 1935. Т. 5. С. 117-125.
5. *Померанцев И.И.* О фигуре геоида в районе Ферганской области/ Записки ВТО. Ч. LIV, 1897.
6. *Грушинский Н.П.* Теория фигуры Земли. М., 1976. 518 с.
7. *Мирмахмудов Э.Р. и др.* Об ортометрических высотах / ГЕОГРАФИЯ: Инновационные идеи, технологии и проекты. Ташкент, 2012.
8. *Мирмахмудов Э.Р. и др.* Космик геодезия. “Университет”. Ташкент, 2016. 120 с. (Узб.)
9. *Батраков Ю.В.* Использование ИСЗ для решения задач планетарной геодезии и геодинамики / Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики: труды 1 Орловской конференции. Киев, 1982. С. 195–200.
10. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП «ЦНИИмаш». [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.glonass-center.ru/ (дата обращения: 17.08.2020).