

Код МРНТИ 36.16.19

Х.М. Касымканова, Э.О. Орынбасарова, *К.А. Жанакулова, Б. Адебиев
Satabayev University (Алматы, Казахстан)

ПУТЬ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ: ОТ МАЯТНИКА К МИКРОЧИПУ

Аннотация. Создание актуального геоида и эталонного гравиметрического полигона – приоритетные задачи государства. Значения силы тяжести, определяемые современными технологиями, являются частью необходимых данных для решения этих задач. Получение точных значений силы тяжести на различных участках страны невозможно без применения высокоточных современных гравиметров. Применение актуальных относительных гравиметров в исследованиях силы тяжести Земли связано с надежностью данных, простотой и эффективностью использования инструментов, точностью выполняемых измерений и экономической целесообразностью. В данной статье изучены этапы совершенствования гравиметров, конструктивные особенности и принципы работы различных моделей.

Ключевые слова: сила тяжести, относительный гравиметр, ускорение силы тяжести, маятниковый метод, статический метод, статический гравиметр, CG-6 Autograv.

Микрочиптен маятникке дейінгі салыстырмалы гравиметриялық өлшеулер

Аңдатпа. Мемлекет үшін өзекті геоид және эталондық гравиметриялық полигон құру – басым міндеттер. Бүгінгі таңдағы технологиялар арқылы анықталатын ауырлық күшінің мәндері бұл міндеттерді шешу үшін қажетті деректердің бір бөлігі болып табылады. Елдің әртүрлі бөліктерінде ауырлық күшінің дәл мәндерін алу жоғары дәлдікті ұстаушы заманауи гравиметрлерді қолданбастан мүмкін емес. Заманауи салыстырмалы гравиметрлерді ауырлық күшін зерттеуде қолданудың себебі – деректердің сенімділігі, құралдардың пайдалануының ыңғайлылығы мен тиімділігі, өлшеулердің дәлдігі және экономикалық тиімділік. Бұл мақалада гравиметрлерді жетілдіру кезеңдері, конструкциялық ерекшеліктері және әр түрлі модельдердің жұмыс принциптері зерттелген.

Түпінді сөздер: ауырлық күші, салыстырмалы гравиметр, ауырлық күшінің үдеуі, маятниктік әдіс, статикалық әдіс, статикалық гравиметр, CG-6 Autograv.

The path of relative gravimetric measurements: from pendulum to microchip

Abstract. The creation of an up-to-date geoid and a reference gravimetric polygon are priority tasks of the state. Gravity values determined by modern technologies are part of the necessary data to solve these problems. Obtaining accurate gravity values in various parts of the country is impossible without the use of high-precision modern gravimeters. The use of current relative gravimeters in studies of the Earth's gravity is associated with the reliability of data, the simplicity and efficiency of using tools, the accuracy of measurements performed and economic feasibility. This article examines the stages of improving gravimeters, design features and principles of operation of various models.

Key words: gravity, relative gravimeter, gravity acceleration, pendulum method, static method, static gravimeter, CG-6 Autograv.

Введение

Реализация проекта по созданию актуального геоида Казахстана, а также построение эталонного гравиметрического полигона требует наличие актуальных точных гравиметрических данных, получение которых возможно высокоточными измерениями силы тяжести.

Гравиметрические данные получают в результате измерения абсолютных и относительных значений силы тяжести [1].

Определение абсолютной силы тяжести достигается по результатам измерений на одном пункте путем вычисления полного значения g (ускорение силы тяжести). Относительные значения определяются путем вычисления приращения силы тяжести между измеренными пунктами [2]. Устройство, выполняющее измерение значений ускорения силы тяжести, называется гравиметр. В зависимости от вида измерения различают абсолютные и относительные гравиметры.

Популярность относительных гравиметров обуславливается совокупностью таких факторов, как простота методики измерений, эффективность проведения съемок, портативность оборудования, высокая точность получаемых данных, экономическая целесообразность. Сегодня на рынке передовых технологий в области гравиметрии особой популярностью пользуются относительные гравиметры производителей Scintrex (Канада), LaCoste and Romberg (США), ZLC (США), Micro-g LaCoste (США), GF Instruments (Чехия).

Методы исследования

В процессе изучения появления и развития относительных гравиметров было выявлено, что первые значения

ускорения силы тяжести получены в 17 веке при помощи маятникового метода, принцип которого был заложен при проектировании первого гравиметрического прибора [3].

В 1656 году голландский ученый – изобретатель Х. Гюйгенс впервые использовал маятниковый метод измерения g (ускорения силы тяжести). Выбор данного метода был обусловлен его механической простотой и незначительным влиянием амплитуды на период колебаний, так как при малых амплитудах колебаний период идеального маятника зависит только от его длины и гравитации.

Несмотря на кажущуюся простоту, маятниковые измерения силы тяжести сопряжены с трудностями, связанными с точным определением длины маятника. Тем не менее, данный метод был единственным решением в определении гравитации до конца 19 века. Британский физик Генри Кэтер в ходе проведения экспериментов по точному определению ускорения силы тяжести сделал предположение, что если длина маятника остается постоянной во время измерений, то различие в силе тяжести между двумя точками наблюдения относительно друг друга определяется разницей в периодах колебаний. Так была заложена концепция относительной гравиметрии [4].

В первой половине 20 века английский и швейцарский физики Р. Хартли, А. Граф предложили систему с подвижным грузом для неастирированных металлических гравиметров, работающих по принципу вертикальных пружинных весов (рис. 1а). Точность измерения данным методом достигалась $\pm 10 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. Их конструкция была реализована в гравиметре Gs3 компании «Аскания» в Берлине.

В этот же период компания Gulf Research and Development разработала относительный гравиметр, основанный на принципе Хойта (рис. 1б), при котором изме-

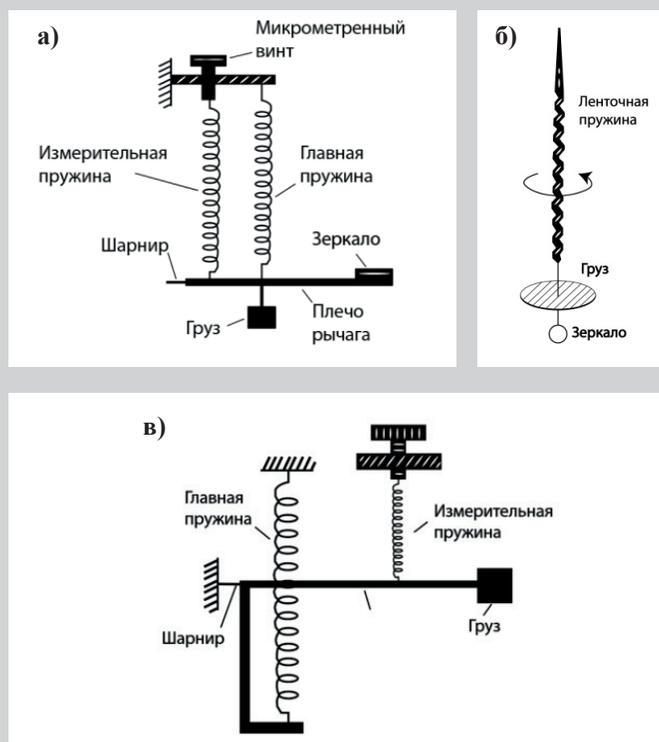


Рис. 1. Конструкция гравиметра по принципу:
 а) Хартли (система с вертикальным смещением);
 б) Хойта (вертикальная крутильная система);
 в) Трумана (астатизированные рычажные пружинные весы).

Сурет 1. Гравиметрдің конструкциясы принциптері бойынша: а) Хартли (вертикальды ығысуы бар жүйе); б) Хойт (вертикальды бұрау жүйесі); в) Труман (астазиатталған терізекті пружиналы таразы).

Figure 1. Gravimeter designs based on the principles of: a) Hartley (vertically displaced system); b) Hoyle (vertical torsion system); c) Truman (astatized lever spring balance).

рение ускорения силы тяжести определяется по степени закручивания вертикальной ленточной пружины. Диапазон измерений $300 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$, вес 40 кг, смещение нуля-пункта несколько $\text{мкм} \cdot \text{с}^{-2}$, точность $\pm 2-3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. А американский физик О. Труман разработал прибор, где вертикальная удерживающая пружина крепилась к нижнему концу рычага. Это модификация позволила повысить чувствительность прибора в 200 раз (рис. 1в). Точность измерений данного гравиметра $\pm 2-3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$, габариты: диаметр 0.6, высота 1 м, вес 60 кг.

Параллельно им немецкие геодезисты О. Тиссен и Г. Шлезенер разработали гравиметр, основанный на принципе измерения наклона кварцевого рычага под действием силы тяжести. Рычаг массой 20 г приводится в равновесие с помощью вертикальной металлической пружины.

Для обеспечения точных измерений прибор имеет теплоизоляцию, барометрическую компенсацию и две чувствительные системы, расположенные под углом 180° . В последующем немецкая фирма Seimos GmbH выпустила более 100 гравиметров, в основе которых лежит конструкция Тиссена-Шлезенера. Габариты данных гравиметров были улучшены и приведены в более портативный

вид: $0.3 \times 0.3 \times 0.8 \text{ м}$, вес 20 кг, точность $\pm 2-3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. Однако центр масс системы гравиметра Тиссена-Шлезенера расположен выше плоскости рычага, что обуславливает ее слабую астазированность (чувствительность), приводящую к менее точным показаниям прибора.

Данный недостаток был устранен французским изобретателем Л. Ла Коста совместно с немецким геодезистом А. Ромбергом путем уравнивания импульса гравитационных и упругих сил за счет внедрения в прибор наклонной металлической пружины нулевой длины (рис. 2).

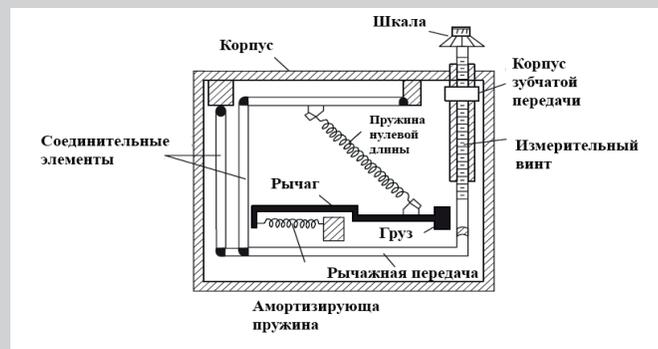


Рис. 2. Принцип гравиметра Ла Коста-Ромберга (астатизированные рычажные пружинные весы).
Сурет 2. Ла Коста-Ромбергтің гравиметрінің принципі (астазиатталған терізекті пружиналы таразы).
Figure 2. La Coste-Romberg gravimeter principle (astatized lever spring balance).

В 1948 году была представлена модель D гравиметра Ла Коста-Ромберга, в 1956 г. – модель G. Измерительный диапазон около $70\,000 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$, точность измерений $\pm 0,4 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. Этот тип гравиметра доминировал в области относительной гравиметрии около 50 лет. В процессе эксплуатации был выявлен недостаток в использовании металлических пружин в гравиметрах, а именно, температурные изменения отрицательно влияли на их упругость, за счет чего пружина претерпевает деформацию начального состояния, что приводило к неточности измерения. Данная проблема была решена с внедрением кварцевого стекла вместо металла физиком-изобретателем Сэмом Уорденом (рис. 3).

Гравиметр Уордена, разработанный фирмой Tahas Instruments, Inc представляет собой компактный и портативный инструмент для измерения силы тяжести. Основные характеристики данного гравиметра: компактный корпус (диаметр 0.18, высота 0.36 м), легкий вес (вес 3.4 кг), наличие термостата, обеспечивающего стабильность работы прибора в различных температурных условиях.

В 1987 г. фирма Scientrix представила миру относительный гравиметр Scientrix CG-3 Autograv. CG-3 Autograv представляет собой автоматизированный гравиметр с микропроцессором в сочетании с чувствительной системой из плавленого кварца с элементами, созданными по новейшим технологиям, охватывающим широкий диапазон силы тяжести [5]. Размеры корпуса гравиметра $0.24 \times 0.31 \times 0.32 \text{ м}$, вес 12 кг со встроенным аккумулятором. При расстояниях между пунктами 10 км и более приращение силы тяжести можно определить с точностью $\pm 0.1-0.3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$.

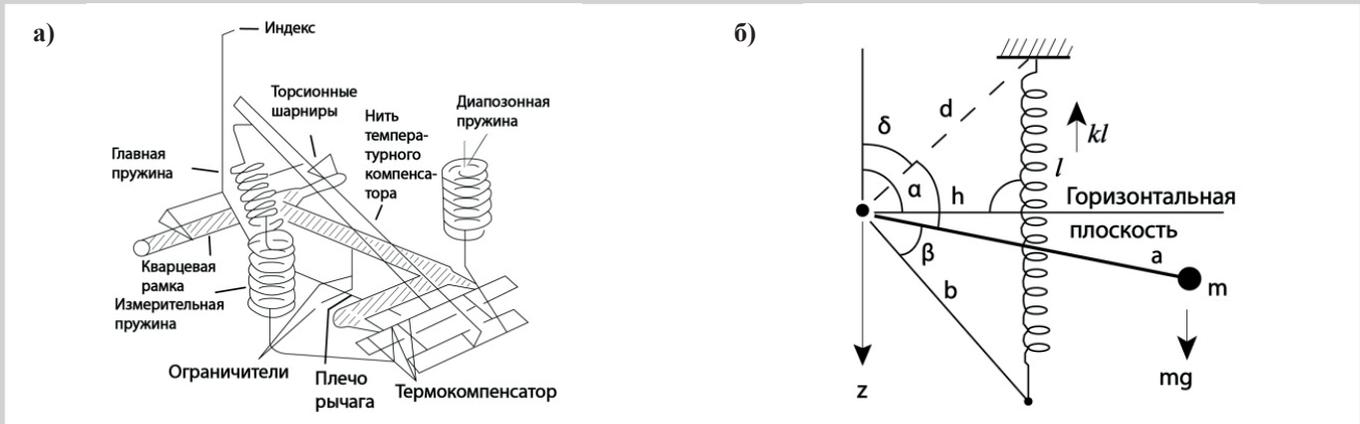


Рис. 3. Система Уордена: а) конструкция гравиметра Уордена; б) принцип гравиметра Уордена: kl – жесткость пружины; l – длина пружины; h – расстояние между точкой подвеса и центром массы груза; β – угол отклонения пружины от вертикали; a – расстояние от точки подвеса до оси вращения; b – расстояние от оси вращения до центра массы груза; m – масса груза; g – ускорение свободного падения; z – вертикальная ось; mg – сила тяжести, действующая на груз; d – точка подвеса, действующая на груз; d/δ – упругая деформация пружины.

Сурет 3. Уорден жүйесі: а) Уорден гравиметрінің конструкциясы; б) Уорден гравиметрінің принципі: kl – серіппенің қаттылығы; l – серіппенің ұзындығы; h – суспензия нүктесі мен жүк массасының центрі арасындағы қашықтық; β – серіппенің вертикальдан ауытқу бұрышы; a – суспензия нүктесінен айналу осіне дейінгі қашықтық; b – айналу осінен жүк массасының центріне дейінгі қашықтық; m – жүктің салмағы; g – ауырлық күшінің үдеуі; z – тік ось; mg – жүктемеге әсер ететін ауырлық күші; d – жүктемеге әсер ететін суспензия нүктесі; d/δ – серіппенің серпімді деформациясы.

Figure 3. Worden System: a) Worden gravimeter design; b) Worden gravimeter principle: kl – is the stiffness of the spring; l – is the length of the spring; h – is the distance between the suspension point and the center of mass of the load; β – is the angle of deviation of the spring from the vertical; a – is the distance from the suspension point to the axis of rotation; b – is the distance from the axis of rotation to the center of mass of the cargo; m – is the mass of the load; g – is the acceleration of gravity; z – is the vertical axis; mg – is the force of gravity acting on the load; d – is the suspension point acting on the load; d/δ – is the elastic deformation of the spring.

Современные методы измерения ускорения силы тяжести [6] делятся на динамические (наблюдение за движением) и статические (наблюдение за равновесием) под действием силы тяжести и компенсирующей силы. К динамическим методам относятся маятниковые (рис. 4) и баллистические методы измерения. Маятниковый метод основан на формуле Гюйгенса:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где T – период колебаний;

g – ускорение силы тяжести;

l – приведенная длина.

В основе баллистического метода лежит уравнение свободно падающего тела:

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{gt^2}{2}, \quad (2)$$

где S – путь, пройденный свободно падающим телом;

S_0 – начальный путь;

V_0 – начальная скорость;

t – время падения тела.

Существует два основных метода определения относительных значений силы тяжести: маятниковый и статический. Маятниковый основан на многократном измерении периода колебаний одного и того же маятника неизменной длины в разных точках.

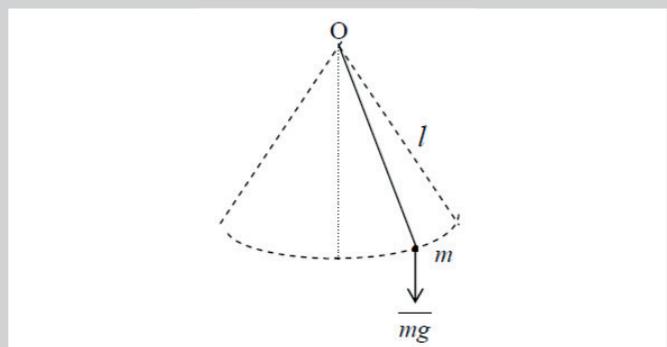


Рис. 4. Маятниковый метод измерения ускорения силы тяжести.

Сурет 4. Гравитациялық күштің жеделдеуін өлшеудің маятниктік әдісі.

Figure 4. Pendulum method for measuring gravity acceleration.

В статическом же методе измерения силы тяжести наблюдают за состоянием равновесия тела в реальном гравитационном поле под действием двух сил: силы тяжести и некоторой компенсирующей силы. Уравнение статического равновесия выглядит следующим образом:

$$m\bar{g} + \bar{F} = 0, \quad (3)$$

где $m\bar{g}$ – сила тяжести;

\bar{F} – компенсирующая сила.

В основе статических гравиметров лежит принцип измерения разности между силой тяжести и компенсирующей силой (рис. 5).

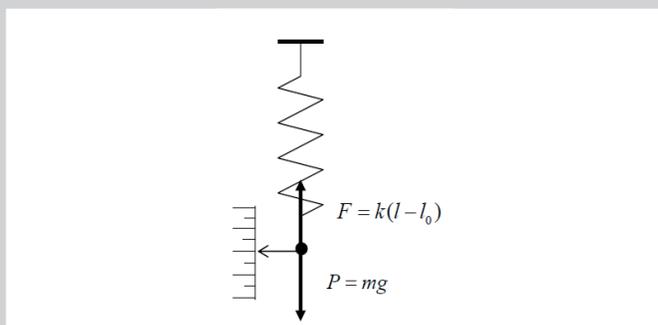


Рис. 5. Статический метод измерения ускорения силы тяжести.

Сурет 5. Гравитациялық күштің жеделдеуін өлшеудің статикалық әдісі.

Figure 5. Static method for measuring gravity acceleration.

Пружина имеет начальную длину l_0 . Подвесив на пружину груз P массой m , то под действием тяжести этого груза пружина растянется до длины l . В результате сила тяжести mg уравнивается силой упругой деформации пружины $k(l - l_0)$, где k – коэффициент упругости пружины. Можно представить следующее уравнение:

$$mg = k(l - l_0). \quad (4)$$

Деформация пропорциональна нагрузке, согласно закону Гука.

На рисунке также отображены шкала и индекс от груза. Если при некотором номинальном значении $g = g_0$ индекс маятника равен нулю, уравнение статического состояния имеет вид:

$$mg_0 = k(\bar{l}_0 - l_0), \quad (5)$$

где \bar{l}_0 – длина пружины при $g = g_0$.

При переходе на точку I с $g = g_1$, получим следующее уравнение статического равновесия:

$$m g_1 = k(l - l_0). \quad (6)$$

При $g_1 > g_0$ пружина увеличивается до величины l и индекс маятника изменит свое положение на величину $(l - l_0)$ относительно первоначальной длины пружины. Разность уравнений (5) из (6) и принимая, что $m = 1$, получим основное уравнение измерения приращения ускорения силы тяжести между двумя пунктами статическим методом:

$$(g_1 - g_0) = k(l - \bar{l}_0). \quad (7)$$

Хотя система, показанная на рис. 5, упругая, она недостаточно чувствительна к реальным изменениям ускорения силы тяжести. Для повышения чувствительности в гравиметрах применяется принцип сейсмографа Голицына (рис. 6).

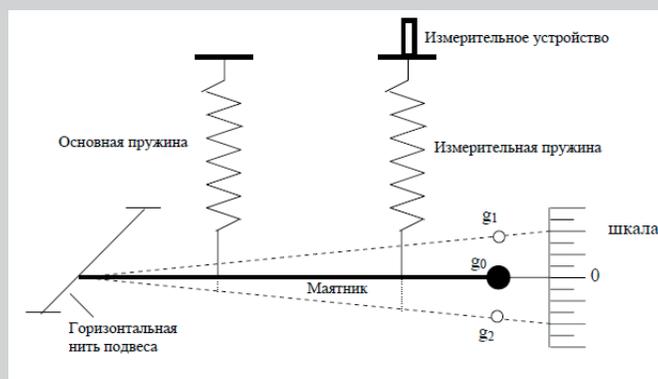


Рис. 6. Схема статического гравиметра, основанная на принципе сейсмографа Голицына.

Сурет 6. Голицын сейсмографының принципіне негізделген статикалық гравиметрдің схемасы.

Figure 6. Diagram of a static gravimeter based on the principle of the Galitzin seismograph.

В гравиметрах этого типа маятник с единичной массой подвешен на горизонтальной нити. Основная пружина неустойчиво удерживает его в горизонтальном положении. При этом коэффициент упругости пружины подобран таким образом, что при номинальном значении ускорения свободного падения $g = g_0$ длина пружины равна l_0 , а индекс маятника находится на нуле шкалы.

При изменении g маятник отклоняется, что приводит к растяжению или сжатию пружины до новой длины l . При $g_1 > g_0$ пружина удлиняется, а при $g_1 < g_0$ – укорачивается. Это отклонение фиксируется изменением положения индекса маятника относительно нуля шкалы.

Современные гравиметры обычно используют нулевой или компенсационный метод. В этих методах измерение происходит, когда индекс маятника находится на нуле шкалы. Гравиметр оснащен измерительной пружиной, микрометрическим винтом и отсчетным устройством. Вращением винта пружина удлиняется или укорачивается, возвращая маятник в нулевое положение, соответствующее $g = g_0$. После этого производится отсчет по отсчетному устройству в оборотах пружины.

При работе со статическим гравиметром для определения разности ускорения силы тяжести между двумя пунктами проводят измерения на каждом из них, используя один и тот же прибор. Результаты измерений, полученные в мГалах, сравнивают между собой. Разность этих значений и будет соответствовать приращению ускорения силы тяжести между данными пунктами (рис. 7).

$$c \cdot S^A = S_{\text{мГал}}^A,$$

$$c \cdot S^B = S_{\text{мГал}}^B,$$

$$\Delta g_{BA} = S_{\text{мГал}}^B - S_{\text{мГал}}^A, \quad (8)$$

где c – постоянная гравиметра в мГал/об;

S^A, S^B – отсчеты по гравиметру в точках А и В в оборотах.

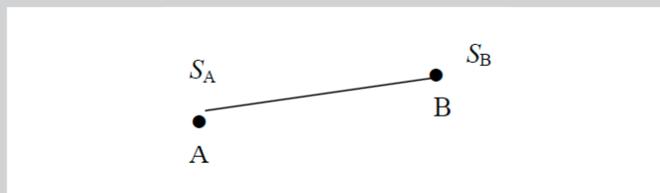


Рис. 7. Принцип измерения ускорения силы тяжести статическим гравиметром.

Сурет 7. Статикалық гравиметрмен гравитациялық күштің жеделдеуін өлшеу принципі.

Figure 7. Principle of measuring gravity acceleration with a static gravimeter.

Таким образом, современные статические гравиметры основаны на статическом методе относительных измерений тяжести.

Результаты

Произведен анализ актуальных моделей современных относительных гравиметров. На протяжении нескольких десятилетий, начиная с 1939 года, в мире относительной наземной гравиметрии преобладают относительные гравиметры LaCoste&Romberg (модели D и G). За последние годы наблюдается рост популярности Scintrex Autograv (CG-5, CG-6), Micro-g LaCoste (gPhone X), LG-1 GALILEO (GF Instruments) и Burris Gravity Meter (ZLC) (рис. 8).



Рис. 8. Современные актуальные гравиметры для измерения относительных значений силы тяжести: а) Burris Gravity Meter; б) гравиметр gPhone X; в) LG-1 GALILEO; г) CG-6 Autograv.

Сурет 8. Гравитацияның салыстырмалы мәндерін өлшеу үшін қолданылатын заманауи гравиметрлер: а) Burris Gravity Meter; б) gPhone X гравиметрі; в) LG-1 GALILEO; г) CG-6 Autograv.

Figure 8. Modern gravimeters for measuring relative gravity values: a) Burris Gravity Meter; b) gPhone X gravimeter; c) LG-1 GALILEO; d) CG-6 Autograv.

Гравиметр Burris Gravity Meter является разработкой американской компании ZLC Corporation (рис. 8а). Прин-

цип работы этой модели основан на концепции ЛаКоста и Ромберга – пружины нулевой длины. Исследование [7] показало, что гравиметр Burris Gravity Meter обладает высокой повторяемостью измерений и низким дрейфом при длительной регистрации. Результаты калибровки, проведенной в Ганновере, Германия, продемонстрировали точность измерений в пределах 10^{-4} . Среди преимуществ Burris Gravity Meter можно отметить: быстрая корректировка данных, высокая стабильность, точность и низкий дрейф – менее 1 мГал в месяц [8].

Гравиметр gPhone X (рис. 8б) является разработкой компании Micro-g LaCoste (США). В основе конструкции гравиметра лежит технология компании LaCoste and Romberg (система пружинных подвесов «нулевой длины»). Гравиметр характеризуется малым дрейфом в течение продолжительного времени. gPhone X подходит для мониторинга высокочастотных непериодических землетрясений. Обладает широким диапазоном измерений (7000 мГал), оснащен синхронизированной системой сбора данных и GPS. Обладает высокой чувствительностью, обеспечивающей стабильность измерений. Использует систему «двойная печь» для обеспечения температурной стабильности, нечувствителен к колебаниям барометрического давления. Имеет компактный вид, удобен при транспортировке. В исследовании [9] gPhone X доказал с контролем наклона – это точный инструмент для измерения изменений силы тяжести, сопоставимый по качеству с данными сверхпроводящих гравиметров (SG).

Гравиметр LG-1 GALILEO – относительный кварцевый гравиметр, разработанный компанией GF Instruments (Чехия), характеризуется максимальным рабочим диапазоном 10 000 мГал и повторяемостью ≥ 5 мкГал (рис. 8в) [10]. Рабочий диапазон позволяет производить измерения в любой точке мира. Качество измерений обеспечивается высокоточной термостабилизацией датчика и современной технологией обработки сигнала. В гравиметр встроена система, отвечающая за коррекцию приливов, дрейфа, наклона и температуры. Литий-ионные батареи обеспечивают до 30 часов бесперебойной работы. Компактный корпус и легкий вес позволяет легко транспортировать прибор и работать в труднодоступных местах.

В 2016 г. компания Scintrex (Канада) представила миру цифровой кварцевый гравиметр нового поколения CG-6 Autograv (рис. 8г) [11]. На сегодняшний день он является одним из востребованных устройств в геодезии, гравиметрии, геологии, геофизике и в других областях [12].

Прибор обеспечивает быстрое, надежное и точное измерение силы тяжести. Обладает интуитивно понятным пользовательским интерфейсом, прочным корпусом, встроенным GPS. Тип датчика – плавленый кварц с использованием электростатического обнуления, что позволяет фиксировать незначительные изменения силы тяжести. Диапазон измерений 8 000 мГал позволяет производить измерения в любой точке мира. CG-6 Autograv обладает исключительной точностью измерений. Рекомендован к использованию в масштабных геодезических, гравиметрических проектах. В ценовой категории является не самым бюджетным вариантом, но в геодезических и гравиметрических исследованиях национального

Таблица 1

Сравнительная таблица актуальных относительных гравиметров 2023-2024 гг.
2023-2024 жылдардағы өзекті салыстырмалы гравиметрлердің салыстырмалы кестесі

Кесте 1

Table 1

Comparative table of current relative gravimeters 2023-2024

Тип	Модель	Производитель (страна)	Разрешение	Повторяемость	Диапазон измерений	Цена	Портативность	Габариты (см), вес (кг)
Электронный	Burris Gravity Meter	ZLC (США)	1 мкГал	1-3 мкГал	7000 мГал	Средняя	Да	19.05x30.5x30.5, 5.18
Электронный	gPhoneX	Micro-g LaCoste (США)	0.1 мкГал	1 мкГал	7000 мГал	Средняя	Да	31x32.4x25.2, 13
Электронный	LG-1 GALILEO	GF Instruments (Чехия)	0.1 мкГал	≥ 5 мкГал	10000 мГал	Средняя	Да	23.5x21x35, 7.9
Электронный	CG-6 Autograv	Scientrix (Канада)	0.1 мкГал	> 5 мкГал	8000 мГал	Средняя	Да	21.5x21x24, 5.2

масштаба, где нужны высокоточные данные о силе тяжести, оперативность системы, высокоточные измерения при минимальном количестве времени, портативность, простота и эффективность использования, модель CG-6 Autograv является наилучшим решением.

При выборе гравиметра (таблица 1) рекомендуем исходить из цели использования, требуемой точности, диапазона измерений, портативности, производительности и цены.

Заключение

Для проведения масштабных гравиметрических измерений, реализации проекта по построению геоида Казахстана, а также гравиметрического эталонного полигона, важно найти эффективное решение – оборудование, позволяющее выполнить высокоточные измерения силы тяжести. При выборе гравиметра основными факторами выступают: точность измерений, диапазон, портативность, автоматизация процессов, эффективность проведения съемки, цена, производительность. Исходя из требуемых проектом критериев и задач, среди

небольшого количества относительных гравиметров, что на сегодня актуально на рынке, выбор относительного гравиметра был сделан в пользу канадской компании Scientrix модели CG-6 Autograv. Характеристики данной модели позволяют эффективно получить надежные, высокоточные измерения силы тяжести на всей территории Казахстана с минимальными погрешностями. Данная модель зарекомендовала себя как надежное решение в получении гравиметрических данных для нефтегазовой разведки, разведки полезных ископаемых, геологическом картировании, инженерного обеспечения строительства, гравиметрических исследований, построения и уточнения геоида. Спрос на гравиметр Scientrix CG-6 Autograv наблюдается во многих странах, что является лучшим показателем его популярности и признания среди специалистов.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR21882366).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмин В.И. Утверждено редакционно-издательским советом академии в качестве учебного пособия для студентов геодезических специальностей всех форм обучения: СГГА, Новосибирск, 2011, С. 193 (на русском языке)
2. Знаменский В.В. Общий курс полевой геофизики: М.: Недра, 1989, С. 520 (на русском языке)
3. Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999, С. 429 (на русском языке)
4. Marson I. Путь гравиметров: краткий обзор. // Международный журнал геофизики. 2012. Вып. 2012. С. 9 (на английском языке)
5. Timmen L. Абсолютная и относительная гравиметрия. // Науки о геодезии – I: достижения и будущие направления. 2010. С. 1-48 (на английском языке)
6. Гравиметрия. Учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-56 01 02 «Геодезия». / Составление и общая редакция Г.А. Шароглазовой. 2-е изд. – Новополюцк: ПГУ, 2010. – 196 с. (на русском языке)
7. Jentszsch G. Автоматизированный гравиметр Burriss – новый инструмент, использующий старый принцип. Наземная гравиметрия: статические и мобильные измерения. // Материалы Международного симпозиума. Санкт-Петербург: Электроприбор, 2008. – С. 21-28 (на английском языке)
8. Jentszsch G. и др. Автоматический гравиметр Burriss для однократного и непрерывного наблюдения. // Геодезия и геодинамика. 2018. Вып. 3. С. 204-209 (на английском языке)
9. Fores V. и др. Долгосрочная стабильность управляемых наклоном гравиметров gPhoneX. // Журнал геофизических исследований: Твердая Земля. 2019. Вып. 124. №11. С. 12264-12276 (на английском языке)
10. Брошюра. LG-1 Galileo наземный гравиметр. С. 2. (на английском языке)
11. Liu S. и др. Исследование динамических характеристик относительно гравиметра CG-6 для микрогравитационной сети. // Десятый Международный Симпозиум по точным инженерным измерениям и приборостроению, SPIE, 2019. Вып. 11053. – С. 482-488 (на английском языке)
12. Boddice D. и др. Съёмка в условиях микрогравитации до, во время и после отдаленных крупных землетрясений. // Журнал прикладной геофизики. 2022. Вып. 197. С. 104542 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Кузьмин В.И. Редакциялық-баспа кеңесі тарапынан геодезия мамандықтарының барлық бөлімдерінің студенттері үшін оқу құралы ретінде бекітілді: СГГА, Новосибирск, 2011, Б. 193 (орыс тілінде)
2. Знаменский В.В. Жалпы дала геофизикасының курсы: М.: Недра, 1989, Б. 520 (орыс тілінде)
3. Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999, Б. 429 (орыс тілінде)
4. Marson I. Гравиметрия сапарына шолу. // Халықаралық геофизика журналы. 2012. Шығ. 2012. Б. 9 (ағылшын тілінде)
5. Timmen L. Абсолюттік және салыстырмалы гравиметрия. // Геодезия ғылымдары – I: Алғашқы жетістіктер және болашақ бағыттар. 2010. Б. 1-48 (ағылшын тілінде)
6. Гравиметрия. Оқу-әдістемелік кешені мамандығы бойынша студенттерге арналған 1-56 01 02 «Геодезия». / Г.А. Шароглазованың құрастыруы және жалпы редакциясымен. 2-ші басылымы. – Новополюцк: ПГУ, 2010. – 196 б. (орыс тілінде)
7. Jentszsch G. Автоматты Burriss гравиметрі: ескі принципке негізделген жаңа құрал // Жер гравиметриясы: Статикалық және мобильді өлшеулер (TG-SMM2007). // Халықаралық симпозиумның материалдары. Санкт-Петербург: Электроприбор, 2008. – Б. 21-28 (ағылшын тілінде)
8. Jentszsch G. және басқалар. Автоматический гравиметр Burriss для однократного и непрерывного наблюдения. // Геодезия және геодинамика. 2018. Шығ. 3. Б. 204-209 (ағылшын тілінде)
9. Fores V. және басқалар. Тілт-басқарылатын gPhoneX гравиметрлерінің ұзақ мерзімді тұрақтылығы. // Жер туралы геофизикалық зерттеулер журналы: Қатты Жер. 2019. Шығ. 124. №11. Б. 12264-12276 (ағылшын тілінде)
10. Брошюра. LG-1 Galileo Жер үсті гравиметрі. Б. 2. (ағылшын тілінде)
11. Liu S. және басқалар. Микрогравитациялық желі үшін CG-6 салыстырмалы гравиметрдің динамикалық сипаттамаларын зерттеу. // Онлайн халықаралық симпозиум: Прецизионды инженерлік өлшеулер мен аспаптар, SPIE, 2019. Шығ. 11053. – Б. 482-488 (ағылшын тілінде)
12. Boddice D. және басқалар. Алыс ірі жер сілкіністеріне дейін, кезінде және одан кейін микрогравитация жағдайында түсіру. // Қолданбалы геофизика журналы. 2022. Шығ. 197. Б. 104542 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Kuzmin V.I. *Utverzhdeno redakcionno-izdatelskim sovetom akademii v kachestve uchebnogo posobiya dlya studentov geodezicheskikh specialnostej vseh form obucheniya: SSGA, Novosibirsk, 2011. P. 193* [Kuzmin V.I. Approved by the editorial and publishing council of the academy as a teaching aid for students of geodetic specialties of all forms of study: SSGA, Novosibirsk, 2011, P. 193] (in Russian)
2. Znamenskij V.V. *Obshij kurs polevoj geofiziki: M.: Nedra, 1989, P. 520* [Znamensky V.V. General course of field geophysics: M.: Nedra, 1989, P. 520] (in Russian)
3. Torge V. *Gravimetriya: M.: Mir, 1999, P. 429* [Torge V. Gravimetry: M.: Mir, 1999, P. 429] (in Russian)
4. Marson I. *A short Walk along the Gravimeters Path. // International Journal of Geophysics. 2012. V. 2012. P. 9* (in English)
5. Timmen L. *Absolute and Relative Gravimetry. // Sciences of Geodesy-I: Advances and Future Directions. 2010. P. 1-48* (in English)
6. *Gravimetriya. Uchebno-metodicheskij kompleks dlya studentov specialnosti 1-56 01 02 «Geodeziya». / Sostavlenie i obshaya redakciya G.A. Sharoglavovoj. 2-e izd. – Novopolock: PGU, 2010. – 196 p. [Gravimetry. Educational and methodological complex for students of specialty 1-56 01 02 «Geodesy». / Compilation and general editing by G.A. Sharoglavova. 2nd ed. – Novopolotsk: PSU, 2010. – 196 p.] (in Russian)*
7. Jentzsch G. *The automated Burris gravity meter—a new instrument using an old principle. Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2007). // Proceedings of the International Symposium. St. Petersburg: Elektropribor, 2008. – P. 21-28* (in English)
8. Jentzsch G. *et al. Automated Burris gravity meter for single and continuous observation. // Geodesy and Geodynamics. 2018. Vol. 3. P. 204-209* (in English)
9. Fores B. *et al. Long-Term Stability of Tilt-Controlled gPhoneX Gravimeters. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. Vol. 124. №11. P. 12264-12276* (in English)
10. *Brochure. LG-1 Galileo Land gravity meter. P. 2* (in English)
11. Liu S. *et al. Investigation on the dynamic characteristics of CG-6 relative gravimeter for the micro-gravity network. // Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, SPIE, 2019. Vol. 11053. – P. 482-488* (in English)
12. Boddice D. *et al. Microgravity surveying before, during and after distant large earthquakes. // Journal of Applied Geophysics. 2022. Vol. 197. P. 104542* (in English)

Сведения об авторах:

Касымканова Х.М., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), k.kassymkanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9590-2079>

Орынбасарова Э.О., PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), e.orynbassarova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6421-4698>

Жанакулова К.А., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), 920103402123-d@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0001-6920-5675>

Адебиет Б., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), astbaha6@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-0508-018X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Касымканова Х.М., техникалық ғылымдарының докторы, Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Орынбасарова Э.О., PhD, қауымдастырылған профессоры, Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының меңгерушісі (Алматы қ., Қазақстан)

Жанакулова К.А., Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Адебиет Б., Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Kassymkanova Kh.-K.M., Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Orynbassarova E.O., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Zhanakulova K.A., PhD student at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Adebiyet B., PhD student at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)