

Код МРНТИ 36.16.19

Х.М. Касымканова¹, Э.О. Орынбасарова¹, А.С. Уразалиев², *К.А. Жанакулова¹
¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),
²ТОО «Институт Ионосферы» (г. Алматы, Казахстан)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДРЕЙФА ГРАВИМЕТРА CG-6 AUTOGRAV ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Аннотация. Вопрос обеспечения высокоточными данными о силе тяжести Земли в рамках реализации проекта «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот» является первоочередной задачей для достижения поставленной цели. Построение модели геоида и гравиметрического полигона невозможно без применения современных технологий. Сегодня измерить силу тяжести с высокой точностью возможно лишь с применением гравиметров. Современные гравиметры просты в использовании, надежны и эффективны при проведении гравиметрических измерений. В статье проведены тестовые измерения относительных значений силы тяжести на территории кампуса Satbayev University цифровым гравиметром CG-6 Autograv. Определена скорость дрейфа гравиметра, дана оценка точности проводимых измерений.

Ключевые слова: сила тяжести, относительный гравиметр, ступенчатый метод, CG-6 Autograv, дрейф гравиметра, полином первой степени.

Ауырлық күшін жоғары дәлдікпен өлшеуді қамтамасыз ету үшін CG-6 Autograv гравиметрінің дрейфін анықтау әдісі

Аңдатпа. «Координаттар мен биіктіктердің біртұтас мемлекеттік жүйесінің негізі ретінде Қазақстан Республикасының геоидтық моделін жасау» жобасын іске асыру шеңберінде Жердің ауырлық күші туралы жоғары дәлдіктегі деректермен қамтамасыз ету мәселесі алға қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін бірінші кезектегі міндет болып табылады. Геоид пен гравиметриялық полигон моделін құру заманауи технологияларды қолданбай мүмкін емес. Бүгінгі таңда ауырлық күшін гравиметрлерді қолдану арқылы ғана жоғары дәлдікпен өлшеуге болады. Қазіргі гравиметрлерді пайдалану оңай, сенімді және гравиметриялық өлшеулер жүргіздеу тиімді. Мақалада CG-6 Autograv сандық гравиметрімен Satbayev University кампусындағы ауырлық күшінің салыстырмалы мәндерін сынақтан өткізді. Гравиметрдің дрейф жылдамдығы анықталды, өлшеулердің дәлдігі бағаланды.

Түйінді сөздер: ауырлық күші, салыстырмалы гравиметр, қадамдық әдіс, CG-6 Autograv, гравиметр дрейфі, бірінші дәрежелі көпмүшелік.

Method for determining the drift of the CG-6 Autograv gravimeter to provide high-precision gravity measurements

Abstract. The issue of providing high-precision data on the Earth's gravity within the framework of the project «Development of a geoid model of the Republic of Kazakhstan as the basis of a unified state coordinate system and heights» is a primary task to achieve this goal. Building a model of a geoid and a gravimetric polygon is impossible without the use of modern technologies. Today, it is possible to measure gravity with high accuracy only with the use of gravimeters. Modern gravimeters are easy to use, reliable and effective in carrying out gravimetric measurements. In the article, test measurements of relative gravity values on the campus of Satbayev University with a digital gravimeter CG-6 Autograv were carried out. The gravimeter drift velocity was determined, and the accuracy of the measurements was estimated.

Key words: gravity, relative gravimeter, stepwise method, CG-6 Autograv, gravimeter drift, polynomial of the first degree.

Введение

Многие страны в прикладных и научных исследованиях Земли применяют относительный гравиметр CG-6 Autograv, так как данная модель соответствует современным требованиям к гравиметрическим измерениям [1]. CG-6 Autograv – это гравиметр нового поколения, сочетающий в себе новейшие технологии и высокую точность измерений для высокоточных гравитационных исследований [2]. Принцип работы инструмента заключается в измерении разницы ускорения свободного падения, используя чувствительный элемент из плавленого кварца [3]. Положение массы изменяется под воздействием силы тяжести, а автоматическая цепь обратной связи создает электростатическую силу, возвращающую массу в нейтральное положение. Напряжение обратной связи преобразуется в цифровой сигнал и передается для обработки и отображения данных. Гравиметр устанавливается на объекте съемки с помощью специально разработанной треноги для данного инструмента, управление осуществляется через панель управления. В инструмент встроен приемник GPS для определения координат и настройки часов на UTC. Scintrex CG-6 оснащен функцией автоматической коррекции, которая значительно повышает точность измерений. Гравиметр автоматически учитывает дрейф, наклон, приливы и температуру, чтобы свести к минимуму влияние внешних и внутренних факторов на измерения силы тяжести. Данная автоматическая коррекция в Scintrex CG-6 основана на современных алгоритмах и передовых технологиях, что гарантирует высокую точность и надежность измерений.

Функциональные возможности гравиметра позволяют проводить высокоточные гравиметрические измерения в любой точке мира с разрешением 0.0001 мГал в диапазоне 8000 мГал. В гравиметрии за единицу ускорения силы тяжести принят 1 Гал [4]:

$$1 \text{ Гал} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2 - \text{гал};$$

$$1 \text{ мГал} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2 - \text{миллигал};$$

$$1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2 - \text{микрочал}.$$

CG-6 Autograv отличается высокоточными измерениями, портативностью, простотой и эффективностью использования [5]. Более детальные технические характеристики приведены в таблице 1.

Методы исследования

Перед началом проведения гравиметрических измерений, заблаговременно (минимально за два дня) выполнить горизонтирование прибора и провести калибровку наклона гравиметра, так как долгое пребывание прибора под наклоном дает неточные данные при измерениях. Также необходимо выполнить калибровку дрейфа инструмента, чтобы уменьшить значения дрейфа гравиметра на протяжении периода «ожидания» измерений. Данную калибровку рекомендовано делать в ночное время суток, продолжительностью не менее 4 часов [6] в выбранном заранее месте, наименее подверженному микросейсмическим колебаниям (рис. 1).

После калибровки прибора выполняют тестовые измерения на вычисление дрейфа и определения точности показаний гравиметра. Дрейф гравиметра определяется

Технические характеристики относительного гравиметра CG-6 Autograv

Таблица 1

CG-6 Autograv салыстырмалы гравиметрінің техникалық сипаттамалары

Кесте 1

Technical characteristics of the relative gravimeter CG-6 Autograv

Table 1

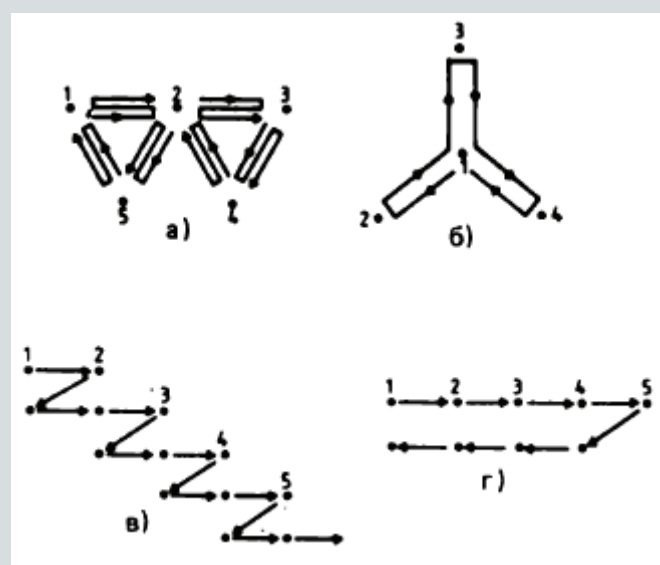
Тип датчика	Плавленый кварц с электростатическим обнулением
Точность показания	0,1 мкГал
Стандартное отклонение	<5 мкГал
Рабочий диапазон	В любой точке мира (8 000 мГал без переустановки)
Остаточный дрейф	<20 мкГал/день
Некомпенсированный дрейф	<200 мкГал/день
Диапазон автоматической компенсации наклона	+200 арксекунд
Автоматически вводимые поправки	На земные приливы, на наклон прибора, на температуру, на дрейф
Точность GPS	Стандартная точность 2,5 м
Емкость аккумуляторной батареи	Перезаряжаемые литиевые аккумуляторные батареи со встроенной логикой: 2 x 6,68 А·ч (10,8 В). Работа в течение суток при температуре 25 °С (77 °F)
Рабочая температура	От -40 °С до +45 °С (от -40 °F до 113 °С) Опциональная высокотемпературная версия с диапазоном до +55 °С (131 °F)
Размеры	21,5 см (В) x 21 см x 24 см (8,5 дюйма x 8,2 дюйма x 9 дюймов)
Вес	5,2 кг с аккумуляторными батареями



Рис. 1. Процесс калибровки дрейфа гравиметра.
Сурет 1. Гравиметр дрейфін калибрлеу процесі.
Figure 1. The gravimeter drift calibration process.

разностью двух отсчетов в одной и той же точке. Для расчета сдвижения нуля необходимо производить исходные и конечные наблюдения на одном и том же пункте или на пунктах с известными значениями силы тяжести. Как правило, для измерений, где необходима высокая точность, используется ступенчатый метод (метод повторных наблюдений) определения дрейфа [7]. Дрейф можно разделить на 2 составляющие: стационарный и дрейф при транспортировке [8]. К стационарному дрейфу относят старение пружины, долгосрочные вариации температуры и давления. К дрейфу при транспортировке относят сотрясения, короткопериодические флуктуации температуры.

Дрейф при транспортировке почти линеен на коротких интервалах времени, как правило, в течение нескольких часов, однако в течение дня часто появляются нелинейности. В зависимости от структуры сети, характеристик прибора и требуемой точности могут применяться различные методы измерения для контроля и определения смещения нуля-пункта прибора (рис. 2).



а) разностный метод; б) метод звезды;
в) ступенчатый метод; г) метод профиля

Рис. 2. Методы определения дрейфа гравиметров.
Сурет 2. Гравиметрлердің дрейфін анықтау әдістері.
Figure 2. Methods for determining the drift of gravimeters.

При выполнении исследований по определению дрейфа гравиметра CG-6 Autograv S/N 000000023 120528 полевые измерения проводились с применением ступенчатого метода. Это позволило выполнить контроль дрейфа прибора для повышения надежности и точности определения силы тяжести.

Наблюдаемые станции А, В и С (рис. 3), были выбраны с соблюдением условий минимального шума и вибраций (отсутствие близости автодорог и мест, создающих различные колебания).

Для измерений силы тяжести на станции гравиметр устанавливается на прочном основании: станция А – бетонированный пол в лаборатории, цокольный этаж здания, станция В – асфальтированный тротуар, станция С – тротуар из брусчатки. Работа была выполнена по следующей схеме: А – В – А – В – С – В – С – А – С – А по методике повторных наблюдений.

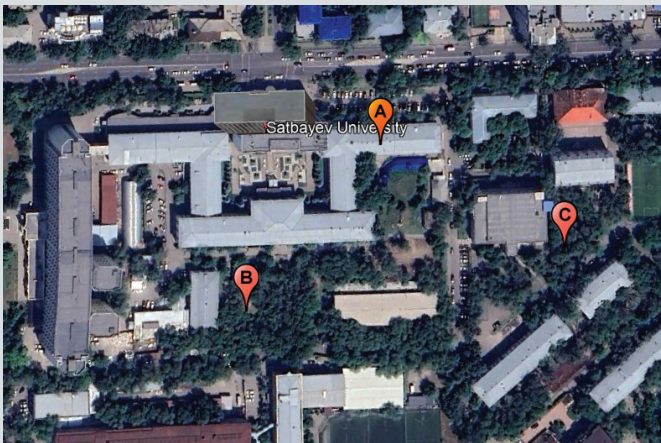


Рис. 3. Схема расположения станций.
Сурет 3. Станциялардың орналасу схемасы.
Figure 3. Station layout.

Перед началом измерений гравиметр необходимо ввести в рабочий режим, что подразумевает дать кварцевой системе время, чтобы «привыкнуть» к режиму съемки. После полного ввода параметров съемки (название проекта, название станций, количество циклов измерений, время измерения одного цикла и т.д.), инструмент нивелируется (приводится в горизонтальное положение). Чувствительная система гравиметра должна быть строго ориентирована относительно отвесной линии [9]. Таким образом, измерительная система находится в строго вертикальном положении, совпадающем с направлением силы тяжести. Невыполнение данного условия приводит к ошибке в измерениях из-за влияния наклона (рис. 4).

Наклон чувствительной системы относительно отвесной линии на угол ν приводит к фактическому измерению величины $g \cdot \cos \nu$. Таким образом, влияние наклона имеет следующий вид:

$$\sigma g_{\nu} = g(1 - \cos \nu) \approx \frac{g}{2} \nu^2, \quad (1)$$

где:

σg_{ν} – измеренная сила тяжести;
 g – фактическая сила тяжести;
 ν – величина наклона.



Рис. 4. Зависимость отсчета от наклона (продольный уровень не отъюстирован). 1 деление уровня соответствует 30".

Сурет 4. Санактың көлбеуге тәуелділігі (бойлық деңгей алынып тасталмаған). 1 деңгейдің бөлінуі 30-ға сәйкес келеді.

Figure 4. The dependence of the reference on the slope (the longitudinal level is not adjusted). 1 level division corresponds to 30".

В соответствии с формулой (1) при ошибке юстировки уровня на $\nu = 30''$, результат измерений будет преуменьшен на величину $0,1 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$.

Поэтому гравиметры снабжаются уровнями, оси которых взаимно перпендикулярны. С помощью электронных уровней с датчиками наклона, информация от которых выводится на экран, вращая одновременно два микрометрических винта на треноге, прибор горизонтируется [10]. При выставленном уровне стрелки датчика наклона загораются зеленым цветом, что означает наклон прибора не превышает $\pm 10 \text{ arcsec}$ (данный параметр оператором вводится в настройки прибора). При нивелировании прибора, высота инструмента меняется, а изменение высоты прибора влечет изменение силы тяжести на $0,01 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$ на каждые 3 мм высоты соответственно, поэтому также необходимо следить, чтобы изменение высоты не превышало 3 мм.



Рис. 5. Процесс установки инструмента.
Сурет 5. Құралды орнату процесі.
Figure 5. The installation process of the tool.

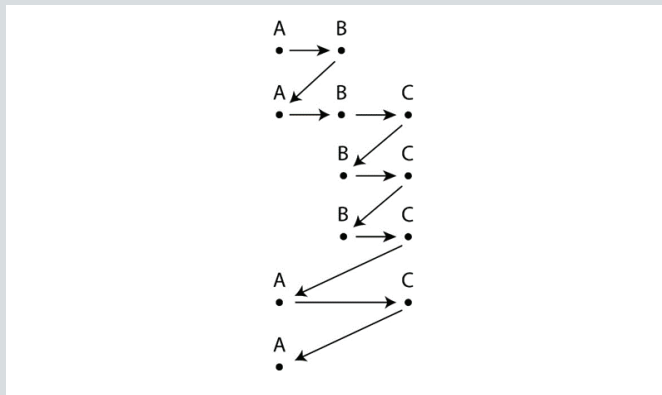


Рис. 6. Ступенчатый метод определения дрейфа гравиметра CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

Сурет 6. Гравиметр дрейфін анықтаудың қадамдық әдісі CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

Figure 6. Stepwise method for determining the drift of the CG-6 Autograv gravimeter S/N 000000023120528.

21 / Station	Date	Time	CorrGrav
22 A	14.02.2024	05:36:40 3949.7388	
23 A	14.02.2024	05:37:40 3949.7381	
24 A	14.02.2024	05:38:40 3949.7399	
25 A	14.02.2024	05:39:40 3949.7390	
26 A	14.02.2024	05:40:40 3949.7382	
27 B	14.02.2024	06:12:54 3948.6835	
28 B	14.02.2024	06:13:54 3948.6833	
29 B	14.02.2024	06:14:54 3948.6828	
30 B	14.02.2024	06:15:54 3948.6841	
31 B	14.02.2024	06:16:54 3948.6847	
32 A	14.02.2024	06:53:50 3949.7401	

Рис. 7. Результаты измерений относительным гравиметром CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

Сурет 7. Салыстырмалы гравиметрмен өлшеу нәтижелері CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

Figure 7. Measurement results with the relative gravimeter CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

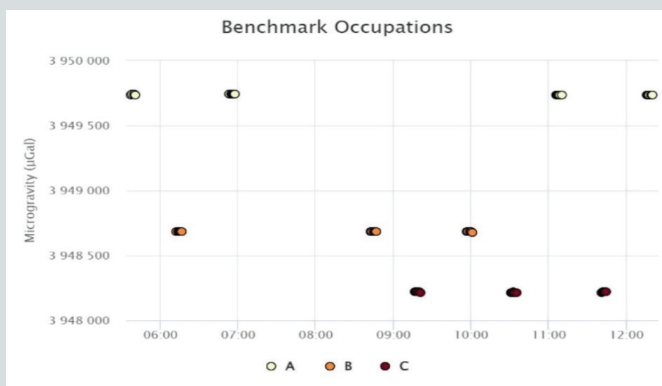


Рис. 8. Распределение относительных значений силы тяжести линейно во времени.

Сурет 8. Ауырлық күшінің салыстырмалы мәндерінің таралуы уақыт бойынша сызықты.

Figure 8. Distribution of relative gravity values linearly over time.

После приведения гравиметра в горизонтальное положение (рис. 5), инструмент готов к работе.

Для повышения надежности и точности измерений берется серия отсчетов на одной точке. В нашем исследовании сеанс на каждой станции состоял из 5 циклов по 60 секунд. Сходимость отсчетов измерения на станции является неочевидным контролем корректной работы гравиметра. Рекомендуется в серии отсчетов брать два последних измерения, так как после установки гравиметра прибор стабилизируется и последние измерения являются наиболее надежными.

Согласно схеме А – В – А – В – С – В – С – А – С – А были выполнены гравиметрические измерения на каждой станции. Последовательность измерений приведена на рис. 6.

Данная схема измерений позволяет получить как минимум 3 измерения на каждой станции, что дает полное представление о характере и скорости дрейфа инструмента. Таким образом, согласно полученным результатам можно оценить скорость смещения нуля-пункта со временем.

Результаты

Результатом съемки является dat-файл, содержащий информацию о значениях силы тяжести, полученных в ходе съемки (рис. 7), где показаны данные без корректировки (RAW-data), внесенные поправки, а также автоматически скорректированные данные (Correct Grav).

Для первоначального анализа была выполнена простая обработка без уравнивания значений в Web сервисе <https://jollyfant.github.io/g-campaign-solve-js/>. Значения силы тяжести станции А являлись контрольными, относительно значений которых были распределены изме-

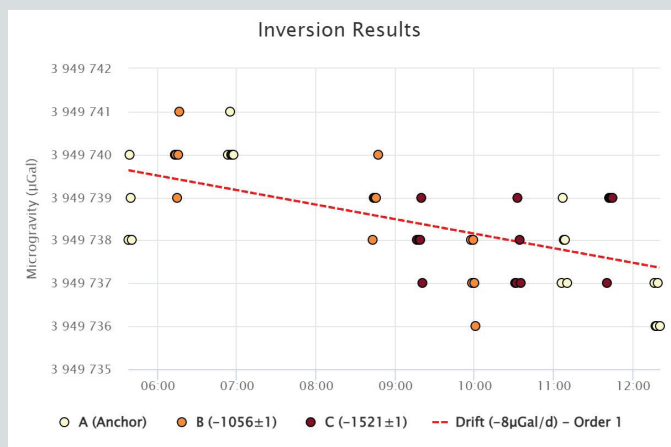


Рис. 9. Аппроксимация дрейфа полиномом 1-ой степени измерений относительного гравиметра CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

Сурет 9. Салыстырмалы гравиметр CG-6 autograv S/N 0000000023120528 өлшемдерінің 1-дәрежелі көпмүшесімен дрейфті жуықтау.

Figure 9. Approximation of drift by a polynomial of the 1st degree of measurements of the relative gravimeter CG-6 Autograv S/N 000000023120528.

ренные значения силы тяжести последующих станций линейно во времени. Результат данной обработки представлен на рис. 8. Также была проведена обработка измерений в виде аппроксимации дрейфа полиномом 1-ой степени (рис. 9).

По результатам измерений дрейф относительного гравиметра CG-6 Autograv S/N 000000023120528 составил -8 мкГал в день, что является допустимым и соответствует характеристикам, заявленным производителем. Стандартное отклонение (STD) повторяемости измерений составляет 1.4 мкГал, что также является отличным показателем точности измерений.

Заклучение

Тестовые измерения, проведенные на территории кампуса Satbayev University с помощью относительного гравиметра CG-6 Autograv, показали, что данный прибор соответствует современным требованиям к гравиметриче-

ским измерениям. Дрейф гравиметра определялся ступенчатым методом, который является надежным методом для оценки смещения нуля-пункта инструмента. В результате измерений дрейф гравиметра составил -8 мкГал в день, что является допустимым значением и соответствует характеристикам, заявленным производителем. Стандартное отклонение измерений составило 1.4 мкГал, что также не превышает заявленной в технической документации значения повторяемости измерений прибора.

Таким образом, относительный гравиметр CG-6 Autograv может быть рекомендован для проведения высокоточных гравиметрических измерений в различных научных и прикладных задачах.

Благодарность

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ossama S.A. и др. Практический опыт использования первого относительного гравиметра типа Scintrex CG-6 Autograv в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты. // Всемирный инженерный и технологический журнал. 2020. Т. 8. №2. С. 237-247 (на английском языке)*
2. *Ireshal M.P.G. Влияние дрейфа, наклона и чувствительности к наклону на гравитационные наблюдения CG-6. // Ireshal M.P.G., Prasanna H.M.I. / IRE Журналы. 2021. Т.5. №6. С. 2456-8880 (на английском языке)*
3. *Boddice D. и др. Съемка в условиях микрогравитации до, во время и после отдаленных крупных землетрясений. // Журнал прикладной геофизики. 2022. Т. 197. С. 104542 (на английском языке)*
4. *В.И. Кузьмин. Утверждено редакционно-издательским советом академии в качестве учебного пособия для студентов геодезических специальностей всех форм обучения: Новосибирск, СГГА, 2011, С. 163 (на русском языке)*
5. *Касымканова Х.М. Путь относительных гравиметрических измерений: от маятника к микрочипу. / Х.М. Касымканова, Э.О. Орынбасарова, К.А. Жанакулова, Б. Адебиет. // Горный журнал Казахстана. 2024. №4. С. 21-28 (на русском языке)*
6. *Гравиметр CG-6 Autograv™. Руководство по эксплуатации. – 94 с. (на русском языке)*
7. *Timmen L. Абсолютная и относительная гравиметрия. // Науки о геодезии – I: достижения и будущие направления. 2010. С. 1-48 (на английском языке)*
8. *Timmen L. Возможности гравиметра Scintrex Autograv CG-3M №4492 для исследований в «абсолютном масштабе». / Timmen L., Gitlein O. // Бразильский журнал картографии. 2004. Т. 56. №2. С. 89-95 (на английском языке)*
9. *Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999, С. 429 (на русском языке)*
10. *Пугин А.В. Гравиразведка. Часть II. Учебное пособие: Пермь, 2019, С. 94 (на русском языке)*

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Ossama S.A. және басқалар. Біріккен Араб Әмірліктері, Дубайдағы Scintrex CG-6 Autograv типті бірінші салыстырмалы гравиметрді қолданудың практикалық тәжірибесі. // Дүниежүзілік инженерлік және технологиялық журнал. 2020. Т. 8. №2. Б. 237-247 (ағылшын тілінде)*
2. *Ireshal M.P.G. Дрейфтің, көлбеудің және көлбеу сезімталдықтың CG6 гравитациялық бақылауларына әсері. // Ireshal M.P.G., Prasanna H.M.I. / IRE Журналдары. 2021. Т. 5. №6. Б. 2456-8880 (ағылшын тілінде)*
3. *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)*
4. *В.И. Кузьмин. Академияның редакциялық-баспа кеңесі оқытудың барлық нысандарындағы геодезиялық мамандықтар студенттеріне арналған оқу құралы ретінде бекіткен: Новосибирск, СГГА, 2011, Б. 163 (орыс тілінде)*
5. *Касымканова Х.М. Микрочиптен маятникке дейінгі салыстырмалы гравиметриялық өлшеулер. / Х.М. Касымканова, Э.О. Орынбасарова, К.А. Жанакулова, Б. Адебиет. // Қазақстанның тау-кен журналы. 2024. №4. Б. 21-28 (орыс тілінде)*
6. *Гравиметр CG-6 Autograv™. Пайдалану жөніндегі Нұсқаулық. – 94 б. (орыс тілінде)*
7. *Timmen L. Абсолюттік және салыстырмалы гравиметрия. // Геодезия ғылымдары – I: Алғашқы жетістіктер және болашақ бағыттар. 2010. Б. 1-48 (ағылшын тілінде)*

8. Timmen L. «Абсолютті масштабтағы» зерттеулерге Арналған Scintrex Autograv CG-3M №4492 гравиметрінің сыйымдылығы. / Timmen L., Gitlein O. // Бразилия Картографиясына шолу. 2004. Т. 56. №2. Б. 89-95 (ағылшын тілінде)
9. Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999, Б. 429 (орыс тілінде)
10. А.В. Пугин. Гравиразведка. II бөлім. Оқу құралы: Пермь: 2019, Б. 94 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Ossama S.A. Practical Experiences with the First Relative Gravimeter of Type Scintrex CG-6 Autograv in Dubai, The United Arab of Emirates. // World Journal of Engineering and Technology. 2020. Vol. 8. №2. P. 237-247 (in English)
2. Ireshal M.P.G. Impact Of Drift, Tilt and Tilt Susceptibility On CG-6 Gravity Observations. // Ireshal M.P.G., Prasanna H.M.I. / IRE Journals. 2021. Vol. 5. №6. P. 2456-8880 (in English)
3. Boddice D. et al. Microgravity surveying before, during and after distant large earthquakes. // Journal of Applied Geophysics. 2022. Vol. 197. P. 104542 (in English)
4. Kuz'min V.I. Uтверzhdeno redaktsionno-izdatel'skim sovetom akademii v kachestve uchebnogo posobiya dlya studentov geodezicheskikh spetsial'nostei vsekh form obucheniya: Novosibirsk, SGGA, 2011, S.163 [V.I. Kuzmin. Approved by the Editorial and publishing Council of the Academy as a textbook for students of geodetic specialties of all forms of education: Novosibirsk, SGGA, 2011, P. 163] (in Russian)
5. Kassymkanova Kh.-K.M. Put' otноситel'nykh gravimetricheskikh izmerenii: ot mayatnika k mikrochipu. / Kh.M. Kasymkanova, E.O. Orynbasarova, K.A. Zhanakulova, B. Adebiet. // Gornyi zhurnal Kazakhstana. 2024. №4. S. 21-28 [Kassymkanova Kh.-K.M. The path of relative gravimetric measurements: from pendulum to microchip. / Kh.M. Kasymkanova, E.O. Orynbasarova, K.A. Zhanakulova, B. Adebiet. // Mining Magazine of Kazakhstan. 2024. №4. P. 21-28] (in Russian)
6. Gravimetr CG-6 Autograv™. Rukovodstvo po ekspluatatsii. – 94 s. [Gravimeter CG-6 Autograv™. User manual. – 94 p.] (in Russian)
7. Timmen L. Absolute and Relative Gravimetry. // Sciences of Geodesy – I: Advances and Future Directions. 2010. P. 1-48 (in English)
8. Timmen L. The capacity of the Scintrex Autograv CG-3M №4492 gravimeter for «absolute-scale» surveys. / Timmen L., Gitlein O. // Revista Brasileira de Cartografia. 2004. Vol. 56. №2. P. 89-95 (in English)
9. Torge V. Gravimetriya: M.: Mir, 1999, S. 429. [Torge V. Gravimetriya: M.: Mir, 1999, P. 429] (in Russian)
10. A.V. Pugin. Gravitrazvedka. Chast' II. Uchebnoe posobie: Perm': 2019, S. 94 [A.V. Pugin. Gravity exploration. Part II. A study guide: Perm: 2019. P. 94] (in Russian)

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 кафедры «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>

Уразалиев А.С., старший научный сотрудник ТОО «Институт Ионосферы», заведующий сектором моделирования урбанизированных территорий (г. Алматы, Казахстан), aset_urazaliev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7444-2897>

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>

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)

Уразалиев А.С., «Ионосфера институты» ЖШС аға ғылыми қызметкері, урбандалған аумақтарды модельдеу секторының 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)

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)

Orynbasarova 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)

Urazaliev A.S., Senior Researcher at Institute of Ionosphere LLP, Head of the Urbanized Territories Modeling Sector (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)