

ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ СИСТЕМ И ИХ РОЛЬ В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Н.Т. Кемербаев¹ *к.т.н.*, Г.А. Мусина^{1*}, М.Х. Шкиева¹, К.Б. Самарханов^{1,2} *к.г.н.*, А.Т. Баталова¹,
А.Н. Рахимжанов¹

¹ТОО "GEOID", Республика Казахстан, Астана, Казахстан

²Международный научный комплекс "Астана", Астана, Казахстан

E-mail: snezhinka200184@gmail.com

В статье приводятся примеры использования гравиметрических наблюдений для мониторинга экологической обстановки месторождений полезных ископаемых. Такие измерения как правило производятся группой приборов. Высокий уровень точности требует согласованности всех применяемых приборов, что достигается калибровкой. Дан обзор гравиметрических калибровочных систем, играющих ключевую роль в точном и надежном измерении ускорения силы тяжести на поверхности Земли. Калибровочные базисы необходимы для обеспечения метрологического контроля и повышения точности измерений в таких областях наук о Земле, как геодезия, геофизика, геология и других связанных дисциплинах. В статье подробно рассмотрены различные калибровочные системы, которые используются в разных странах, включая Россию, Польшу, Хорватию, Швейцарию, Канаду, Австрию, Германию, Китай, Эстонию, Финляндию, Иран, Бразилию, а также в Республике Казахстан.

Ключевые слова: гравиметрия, калибровочный базис, гравиметр Scintrex, окружающая среда.

Поступила: 01.05.2024 г.

DOI: 10.54668/2789-6323-2024-115-4-152-166

ВВЕДЕНИЕ

В геофизических исследованиях гравиметрические методы начали активно применяться более столетия назад. Основным гравиметрическим методом, применяемым в геофизических исследованиях, является площадная съемка. По распределению ускорения силы тяжести на земной поверхности исследователи могут моделировать внутреннее строение Земли, что в первую очередь необходимо для поиска полезных ископаемых и сопровождения их добычи.

Гравиметрия также может применяться и в целях исследования экологии. Разработка месторождений углеводородов (нефти и газа) существенно влияет на состояние окружающей среды и может вызывать геодинамические процессы, особенно в зонах активных разломов. Они могут быть вызваны как естественными тектоническими изменениями и геомеханическими эффектами, так и техногенными воздействиями, связанными с добычей (Трофимов, 2022). Мониторинг и оперативное получение точной информации о геодинамическом состоянии месторождений

являются важными для обеспечения безопасности разработки и минимизации рисков для окружающей среды и общества (Варганян, 2010). Для мониторинга геодинамических процессов выполняют комплекс повторных геодезических измерений координат и высот, а также определений ускорения силы тяжести на пунктах геодинамического полигона.

Другой пример использования измерений ускорения силы тяжести приведен в работе (Arrgiou и др., 2020), где оценивается эффективность гравиметрического мониторинга для обнаружения утечки углекислого газа из углеродного хранилища. В исследованиях используются скважинные измерения вертикальной составляющей силы тяжести. Совместная инверсия наземных и скважинных данных дают ценную информацию о возникновении утечек CO₂. Другой пример использования гравиметрических наблюдений в экологических исследованиях связан с изучением гидродинамических процессов подземных вод. Такие исследования проводятся на четырех водяных скважинах в городе Аль-Айн (эмират Абу-Даби, ОАЭ)

(Darwish и др., 2021). Это позволяет изучать характеристики неглубокого водоносного горизонта подземных вод. Совместные измерения ускорения силы тяжести с точностью микрогал и уровня воды в скважинах производились более года. Это позволило сделать оценку пространственно-временного изменения запасов подземных вод. Метод микрогравиметрии рекомендуется использовать для мониторинга неглубоких водоносных горизонтов подземных вод при малом количестве скважин.

Гравиметрические калибровочные системы применяются для исследования высокоточных относительных гравиметров и играют ключевую роль в измерении ускорения силы тяжести и современных исследованиях гравитационного поля Земли. Они необходимы для обеспечения точности, надежности и единства измерений ускорения силы тяжести в различных областях применения, включая геодезию, геофизику, поиска полезных ископаемых и изучения вулканической активности (Buchkov et al., 2021; Greco & Krasnyu, 2021; Mulugeta et al., 2021). В этом контексте калибровочные базисы обеспечивают стандартизированный и точный метод калибровки гравиметров, что является основой для получения надежных данных.

Одним из важных аспектов гравиметрических исследований является выбор метода калибровки гравиметров. Этот процесс обеспечивает точность и согласованность измерений в рамках единой системы единиц, учитывая разнообразные погрешности и систематические отклонения, особенно в контексте абсолютных и относительных гравиметров (Urs et al., 2014). Эффективное использование калибровочных базисов способствует улучшению точности измерений, что особенно важно в условиях активного развития гравиметрической отрасли, например, в Республике Казахстан (MDDIAI, 2023; Wziontek et al., 2021).

В данной статье выполнен обзор существующих гравиметрических калибровочных базисов в разных странах, их характеристик и методов реализации. Подробный анализ различных калибровочных систем позволит читателю глубже понять важность этих систем в контексте точности и достоверности гравиметрических измерений, а также акцентирует внимание на значении стандартизированных

процедур калибровки в гравиметрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экологические аспекты применения гравиметрических исследований. Гравиметрия является одним из эффективных методов геофизических исследований, широко применяемым в том числе и для мониторинга экологии месторождений полезных ископаемых. Этот метод основан на измерении силы тяжести Земли, которая изменяется в зависимости от плотности пород под земной поверхностью. Изменения в плотности пород в местах разработки месторождений приводят к изменению гравитационного поля, что позволяет проводить анализ этих изменений для решения различных задач.

Гравиметрические исследования позволяют оценить влияние горных работ на окружающую среду, выявляя зоны проседания земной поверхности, образование подземных пустот и деформации земной коры (1), что важно для предотвращения экологических и инфраструктурных проблем, а также аварий.

$$\Delta g = 2\pi G \Delta \rho h \quad (1)$$

где, Δg – изменение ускорения силы тяжести, G – гравитационная постоянная ($6.67430 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$), $\Delta \rho$ – изменение плотности пород, h – высота (толщина) слоя, в котором произошло изменение плотности.

Эти исследования также помогают контролировать процессы подземной фильтрации, выявляя места утечек загрязняющих веществ и определяя направление движения подземных вод (2), что способствует улучшению экологического мониторинга и предотвращению загрязнения окружающей среды.

$$\Delta g = \frac{2\pi G \Delta \rho V}{A} \quad (2)$$

где, Δg – изменение ускорения силы тяжести, G – гравитационная постоянная ($6,67430 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$), $\Delta \rho$ – изменение плотности пород, V – объем загрязненной области, A – площадь, над которой проводится измерение.

Кроме того, гравиметрия используется для оценки состояния хвостохранилищ, выявляя зоны разжижения отходов и определяя

места возможных прорывов, что позволяет своевременно принимать меры по укреплению конструкций и предотвращению аварий.

Использование гравиметрии также оптимизирует разработку месторождений, более точно планируя вскрытие новых залежей полезных ископаемых и оценивая эффективность отработки, что позволяет принимать обоснованные решения по дальнейшему развитию горных работ.

Следовательно, для обеспечения эффективности применения гравиметрических приборов необходимо проведение их калибровки. Для этого необходимо создание калибровочных полигонов, которые позволят достичь высокий уровень точности и достоверность измерений.

Далее приведем примеры калибровочных базисов, существующих в мире на данный момент, а также значения ускорения силы тяжести (g) на пунктах калибровочных базисов.

Есть две разновидности калибровочных базисов – это горизонтальные и вертикальные базисы.

Горизонтальные базисы используют изменение силы тяжести с широтой. При изменении широты на 10° сила тяжести меняется на $9 \times 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. К недостаткам горизонтальных базисов относятся необходимость транспортировки гравиметров на большие расстояния и возможные вибрации приборов, которые могут снизить точность измерений. Вертикальные базисы используют изменение силы тяжести с высотой. В горах превышение в 1000 м приводит к изменению силы тяжести на $2 \times 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$ (с учетом притяжения топографических масс). В высотном здании превышение в 100 м соответствует изменению силы тяжести на $300 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-2}$. К недостаткам калибровки в горной местности относятся резкие изменения температуры и давления воздуха, а измерения в высотных зданиях могут быть нарушены ветровыми нагрузками (Торге В., 1999).

Калибровочный базис Оранжвилл в Канаде. Калибровочный (горизонтальный) базис Оранжвилл (Scintrex Limited, 2012) расположен в 70 км к северу от Торонто. Относится к типу горизонтальных базисов. Был создан и поддерживается Геологическим управлением Канады. Этот базис используется для определения основного калибровочного коэффициента GCAL1 гравиметров компании Scintrex Ltd.

Секция, используемая для калибровки и тестирования CG-5, состоит из 5 станций, расположенных на расстоянии 70 км друг от друга при силе тяжести 119 мГ/с. Приборы перевозятся на автомобиле. Показания снимаются на каждой станции по пути следования вверх по линии и повторяются в дальнейшем.

Гравиметрический базис в Бразилии. Калибровочный гравиметрический базис Agulhas Negras был создан в середине 1980-х как инструмент для оценки эксплуатационных возможностей относительных гравиметров, используемых бразильскими академическими учреждениями или частным сектором. LCR G (Sousa and Santos, 2010). Базис, протяженностью 200 км состоит из 5-и гравиметрических пунктов с диапазоном 627 мГал. В 2007 году на них были выполнены наблюдения с абсолютным гравиметром А-10 #011. Также на каждом пункте был измерен местный вертикальный градиент силы тяжести.

Калибровочный базис Финляндии.

Калибровочный базис Масала-Вихти берет начало на территории финского геодезического института в Масале и охватывает 53 мГал при расстоянии 40 км (Finnish Geodetic Institute, 2011). Чаще всего используется для калибровки относительных гравиметров, используемых в геофизической разведке и в региональных гравиметрических исследованиях. Доступ к пунктам открыт для всех желающих. Пользователи могут выполнять измерения самостоятельно и применять опубликованные значения силы тяжести. На пунктах были определены модели вертикального градиента на многих уровнях. Это связано с тем, что на многих пунктах вертикальный градиент изменчив, а пользователи используют приборы с разной высотой относимости. Измерения абсолютных значений на конечных пункта периодически повторяются.

Калибровочная система Ганновера в Германии. В 1980-х годах Институт геодезии в сотрудничестве с геодезическим агентством Нижней Саксонии создал систему калибровки относительных гравиметров в Ганновере, состоящая из вертикального калибровочного базиса в Лейбницевском университете и калибровочного базиса Гарца между Нижним и Верхним Гарцем (Timmen et al., 2018).

Первый проходит с первого по 19-й этаж высотного здания университета с максимальной

разницей в силе тяжести 19,2 мГал на протяжении 64 м. Калибровочный базис Гарц состоит из трех абсолютных точек, которые были сначала определены с помощью JLAG-3 и окончательно определены в 2013 году Федеральным агентством картографии и геодезии Германии (BKG) с помощью A10-033. Эти три точки охватывают диапазон силы тяжести 93 мГал. Поскольку абсолютные измерения силы тяжести на вертикальном калибровочном базисе пока невозможны, калибровочный коэффициент передается с калибровочной линии Гарц путем измерения в режиме реального времени с помощью относительных гравиметров.

Гравиметрический базис в Германии Цугшпитце. Калибровочная система Цугшпитце в Германии созданная в 2004...2005 годах хорошо подходит для линейной калибровки кварцевых гравиметров семейства Scintrex (Flury et al., 2007). Основными преимуществами системы являются большое приращение силы тяжести 528 мГал и удобная транспортировка приборов между опорными пунктами с помощью канатной дороги.

Данная система позволяет выполнять большое количество широкодиапазонных связей за 1 день или меньше с соответствующим повышением точности. Согласно результатам экспериментальных исследований, переменное притяжение снега может вызывать эффекты до 40 мГал, поэтому рекомендуют выполнять калибровку гравиметров в период с июля по декабрь, когда влияние снежных масс минимально, а повторяемость калибровочных коэффициентов находится в пределах ± 10 мкГал.

Калибровочный базис в Швейцарии. Калибровочный базис в Швейцарских Альпах был создан в 2013 году (Marti et al., 2015). Он состоит из 7-ми абсолютных гравиметрических пунктов и нескольких эксцентрических точек, относится к типу вертикальных базисов. Суммарный диапазон базиса составляет более 600 мГал

Всю линию относительными приборами в замкнутом цикле можно измерить за 1 день, поскольку все абсолютные пункты легко доступны для автомобильного транспорта или расположены в непосредственной близости от железнодорожной станции Юнгфрау Абсолютные пункты выбраны таким образом, чтобы они были доступны в любой день в течение года, а также чтобы разница ускорения силы тяжести между смежными пункта-ми не превыша-

ла 150 мГал. Тем самым, можно калибровать гравиметры с ограниченным диапазоном или с нелинейным масштабным коэффициентом.

Расширенные неопределенности для абсолютных пунктов составляют 5...6 мкГал. На всех пунктах были определены модели вертикальных градиентов над марками с помощью относительных измерений на трех уровнях. Данный гравиметрический базис может использоваться бесплатно всем гравиметрическим сообществом. Это первый в мире калибровочный базис, соответствующий Соглашению о взаимном признании CIPM MRA (Werhahn et al., 2023).

Калибровочный базис Хочкар в Австрии. Австрийский калибровочный базис Хочкар для калибровки относительных гравиметров был создан в 1982 году (Ruess and Meurers, 2000) и расположен между Гёстлингем и Хочкаром в Нижней Австрии. С этого времени этот базис регулярно контролировался несколькими гравиметрами LCR. Он относится к типу вертикальных базисов.

Суммарная разность силы тяжести составляет ~200 мГал, и практически полностью перекрывает диапазон измерений LCR D. Базис состоит из 4-х пунктов, для проезда на автомобиле между смежными пунктами составляет менее 15 минут.

В 1988 и 1995 годах на пунктах базиса были выполнены измерения абсолютной силы тяжести с помощью гравиметра JLAG6. В 2014 году на пунктах Гестлинге и Хочкарес помощью абсолютного гравиметра FG5 были повторены абсолютные наблюдения (Ruess and Ullrich, 2015). Новые результаты показали небольшое изменение силы тяжести на верхнем пункте примерно на -20 мкГал по сравнению с 1995 годом.

Калибровочный базис в Польше. В статье (Sas et al., 2009) описывается создание альпийского гравиметрического калибровочного базиса в польских Татрах, и методика выполнения статической калибровки гравиметра.

В качестве пунктов базиса по возможности выбирались места, в которых проводились маятниковые наблюдения много лет назад. Для одного из таких пунктов была выбрана обсерватория Института метеорологии и водного хозяйства, расположенная в Каспровы Верхе. Новый пункт в Закопане был расположен на Гидрометеорологической станции в ядерном убежище, оставшемся со времён холодной войны. Для

абсолютных пунктов базиса было создано по два дополнительных постаментов. На всех центрах также были выполнены определения вертикального градиента.

В Закопане такими постаментами стали некоторые пункты бывшего калибровочного базиса 1968 года. Они закреплены бетонными постаментами 75×75×100 см, также входящими в польскую национальную гравиметрическую сеть. На Каспровы Верх один из дополнительных центров расположен в зале Высотной метеорологической станции, а другой на лестничной площадке главного входа в обсерваторию. В базис также были включены промежуточные пункты в точках нижней, средней и верхней станциях канатной дороги. Время движения на первом участке базиса по канатной дороге составляет около 7 минут, второго – 8 минут.

Первые абсолютные наблюдения на пунктах Закопане и Каспровы Верх были выполнены гравиметром FG5–221 Финского геодезического института. Повторные определения проводились Институтом геодезии и картографии в Варшаве.

Гравиметрический базис в Хорватии. В статье (Repačić, Grgić and Vašić-Zagreb, 2013) описывается предложение по модернизации основного и вспомогательного калибровочных гравиметрических базисов Республики Хорватия, описаны процедуры калибровки и представлена математическая основа для вычислений, а также проанализирована точность калибровки. В работе дана оценка текущего состояния калибровочного базиса и сделано предложение на создание нового официального базиса, который будет горизонтальным и частично вертикальным, а также вспомогательным вертикальным.

Официальный калибровочный базис состоит из двух абсолютных и одного относительного пункта. Расчётный диапазон ускорения силы тяжести составляет 299 мГал (или альтернативно 275 мГал) при времени транспортировки по шоссе 3 часа. Вспомогательный базис состоит из двух абсолютных пунктов с диапазоном 172 мГал и временем переезда по окружной дороге 45 минут. Данная модернизация должна была обеспечить повышение точности калибровки относительных гравиметров.

Калибровочный базис Эстонии. Пер-

вый калибровочный базис в Эстонии (Oja, Turk and Jurgenson, 2014) был установлен недалеко от города Пярну в 1982 году. Для определения приращений силы тяжести использовалось несколько гравиметров ГАГ-2 производства СССР. В дальнейшем на базисе были опробованы ГАГ-2, LCR G, CG–5, ZLS Burris. На сегодняшний день основная базовая калибровочная линия состоит из тех абсолютных пунктов Хаанья–Тыравере–Тойла. Используемые для создания полигона приборы неоднократно проходили испытания на калибровочном базисе (Finnish Geodetic Institute, 2011) Масала-Вихти Финского геодезического института в 2002...2008 гг.

Гравиметрические базисы в России. *Московский гравиметрический базис* является локальной гравиметрической сетью, состоит из 6 пунктов и относится к горизонтальным базисам. Пункты базиса расположены в прилегающей к городу местности (Oshchepkov et al., 2016), наибольшее приращение силы тяжести составляет 52 мГал. На всех пунктах определены параметры вертикального градиента с аппроксимацией полиномом второй степени. На пунктах TsNIIGAiK и Zvenigorod выполнялись наблюдения с абсолютным гравиметром Финского геодезического института FG5-X221 во время российско-финских сравнений абсолютных гравиметров в 2013 году RACAG2013 (Mäkinen et al., 2016; Geophysical Center RAS, 2019). Измерения в локальной сети базиса уравниваются по методу наименьших квадратов.

Казанский гравиметрический базис состоит из 4-х пунктов, является горизонтальным базисом с максимальной разницей силы тяжести 93 мГал. Расстояние между начальным № 1 и конечным № 6 пунктами по дорогам составляет 108 км. Все пункты представляют собой железобетонные монолиты, установленные на глубину не менее 2-х метров. Верхняя часть каждого пункта имеет размеры в поперечном сечении не менее 1×1 м и оснащена металлической центральной маркой, и местами для установки четырех гравиметров CG–5. Места установки гравиметров представляют собой вклеенные эпоксидной смолой стальные стержни с пластиковыми втулками, которые предотвращают боковое смещение ножек гравиметра (ФГУП «ВНИИМ», 2016).

Иркутский гравиметрический базис состоит из 6-и гравиметрических пунктов. Он является горизонтальным базисом с диапазоном 93 мГал. Расстояние от пункта № 1 до пункта № 6 по дорогам составляет не менее 22 км. Каждый пункт базиса выполнен в виде железобетонного монолита, установленного на грунт на глубину не менее 2-х метров. Верхняя часть каждого пункта имеет размеры в поперечном сечении не менее 2×2 м, и оборудована установочными местами для двух гравиметров CG–5. Места установки – это стальные стержни, вклеенные эпоксидной смолой в монолит, с пластиковыми втулками, которые не допускают смещения ножек гравиметра. На каждом пункте базиса установлена информационная табличка (ФГУП «ВНИИМ», 2018).

Калибровочный базис Ирана. В 2004 году в Иране был создан новый национальный калибровочный базис, необходимый для определения калибровочных коэффициентов пружинных гравиметров, что позволило снизить стоимость калибровки при выполнении гравиметрических работ (Cheraghi et al., 2020).

Все пункты были построены на скальных породах, что обеспечило хорошую стабильность измерений при наблюдениях с абсолютными гравиметрами. Большинство из них были созданы в период с 2004 по 2005 годы. Места расположения пунктов выбирались под условием получения разности силы тяжести, перекрывающей диапазон её распределения в Иране. Максимальное приращение составило 1154 мГал. Для удобной транспортировки оборудования используется также канатная дорога от подножья до вершины.

Базис состоит из двух частей: одна находится в северной части Тегерана и соединяет Тегеран с вершиной г. Точал, а вторая — на северных склонах г. Альбурз, от Тегерана до Астары.

Первая часть базиса имеет разность высот между крайними её пунктами 2600 м и приращение силы тяжести 537 мГал. Вторая часть с перепадом высот 1150 м и приращением ~617 мГал. Диапазон широт между всеми пунктами базиса составляет порядка 2,5°.

В период с 2009 по 2018 года часть пунктов базиса были заменены по тем или иным причинам.

Пункты базиса измерялись с использо-

ванием двух абсолютных гравиметров FG5–206 и FG5–228. На базисе были откалиброваны шесть относительных гравиметров компании Scintrex Ltd. В 2017 и 2018 годах измерения на пунктах также проводились в сотрудничестве с французской командой из Страсбургского университета.

Калибровочный базис в Китае.

В Китае расположены шесть калибровочных базисов: в провинции Цзянси (LS), в Дациншане (DQS) в автономном районе Внутренняя Монголия, Хэншане (HS) в провинции Хунань, Нанькуньшане (NKS) в провинции Гуандун, Тяньжюшане (TZS) в провинции Аньхой и Лунцюаньши (LQY) в Сычуани и все они находятся на открытом воздухе (Wang et al., 2014a). Калибровочный базис в провинции Цзянси (LS) состоит из 24 участков вдоль северного горного шоссе. Этот базис выделяется значительной разностью силы тяжести 230 мГал и временем переезда между крайними пунктами, который составляет 30..40 мин. Наблюдения с абсолютным гравиметром A10–022 и определения вертикального градиента с использованием CG–5 Autograv на 7 пунктах базиса были проведены в 2011 году. Используемый A10 имел непосредственное сличение с FG5, который в свою очередь участвовал в ключевых сличениях абсолютных гравиметров ((Wang et al., 2014b).

Результаты измерений с абсолютным гравиметром A10–022 условно можно разделить на две части. Первая часть относится к пунктам G3, G8, G11, G12, G17, G18 и G22 базиса LS. Стандартное отклонение для них составляет менее 4,0 мкГал, а разность между двумя независимыми наблюдениями находится в пределах 6 мкГал. Вторая часть измерений относится к другим пяти базисам в период с августа по ноябрь 2012 года. Эти данные характеризуются величиной стандартного отклонения менее 3 мкГал на основе измерений в течение 2 часов.

Стандартное отклонение, характеризующее разброс, вызвано главным образом микросейсмическим шумом земной поверхности, вызванным, например, транспортом или ветром. Наибольший разброс наблюдался на базисах HS и TZS. Для оценки сходимости измерения выполнялись в разные дни.

Результаты абсолютных измерений были редуцированы на высоту чувствительной

системы гравиметров CG-5 ~25 см. Средние отклонения A10-022 и CG-5 находятся в пределах 10 мГал для каждого базиса.

Гравиметрические базисы Республики Казахстан. В Казахстане в период с 1976 по 1982 года было создано 5 гравиметрических базисов: Эмбенский, Усть-Каменогорский, Кустанайский, Карагандинский и Алма-Атинский (Азаркина, 1976). В дальнейшем в связи с сокращением объемов гравиметрических работ перестали действовать Кустанайский, Усть-Каменогорский и Карагандинский базисы.

Эмбинский гравиметрический базис был восстановлен и аттестован в 2017 году. Он состоит из 6 пунктов, максимальное приращение силы тяжести между крайними пунктами составляет 82,6 мГал.

Алма-Атинский гравиметрический базис продолжал свою деятельность с момента его первичного определения в 1979 году. Изначально эталонное приращений силы тяжести между пунктами было выполнено советскими гравиметрами ГАГ-2 со стандартным отклонением $\pm 0,01-0,02$ мГал, высоты определены техническим нивелированием с погрешностью $\pm 0,1$ м, а плановое положение с погрешностью ± 5 м.

Начиная с 1979 года, повторные определение приращений силы тяжести между пунктами базиса проводились с периодичностью 3...5 лет. С появлением на территории Казахстана высокоточных гравиметров в 2001 году была проведена новая аттестация Алма-Атинского базиса, он получил название «Дмитриевка-Карьер» (Лапин и др., 2001). В этот же период был добавлен ещё один, 7-й пункт № 2А-Николаевка. Были выполнены измерения с гравиметрами CG-3, CG-3М, уточнены координаты с использованием ГНСС-систем Trimble GPS 4700 TS и электронного тахеометра Leica TCR 1105. Точность определения приращений силы тяжести между пунктами составила $\pm 0,001-0,005$ мГал, высот $\pm 0,04$ м, координат $\pm 0,076$ м.

В результате последующей аттестации в 2007 году были уточнены значения приращений между пунктами со стандартным отклонением $\pm 0,002$ мГал. Базис снова был переименован и стал называться «Капчагай- Алматы». Последняя аттестация базиса была в 2015 году, после чего он стал называться «Жетыген». Гравиметрические наблюдения были выполнены гравиметрами CG-5, определения координат системами Trimble NetR9 и R7 GNSS. Точность определения приращений силы тяжести между пунктами составила $\pm 0,001-0,002$ мГал, высот $\pm 0,008$ м, координат $\pm 0,005$ м (28), диапазон составляет 100,910 мГал. Расстояние от пункта № 1-Карьер до пункта № 6-Дмитриевка по дорогам составляет 31,1 км. Все пункты базиса представляют собой железобетонный монолит, заглубленный не менее чем на 2 метра. Верхняя часть пунктов имеет размер в поперечном сечении для пункта № 1, 1×1 м, для остальных 2×1 м. Рабочая поверхность пункта оборудована металлической центральной маркой и площадкой для одновременной установки шести гравиметров CG-5 или CG-6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки доступности существующих калибровочных систем в глобальном масштабе был создан комплексный макет расположения этих систем с использованием программного обеспечения QGIS. На рисунке 1 представлена обзорная схема расположения базисов на карте мира. Из данной схемы видно, что наибольшая плотность базисов находится в европейской части евразийского континента. Это связано с тем, что в данном регионе активно ведутся гравиметрические исследования с использованием относительных гравиметров на протяжении многих десятков лет. Но при этом, следует учитывать тот факт, что информации о калибровочных гравиметрических базисах некоторых стран нет в открытом доступе глобальной сети.

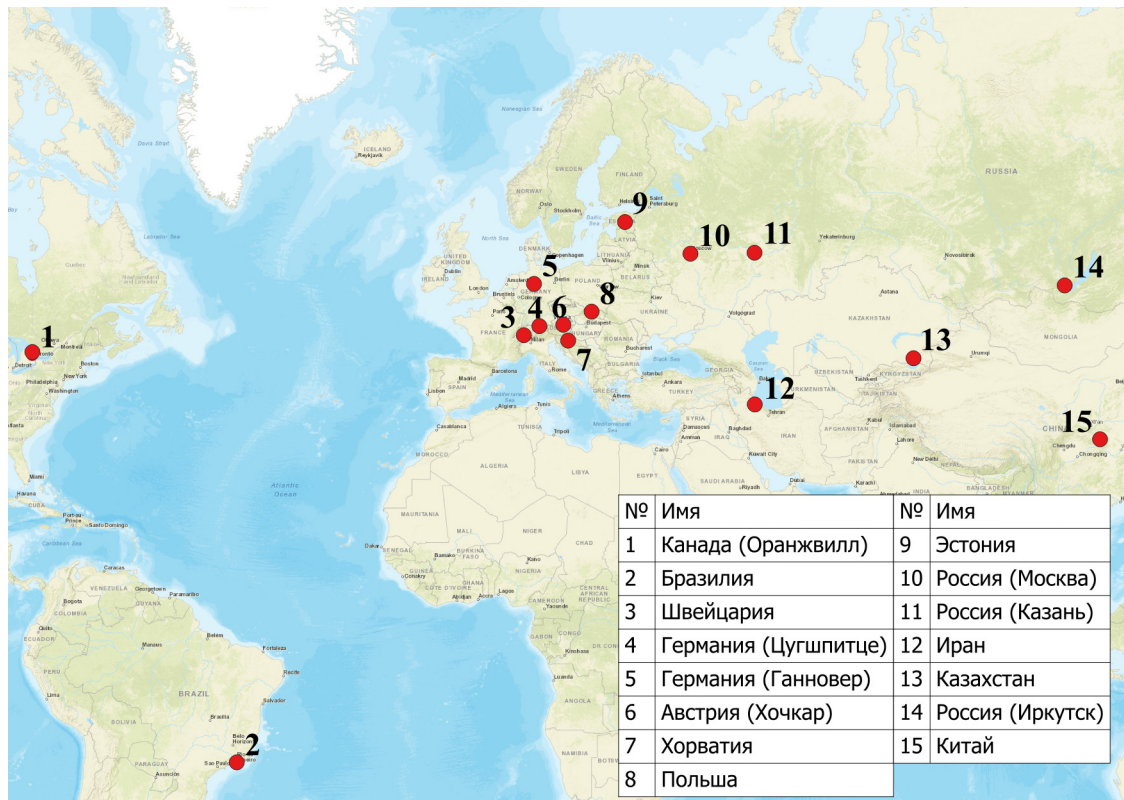


Рис 1. Расположение гравиметрических калибровочных систем на карте мира

По данным рассмотренных публикаций была составлена сводная таблица с основными характеристиками калибровочных гравиметрических систем (таблица 1). Такими характеристиками являются разности ускорения и др.

Таблица 1

Значения ускорения силы тяжести (g) на пунктах калибровочных базисов, описанных ранее. В таблице g – ускорение силы тяжести, W_{hh} – вертикальный градиент ускорения силы тяжести, Δg – приращение силы тяжести, u_g, u_w – неопределенности ускорения силы тяжести и вертикального градиента, соответственно

Калибровочный базис в горах Гарц				
Название	g (JILA g -3), мкГал	g (A10-033), мкГал	W_{hh} , мкГал/м	-
Бад Харибург 481	981165285,7	981165287,5	295,1	-
Торфхаус 563	981080047,2	981080042,5	314,4	-
Кригсгрэбер	981072105,1	981072107,0	317,8	-
Цугшпитце				
Название	Высота, м	$g_h=0.26$, мкГал	W_{hh} , мкГал/м	-
ЦУГ100	2941	980062587	465,3	-
ЦУГ200	2660	980155017	350,5	-
ВАНК100	1738	950373710	387,7	-
ВАНК200	735	980584700	284,7	-
Калибровочный базис в Швейцарских Альпах				
Название	$g \pm u_g$, мкГал	$\Sigma \Delta g$, мГал	$W_{hh} \pm u_w$, мкГал/м	Высота, м
Интерлакен		0	-	570
Гринделвалд	980378973 \pm 2,0	127	144,8	1010

Алпиглен	980283399±2,1	223	292,4	1616
Клайне	980204533±2,5	301	285,9	2063
Шайдегг				
Айгерглечер	980143110±2,4	363	309,1	2320
Айгерванд	979994169±2,5	512	362,3	2865
Юнгфрауёх	979900299±2,5	606	397,2	3456
Калибровочный базис Хочкар в Австрии				
Название	g , мкГал	Δg , мкГал	W_{hh} , мкГал/м	Высота, м
Гостлинг	980683147	198356	282	529,9
Непомук				
Гостлинг чурч	980681919	197128	250	-
Лассинг Маут	980641995	157204	258	684,8
Аиблбоден	980556267	71476	333	1115,9
Хочкар ЮФА	980484791	0	356	1489,8
Калибровочный базис в горах Татра на территории Польши				
Название	$g \pm u_g$, мкГал	$\sum \Delta g$, мкГал	$W_{hh \pm u_w}$, мкГал/м	-
Закопане А-ЗАКО	980778770±3	0	249,0±1,1	-
Закопане ЗАКО-Екс1	980782587±3	-	296,0±3,2	-
Закопане ЗАКО-Екс2	980748065±7	-	267,1±4,7	-
Кузнице Б1	-	36772,1	258,2±5,0	-
Мысленицке Турне Б2	-	-	424,6±3,5	-
Мысленицке Турне Б2А	-	107304,8	360,6±2,3	-
Каспровы В. Б3	-	241449,8	439,0±3,1	-
Каспровы В. Б3А	-	-	428,8±1,5	-
Каспровы В. А-КАСП	980530342±3	-	478,8±3,7	-
Каспровы В. Екс1	980530166±7	248604,6	479,2±7,0	-
Каспровы В. Екс2	980530231±9	-	494,4±1,6	-
Гравиметрический базис Республики Хорватия				
Название	g , мГал	$\sum \Delta g$, мГал	Высота, м	
Основной базис - Вариант 1				
Цаковэц	980706,3		165	-
Босильево	980586,9	119,4	201	-
Госпиц-ДХМЗ	980407,0	179,9	560	-
В итоге	299,3			-
Основной базис - Вариант 2				
Забок	980682,5	-	160	-
Босильево	980586,9	95,6	201	-
Госпиц-ДХМЗ	980407,0	179,9	560	-
В итоге	275,5	-	-	-
Вспомогательный базис				
Забок	980682,5	-	160	-

Зг-Пунтиярка	980510,4	172,0	988	-
Московский гравиметрический базис				
Наименования пунктов	g_1 , мкГал	g_2 , мкГал	g_3 , мкГал	-
ЦНИГАИК	...70829,0	...70829,0	...70826,7	-
Звенигород	...25055,6	...25054,1	...25053,8	-
Красная Пресня	...44334,8	...44333,9	...44332,7	-
Ледово	...51220,7	...51220,1	...51218,4	-
Троице-Сельцо	...70226,7	...70226,7	...70224,2	-
Менделеево	...77106,4	...77106,5	...77103,5	-
Казанский калибровочный базис				
Номер пункта	Наименование пункта	$\Sigma\Delta g$, мкГал	-	-
1	Обсерватория имени Энгельгардт КФУ	В. П. 0	-	-
4	Макулово	17529	-	-
5	Майдан	60323	-	-
6	Буинск	93201	-	-
Иркутский калибровочный базис				
Номер	Наименование пункта	$\Sigma\Delta g$, мкГал	-	-
1	№1	0	-	-
2	№2	23468	-	-
3	№3	36737	-	-
4	№4	45425	-	-
5	№5	80637	-	-
6	№6	93379	-	-
Гравиметрически1 калибровочный1 базис в Китае				
Название	$g_h=25$ см $\pm u_g$, мкГал	W_{hh} , мкГал/см	-	-
ЛС-Г3	978749557,0 \pm 2,3	2,725	-	-
ЛС-Г8	978698848,2 \pm 3,2	3,937	-	-
ЛС-Г11	978668712,9 \pm 1,6	2,652	-	-
ЛС-Г12	978658598,0 \pm 2,1	3,626	-	-
ЛС-Г17	978608557,9 \pm 3,6	3,691	-	-
ЛС-Г18	978597420,4 \pm 2,0	4,307	-	-
ЛС-Г22	978555102,7 \pm 2,4	2,607	-	-
ДҚС-Г1	979375342,0 \pm 2,8	2,765	-	-
ДҚС-Г2	979358463,4 \pm 3,6	2,949	-	-
ДҚС-Г3	979307725,0 \pm 1,1	3,393	-	-
ДҚС-Г4	979253973,3 \pm 1,1	3,364	-	-
ХС-Г1	978537963,3 \pm 3,9	2,888	-	-
ХС-Г2	978472074,6 \pm 6,2	2,495	-	-
ХС-Г3	978418618,0 \pm 3,5	2,661	-	-
НКС-Г1	978307408,1 \pm 2,2	2,961	-	-
НКС-Г2	978244945,3 \pm 1,5	3,325	-	-
НКС-Г3	978167147,0 \pm 2,1	2,572	-	-
ТЗС-Г1	978836747,9 \pm 2,9	3,021	-	-
ТЗС-Г2	978768553,1 \pm 6,5	2,714	-	-
ТЗС-Г3	978699551,7 \pm 2,2	2,327	-	-
ЛҚЫ-Г1	978521407,6 \pm 1,7	4,181	-	-
ЛҚЫ-Г2	978543949,5 \pm 2,8	3,833	-	-

ЛҚЫ-Г3	978590694,8±2,3	3,561	-	-
ЛҚЫ-Г4	978634021,9±1,3	2,579	-	-
Алматинский гравиметрический полигон				
Наименование приращений	Номер пункта	Δg , мГал	$\Sigma \Delta g$, мГал	u_g , мГал
2-1	1	+18,098	0	±0,001
2-2а	2	-11,902	-18,098	±0,001
2а-3	2а	-11,742	-30,000	±0,001
3-4	3	-20,986	-41,742	±0,001
4-5	4	-18,124	-62,728	±0,001
5-6	5	-20,059	-80,852	±0,001
	6		-100,911	Диапазон полигона

Из таблицы видно, что самые удачные базисы соответствуют диапазону силы тяжести не менее 300 мГал, при этом на всех пунктах базиса выполнены абсолютные определения ускорения силы тяжести с наивысшей точностью, со средней квадратической ошибкой, не превышающей нескольких мкГал. Помимо абсолютных измерений на таких базисах выполнены определения параметров вертикального градиента ускорения силы тяжести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты гравиметрических наблюдений могут применяться для оценки экологической ситуации, включая, выявление зон деформаций земной поверхности, определение процессов подземной фильтрации, оценки состояния хвостохранилищ и участков добычи полезных ископаемых.

Высокие требования к точности определения абсолютных и относительных значений ускорения силы тяжести подчеркивают важность гравиметрических калибровочных базисов в метрологическом обеспечении гравиметров. Особенно это касается относительных гравиметров, используемых в широком спектре геофизических исследований, от геодинамики до поиска полезных ископаемых.

При разработке вертикальных базисов особое внимание уделяется выбору района с учетом географических и инфраструктурных факторов. Опыт различных стран показывает, что необходимо соблюдать определенные требования к калибровочным базисам, включая минимальное количество пунктов, достаточное приращение ускорения силы тяжести, доступность пунктов, надежность эталонных значений и

учет вертикальных градиентов ускорения силы тяжести.

В Республике Казахстан необходимость создания новых калибровочных систем, соответствующих современным требованиям, особенно остро стоит в районах активной хозяйственной деятельности, включая горные районы, такие, как окрестности Алматы. Предварительный анализ показывает возможность создания в этом районе базиса с широким диапазоном приращения силы тяжести и удобным доступом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы выражаем искреннюю благодарность всем, кто способствовал реализации данного исследования. Особую признательность хотим выразить научному коллективу проекта «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот» - представителям КазНУ им. К.И. Сатпаева, ТОО «Институт ионосферы» и ТОО «GEOID» за неоценимый вклад на всех этапах работы над статьей.

Особо хотим отметить роль Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в лице его сотрудников и членов Национального научного совета, которые поддержали финансирование данного исследования в рамках программно-целевого финансирования (ПЦФ ИРН №BR21882366).

Мы также благодарны всем неназванным рецензентам за их конструктивные комментарии и предложения, которые помогли значительно улучшить качество данной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов Д.М. Современные микроамплитудные тектонические движения, дистанционные методы их изучения и значение для нефтегазовой геологии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – №4. – С. 6-11.
2. Варганян Г.С. Система геодинамического мониторинга крупных ареалов для обеспечения безопасности геолого-разведочных и эксплуатационных работ на нефть и газ / Г. С. Варганян // Геофизические процессы и биосфера. – 2010. – Т. 9, № 2. – С. 5-22.
3. Appriou, D., Bonneville, A., Zhou, Q. & Gasperikova, E. (2020) Time-lapse gravity monitoring of CO₂ migration based on numerical modeling of a faulted storage complex. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 95, 102956.
4. Darwish, S. M., Saibi, H., Gabr, A. & Mohamed, M. M. (2021) Microgravity monitoring of groundwater dynamics in a shallow aquifer in Al-Ain (Abu Dhabi Emirate, United Arab Emirates): an opportunity for understanding aquifer hydrodynamics in arid regions. *Environ Earth Sci* 80, 559.
5. Bychkov, S., Dolgal, A., & Simanov, A. (2021). Interpretation of Gravity Monitoring Data on Geotechnical Impact on the Geological Environment. *Pure and Applied Geophysics*, 178(1). <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02640-8>.
6. Greco, F. & Currenti, Gilda & D'Agostino, G. & Negro, C. & Di Stefano, Andrea & Germak, Alessandro. (2013). Six Years of Repeated Absolute Gravity Measurements at Etna Volcano (Italy).
7. Mulugeta, B. D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., & Saibi, H. (2021). Interpretation of gravity data to delineate the subsurface structures and reservoir geometry of the Aluto–Langano geothermal field, Ethiopia. *Geothermics*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102093>.
8. Urs, M., Philippe, R., Alessandro, G., & Herbert, W. (2014). CCM-IAG Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry: Role of CCM and IAG. *Pálinkáš*. http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=text&id_c=7&id_t=553.
9. MDDIAI. (2023). On approval of the instruction for creation and updating of the National Spatial Data Infrastructure.
10. Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., Gabalda, G., Mäkinen, J., Pálinkáš, V., Rülke, A., & Vitushkin, L. (2021). Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy*, 95(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.
11. Торге, Вольфганг. Гравиметрия = Gravimetry: Gravimetry / Вольфганг Торге; Пер. с англ. Г. А. Шанурова под ред. А. П. Юзefовича. - Москва: Мир, 1999. - 428 с.: ил.; 24 см.; ISBN 5-03-002809-9
12. Scintrex Limited. (2012). CG-5 Operating Manual. CG-5 Scintrex Autograv System (8th ed.).
13. Sousa, M. A. De, & Santos, A. A. Dos. (2010). Absolute Gravimetry on the Agulhas Negras Calibration Line. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(2), 165–174.
14. Finnish Geodetic Institute. (2011). Geodetic Operations in Finland 2008 – 2011.
15. Timmen, L., Schilling, M., Reinhard, F., Lothhammer, A., Gabriel, G., & Vogel, D. (2018). Relative Gravimeter Calibration System for High Accurate Applications. *Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly*.
16. Flury, J., Peters, Th., Schmeer, M., Timmen, L., & Falk, R. (2007). Precision Gravimetry in the New Zugspitze Gravity Meter Calibration System.
17. Marti, U., Baumann, H., Buřrki, B., & Gerlach, C. (2015). A First Traceable Gravimetric Calibration Line in the Swiss Alps. In S. Jin & R. Barzaghi (Eds.), *IGFS 2014* (Vol. 144, pp. 17–25). Springer International Publishing.
18. Werhahn, O., Olson, D. A., Kuanbayev, C., & Henson, A. (2023). The CIPM MRA—success and performance. In *Metrologia* (Vol. 60, Issue 4). <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ace191>
19. Ruess, D., & Meurers, B. (2000). Gravity Measurements at the Hochkar Calibration Line (HCL).
20. Ruess, D., & Ullrich, C. (2015). Renewal of the Austrian Gravimeter Calibration Line HCL. *VGI - Österreichische Zeitschrift Für Vermessung Und Geoinformation*, 103, 182.
21. Sas, A., Sas-Uhrynowski, A., Cisak, M., & Siporski, L. (2009). Vertical Gravimetric Calibration Baseline in the Tatra Mountains of Poland. *Geoinformation Issues*, 1(1), 19–32.
22. Repanić, M., Grgić, I., & Bašić-Zagreb, T. (2013). Prijedlog gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske. *Geodetski List*, 67(2).
23. Oja, T., Turk, K., & Jurgenson, H. (2014). Evaluating the Calibration of Scintrex CG-5 Spring Gravimeters.
24. Oshchepkov, I. A., Sermyagin, R. A., Spesivtsev, A. A., Yushkin, V. D., Pozdnyakov, A. V., Kovrov, A. A., & Yuzefovich, P. A. (2016). Gravity Measurements in the Moscow Gravity Network.
25. Geophysical Center RAS. (2019). National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 (Issue GRPS-4-2016BS040).
26. ФГУП 'ВНИИМ' «ГРСИ РФ №65252-16: «Полигон Казанский гравиметрический». Отчет. Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2016. 5с.
27. ФГУП 'ВНИИМ'» ГРСИ РФ №73480-18: «Полигон Иркутский гравиметрический». Отчет. Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2018. 5с.
28. Cheraghi, H., Hinderer, J., Saadat, S. A., Bernard, J.-D., Djamour, Y., Tavakoli, F., Arabi, S., & Azizian Kohan, N. (2020). Stability of the Calibration of Scintrex Relative Gravimeters as Inferred from 12 Years of Measurements on a Large Amplitude Calibration Line in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 177(2), 991–1004.
29. Wang, L.S. et al. (2014a) 'The Use of the A10-022 Absolute Gravimeter to Construct the Relative Gravimeter Calibration Baselines in China', *Metrologia*, 51(3), pp. 203–211.
30. Wang, L.S. et al. (2014b) 'The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China', *Metrologia*, 51(3), p. 203.
31. Азаркина, Е. А. «Отчет о создании эталонных гравиметрических полигонов на территории Казахской ССР в 1976 году». Отчет. Министерство геологии СССР. НПО Союзгеофизика. Специальная региональная геофизическая экспедиция. Министерсто геологии Казахской ССР. Южно-Казахстанское территориальное геологическое управление. Казахстанская аэрогеолого-геофизическая экспедиция, 1977.
32. Лапин А.В., Гугнин А.Е., Бекешев А.А. и др. «Отчет по метрологии государственного гравиметрического полигона Капчагай – Алматы». Отчет. Алматы: Товарищество с ограниченной ответственностью «Научно- производственный центр Геокен», 2001. 48с.

REFERENCES

1. Trofimov, D. M. (2016). Sovremennye mikroamplitudnye tektonicheskie dvizhenskie, distantsionnye metody ih izucheniya i znachenie dlya neftegazovoi geologii [Modern microamplitude tectonic movements, remote methods of their study, and significance for oil and gas geology]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftiykh i gazovykh mestorozhdenii*, no 4, pp. 6–11 [in Russian].
2. Vartanyan, G. S. (2010). Sistema geodinamicheskogo monitoringa krupnykh arealov dlya obespecheniya bezopasnosti geologorazvedochnykh i ekspluatatsionnykh rabot na neft i gaz [System of geodynamic monitoring of large areas for ensuring the safety of geological exploration and operational work in oil and gas]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, vol. 9, no 2, pp. 5–22 [in Russian].
3. Appriou, D., Bonneville, A., Zhou, Q., & Gasperikova, E. (2020). Time-lapse gravity monitoring of CO₂ migration based on numerical modeling of a faulted storage complex. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 95, 102956.
4. Darwish, S. M., Saibi, H., Gabr, A., & Mohamed, M. M. (2021). Microgravity monitoring of groundwater dynamics in a shallow aquifer in Al-Ain (Abu Dhabi Emirate, United Arab Emirates): An opportunity for understanding aquifer hydrodynamics in arid regions. *Environmental Earth Sciences*, 80, 559.
5. Bychkov, S., Dolgal, A., & Simanov, A. (2021). Interpretation of gravity monitoring data on geotechnical impact on the geological environment. *Pure and Applied Geophysics*, 178(1). <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02640-8>.
6. Greco, F., Currenti, G., D'Agostino, G., Negro, C., Di Stefano, A., & Germak, A. (2013). Six years of repeated absolute gravity measurements at Etna Volcano (Italy). *Journal of Geodesy*, 95(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.
7. Mulugeta, B. D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., & Saibi, H. (2021). Interpretation of gravity data to delineate the subsurface structures and reservoir geometry of the Aluto–Langanoo geothermal field, Ethiopia. *Geothermics*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102093>.
8. Urs, M., Philippe, R., Alessandro, G., & Herbert, W. (2014). CCM-IAG strategy for metrology in absolute gravimetry: Role of CCM and IAG. Palinkas. Retrieved from http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=text&id_c=7&id_t=553.
9. MDDIAI. (2023). On approval of the instruction for creation and updating of the National Spatial Data Infrastructure.
10. Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., Gabalda, G., Mäkinen, J., Pálkás, V., Rülke, A., & Vítushkin, L. (2021). Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy*, 95(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.
11. Torge, V. (1999). *Gravimetria / V. Torge; Per. s angl. G. A. Shanurova [Gravimetry / V. Torge; Translated by G. A. Shanurova]*. Moscow: Mir [in Russian].
12. Scintrex Limited. (2012). *CG-5 Operating Manual. CG-5 Scintrex Autograv System (8th ed.)*.
13. Sousa, M. A. De, & Santos, A. A. Dos. (2010). Absolute gravimetry on the Agulhas Negras calibration line. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(2), 165–174 [in Portuguese].
14. Finnish Geodetic Institute. (2011). *Geodetic operations in Finland 2008–2011*.
15. Timmen, L., Schilling, M., Reinhard, F., Lothhammer, A., Gabriel, G., & Vogel, D. (2018). Relative gravimeter calibration system for high accurate applications. *Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly*.
16. Flury, J., Peters, Th., Schmeer, M., Timmen, L., & Falk, R. (2007). Precision gravimetry in the new Zugspitze gravity meter calibration system.
17. Marti, U., Baumann, H., Bürki, B., & Gerlach, C. (2015). A first traceable gravimetric calibration line in the Swiss Alps. In S. Jin & R. Barzaghi (Eds.), *IGFS 2014 (Vol. 144, pp. 17–25)*. Springer International Publishing.
18. Werhahn, O., Olson, D. A., Kuanbayev, C., & Henson, A. (2023). The CIPM MRA—success and performance. *Metrologia*, 60(4). <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ace191>.
19. Ruess, D., & Meurers, B. (2000). Gravity measurements at the Hochkar calibration line (HCL).
20. Ruess, D., & Ullrich, C. (2015). Renewal of the Austrian gravimeter calibration line HCL. *VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 103, 182 [in German].
21. Sas, A., Sas-Uhrynowski, A., Cisek, M., & Siporski, L. (2009). Vertical gravimetric calibration baseline in the Tatra Mountains of Poland. *Geoinformation Issues*, 1(1), 19–32.
22. Repanic, M., Grgić, I., & Bašić-Zagreb, T. (2013). Prijedlog gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske. *Geodetski List*, 67(2) [in Croatian].
23. Oja, T., Turk, K., & Jurgenson, H. (2014). Evaluating the calibration of Scintrex CG-5 spring gravimeters.
24. Oshchepkov, I. A., Sermyagin, R. A., Spesivtsev, A. A., Yushkin, V. D., Pozdnyakov, A. V., Kovrov, A. A., & Yuzefovich, P. A. (2016). Gravity measurements in the Moscow gravity network [in Russian].
25. Geophysical Center RAS. (2019). National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 (Issue GRPS-4-2016BS040).
26. FGUP «VNIIM» (2016). GRSI RF №65252-16: Poligon Kazanskii gravimetricheskii [GRSI RF No. 65252-16: Kazan Gravimetric Calibration Line]. Sankt-Peterburg: VNIIM im. D.I. Mendeleeva [in Russian].
27. FGUP «VNIIM» (2018). GRSI RF №73480-18: Poligon Irkutskii gravimetricheskii [GRSI RF No. 73480-18: Irkutsk Gravimetric Calibration Line]. Sankt-Peterburg: VNIIM im. D.I. Mendeleeva [in Russian].
28. Cheraghi, H., Hinderer, J., Saadat, S. A., Bernard, J.-D., Djamour, Y., Tavakoli, F., Arabi, S., & Azizian Kohan, N. (2020). Stability of the calibration of Scintrex relative gravimeters as inferred from 12 years of measurements on a large amplitude calibration line in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 177(2), 991–1004.
29. Wang, L. S., et al. (2014). The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China. *Metrologia*, 51(3), 203–211.
30. Wang, L. S., et al. (2014). The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China. *Metrologia*, 51(3), 203.
31. Azarkina, E. A. (1977). Otchet o sozdanií etalonnykh gravimetricheskikh poligonov na territorii Kazakhstanskoi SSR v 1976 godu. Otchet Ministerstva geologii SSSR. NPO Soyuzgeofizika. Yuzhno-Kazakhstanskoe territorial'noe geologicheskoe upravlenie. Kazakhstanskaia aerogeologo-geofizicheskaia ekspeditsiia [Report on the creation of reference gravimetric polygons in the territory of the Kazakh SSR in 1976. Report. Ministry of Geology of the USSR. NPO Soyuzgeofizika. South Kazakhstan Territorial Geological Administration. Kazakhstan Aerogeological-Geophysical Expedition]. [in Russian].
32. Lapin, A. V., Gugin, A. E., Bekeshev, A. A., et al. (2001). Otchet po metrologii gosudarstvennogo gravimetricheskogo poligona Kapchagai – Almaty. Almaty: Tovarishchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Nauchno-proizvodstvennyi tsentr Geoken» [Report on the metrology of the state gravimetric polygon Kapchagai - Almaty]. Almaty: Limited Liability Company «Scientific and Production Center Geoken» [in Russian].

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ КАЛИБРЛЕУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ ШОЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРДЕГІ РӨЛІ

Н.Т. Кемербаев¹ т.ғ.к., Г.А. Мусина^{1*}, М.Х. Шкиева¹, К.Б. Самарханов^{1,2} г.ғ.к., Ә.Т. Баталова¹, А.Н. Рахимжанов¹

¹«GEOID» ЖШС, Астана, Қазақстан

²«Астана» халықаралық ғылыми кешені, Астана, Қазақстан

E-mail: snezhinka200184@gmail.com

Мақалада пайдалы қазбалар кен орындарының экологиялық жағдайын бақылау үшін гравиметриялық бақылауларды қолдану мысалдары келтірілген. Мұндай өлшеулерді әдетте аспаптар тобы жасайды. Дәлдіктің жоғары деңгейі калибрлеу арқылы қол жеткізілетін барлық қолданылатын құрылғылардың дәйектілігін талап етеді. Жер бетіндегі ауырлық күшінің үдеуін дәл және сенімді өлшеуде шешуші рөл атқаратын гравиметриялық калибрлеу жүйелеріне шолу жасалады. Калибрлеу негіздері метрологиялық бақылауды қамтамасыз ету және геодезия, геофизика, геология және басқа да байланысты пәндер сияқты жер туралы ғылым салаларында өлшеу дәлдігін арттыру үшін қажет. Мақалада Ресей, Польша, Хорватия, Швейцария, Канада, Австрия, Германия, Қытай, Эстония, Финляндия, Иран, Бразилия, сондай-ақ Қазақстан Республикасында қолданылатын әртүрлі калибрлеу жүйелері егжей-тегжейлі қарастырылған.

Түйін сөздер: гравиметрия, калибрлеу негізі, scintrex гравиметрі, қоршаған орта.

AN OVERVIEW OF INTERNATIONAL CALIBRATION SYSTEMS AND THEIR ROLE IN ENVIRONMENTAL RESEARCH

N. T. Kemberbayev¹ Candidate of Technical Sciences, G.A. Mussina^{1*}, M.K. Shkiyeva¹, K.B. Samarkhanov^{1,2} Candidate of Geographical Sciences, A.T. Batalova¹, A.N. Rakhimzhanov¹

¹LLP «GEOID», Astana, Kazakhstan

²Astana International Scientific Complex, Astana, Kazakhstan

E-mail: snezhinka200184@gmail.com

The article provides examples of the use of gravimetric observations to monitor the environmental situation of mineral deposits. Such measurements are usually made by a group of devices. A high level of accuracy requires the consistency of all instruments used, which is achieved by calibration. An overview of gravimetric calibration systems, which play a key role in accurate and reliable measurement of gravity acceleration on the Earth's surface, is given. Calibration bases are necessary to ensure metrological control and improve measurement accuracy in such fields of Earth sciences as geodesy, geophysics, geology and other related disciplines. This article discusses different gauge systems used in different countries, including Russia, Poland, Croatia, Switzerland, Canada, Austria, Germany, China, Estonia, Finland, Iran, Brazil, and also in the Republic of Kazakhstan.

Keywords: gravimetry, calibration basis, Scintrex gravimeter, environment.

Сведения об авторах/Авторлар туралы мәліметтер/Information about authors:

Кемербаев Нурган Токанович – кандидат технических наук, генеральный директор, ТОО «GeoID», ул. Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан, n.kemberbaev@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0002-9868-8087>

Мусина Гузалия Альтавовна – начальник отдела камеральной обработки, ТОО «GeoID», ул. Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан, g.mussina@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0000-6897-3237>

Шкиева Марал Халилolloвна – заместитель руководителя отдела обработки пространственных данных и ДЗЗ, ТОО «GeoID», ул. Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан, maral.shkiyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0696-3469>

Самарханов Канат Бауыржанович – кандидат географических наук, заместитель директора по R&D, ТОО «GeoID», ул. Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан. Главный научный сотрудник, Международный научный комплекс «Астана», проспект Кабанбай батыр, 8, Астана, Казахстан, kanat.baurzhanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9799-8695>

Баталова Асель Тулегеновна - менеджер проекта, ТОО «GeoID», ул.Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан, assel.theta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2123-2029>

Рахимжанов Азамат Нуражанович – инженер-геодезист, ТОО «GeoID», ул. Тауельсиздик, 3, Астана, Казахстан, a.rakhimzhanov@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0007-6899-2754>

Кемербаев Нурган Токанович – техника ғылымдарының кандидаты, бас директор, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан, n.kemerbaeyev@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0002-9868-8087>.

Мусина Гузалия Альтавовна – камералдық өңдеу бөлімінің бастығы, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан, snezhinka200184@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6897-3237>

Шкиева Марал Халилollaқызы – кеңістіктік деректерді өңдеу және ЖКЗ бөлімі басшысының орынбасары, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан, maral.shkiyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0696-3469>.

Самарханов Канат Бауржанович – география ғылымдарының кандидаты, директордың R & D жөніндегі орынбасары, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан. Бас ғылыми қызметкер, «Астана» халықаралық ғылыми кешені, Қабанбай батыр даңғылы, 8, Астана, Қазақстан, kanat.baurzhanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9799-8695>

Баталова Әсел Төлегенқызы - жоба менеджері, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан, assel.theta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2123-2029>

Рахимжанов Азамат Нуражанович – инженер-геодезист, «GEOID» ЖШС, Тәуелсіздік көшесі, 3, Астана, Қазақстан, a.rakhimzhanov@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0007-6899-2754>

Kemerbaev Nurgan Tokanovich– Candidate of Technical Sciences, General Director, LLP «GEOID», Tauelsizdik str., 3, Astana, Kazakhstan, n.kemerbaeyev@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0002-9868-8087>

Mussina Guzaliya Altavovna– Head of the Desk Processing Department, LLP «GEOID», Tauelsizdik str., 3, Astana, Kazakhstan, g.mussina@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0000-6897-3237>

Maral Khalilollovna Shkiyeva– Sensing Deputy Head of the Department of Spatial Data Processing and Remote, LLP «GeoID», LLP «GEOID», Tauelsizdik str. 3, Astana, Kazakhstan, maral.shkiyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0696-3469>

Kanat Baurzhanovitch Samarkhanov– Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director of R&D, LLP «GEOID», Tauelsizdik str. 3, Astana, Kazakhstan. Chief Researcher, Astana International Scientific Complex, Kabanbai Batyr ave., 8, Astana, Kazakhstan, kanat.baurzhanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9799-8695>

Assel Tulegenovna Batalova - Project Manager, LLP «GEOID», Tauelsizdik str., 3, Astana, Kazakhstan, assel.theta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2123-2029>

Azamat Nurazhanovich Rakhimzhanov– engineer-surveyor, LLP «GEOID», Tauelsizdik str., 3, Astana, Kazakhstan, a.rakhimzhanov@geo-id.kz, <https://orcid.org/0009-0007-6899-2754>

Вклад авторов/ Авторлардың қосқан үлесі/ Authors contribution:

Кемербаев Н.Т. – определение методики, подготовка и редактирование текста

Мусина Г.А. – определение методики, подготовка и редактирование текста, обработка данных и визуализация

Шкиева М.Х.– определение методики, подготовка и редактирование текста

Самарханов К.Б. – определение методики, подготовка и редактирование текста, разработка концепции

Баталова А.Т. – подготовка и редактирование текста

Рахимжанов А.Н. – подготовка и редактирование текста

Кемербаев Н.Т. – әдістемесін анықтау, мәтінді дайындау және өңдеу

Мусина Г.А. – әдістемені анықтау, мәтінді дайындау және өңдеу, деректерді өңдеу және визуализация

Шкиева М.Х. – әдістемесін анықтау, мәтінді дайындау және редакциялау

Самарханов К.Б. – әдістемесін анықтау, мәтінді дайындау және редакциялау, тұжырымдама жасау

Баталова Ә.Т. – мәтінді жазу мен өзгерту

Рахимжанов А.Н. – мәтінді жазу мен өзгерту

Kemerbaev N.– definition of methodology, preparation and editing of text

Mussina G.– definition of methodology, preparation and editing of text, data processing and visualization

Shkiyeva M. – definition of methodology, preparation and editing of text

Samarkhanov K. – definition of methodology, preparation and editing of text, concept development

Batalova A.– preparation and editing of text

Rakhimzhanov A. – preparation and editing of text