



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

ЖЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ
REMOTE SENSING

DOI 10.51885/1561-4212_2024_3_62
МРНТИ 36.16.03

Х.М. Касымканова¹, А. Кенесбаева², Э.О. Орынбасарова³, К.А. Жанакүлова⁴, Б. Адебиев⁵

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан

¹E-mail: k.kassymkanova@satbayev.university

²E-mail: agna68@mail.ru*

³E-mail: e.orynbassarova@satbayev.university

⁴E-mail: 920103402123-d@stud.satbayev.university

⁵E-mail: astbaha6@gmail.com

ПОДГОТОВКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ГЕОИДА КАЗАХСТАНА

ҚАЗАҚСТАН ГЕОИДІНІҢ МОДЕЛІН ҚҰРУ ҮШІН ГРАВИМЕТРИЯЛЫҚ НЕГІЗДІ ДАЙЫНДАУ

PREPARING THE GRAVIMETRIC BASE TO CREATE A GEOID MODEL OF KAZAKHSTAN

Аннотация. Статья посвящена вопросу подготовки гравиметрических данных для создания модели геоида Республики Казахстан. Региональная модель геоида позволит решить ряд научно-практических задач, а также будет способствовать широкому использованию экономичных ГНСС-измерений взамен трудоемких и дорогостоящих нивелирных работ при определении высот точек. Гравиметрическая основа модели геоида создается в виде карты аномалии силы тяжести. Действующие гравиметрические карты Казахстана начали создаваться в начале 70-х годов прошлого столетия и были завершены в 2001 году, обеспечив всю территорию страны гравиметрической основой. Однако в последние десятилетия в условиях стремительного развития науки и технологий значительно возросли требования к точности и детализации гравиметрических данных. В связи с этим появляется необходимость в подготовке современной гравиметрической карты Казахстана, которая послужит исходной информационной базой при решении множества научных и технических задач, включая создание актуальной модели геоида страны. В данной статье рассматриваются современные методики создания гравиметрических карт, а также приводятся примеры зарубежного опыта. Также описаны этапы разработки современной карты аномалий силы тяжести в редукциях Буге для территории Казахстана. Освещен процесс создания интегрированной базы данных в программной среде ArcGIS с пространственной привязкой пунктов гравиметрической сети в системе координат WGS 1984 и в Балтийской системе высот. Обновленная гравиметрическая карта Казахстана может послужить для изучения динамики гравитационного поля страны, анализа геологической структуры Земли, исследования тектонической активности на территории страны, а также для проведения геодинамических исследований в районах разработки месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: гравиметрическая карта, аномалия Буге, промежуточный слой, геоид, модель геопотенциала, спутниковая гравиметрия.

Аңдатпа. Мақала Қазақстан Республикасы геоидінің моделін құру үшін гравиметриялық мәліметтерді дайындау мәселесіне арналған. Аймақтық геоидтық модель бірқатар ғылыми және практикалық мәселелерді шешуге мүмкіндік береді, сонымен қатар нүктелердің биіктіктерін анықтау кезінде, көп еңбекті қажет

ететін, әрі қымбат нивелирлеу жұмыстарын үнемді GNSS өлшемдерімен ауыстыруға ықпал етеді. Геоидтық модельдің гравиметриялық негізі ауырлық күші аномалияларының картасы түрінде құрылады. Қазақстанның қазіргі гравиметриялық карталары өткен ғасырдың 70-жылдарының басында құрыла бастады және 2001 жылы аяқталып, еліміздің барлық аумағын гравиметриялық негізбен қамтамасыз етті. Дегенмен, соңғы онжылдықтарда ғылым мен техниканың қарқынды дамуымен қатар, гравиметриялық мәліметтердің дәлдігі мен егжей-тегжейлілігіне қойылатын талаптар айтарлықтай өсті. Осыған байланысты, көптеген ғылыми-техникалық мәселелерді шешу үшін, оның ішінде еліміздің қазіргі заманғы геоидтық моделін құру үшін де бастапқы ақпараттық база болатын, Қазақстанның қазіргі заманғы гравиметриялық картасын дайындау қажеттілігі туындап отыр. Бұл мақалада гравиметриялық карталарды құрудың заманауи әдістері қарастырылып, сонымен қатар, шетелдік үздік тәжірибенің мысалдары келтірілген. Сондай-ақ, Қазақстан аумағы үшін Буге редукцияларындағы ауырлық күші аномалияларының қазіргі заманғы картасын жасау кезеңдері сипатталған. WGS 1984 координаттар жүйесіндегі және Балтық биіктік жүйесіндегі гравиметриялық тор нүктелерінің кеңістіктік сілтемесі бар ArcGIS бағдарламалық ортасында біріктірілген деректер қорын құру процесі қамтылған. Қазақстанның жаңартылған гравиметриялық картасы ел төңірегіндегі гравитациялық өрістің динамикасын зерттеуге, жердің геологиялық құрылымын талдауға, мемлекет аумағындағы тектоникалық белсенділікті зерделеуге, сондай-ақ пайдалы қазбалар кен орындары игерілетін аймақтарда геодинамикалық зерттеулер жүргізуге қызмет ете алады.

Түйін сөздер: гравиметриялық карта, Буге аномалиясы, аралық қабат, геоид, геопотенциалдық модель, спутниктік гравиметрия.

Abstract. The regional geoid model will allow solving a number of scientific and practical problems, and will also promote the widespread use of cost-effective GNSS measurements to replace labor-intensive and expensive leveling work when determining the heights of points. The gravimetric basis of the geoid model is created in the form of a gravity anomaly map. The current gravimetric maps of Kazakhstan began to be created in the early 70s of the last century and were completed in 2001, providing the entire territory of the country with a gravimetric basis. However, in recent decades, in the context of rapid development of science and technology, the requirements for the accuracy and detail of gravimetric data have increased significantly. In this regard, there is a need to prepare a modern gravimetric map of Kazakhstan, which will serve as the initial information base for solving many scientific and technical problems, including the creation of an up-to-date model of the country's geoid. This article discusses modern methods for creating gravimetric maps, and provides examples of foreign experience. It also describes the stages of developing a modern map of Bouguer gravity anomalies for the territory of Kazakhstan. The process of creating an integrated database in the ArcGIS software environment, with spatial referencing of gravimetric network points in the WGS 1984 coordinate system and in the Baltic height system is covered. The updated gravimetric map of Kazakhstan can be used to study the dynamics of the country's gravitational field, analyze the geological structure of the Earth, study tectonic activity in the country, as well as conduct geodynamic studies in the areas of mineral deposits development.

Keywords: gravimetric map, Bouguer anomaly, intermediate layer, geoid, geopotential model, satellite gravimetry.

Введение. В связи с модернизацией системы государственного геодезического обеспечения Республики Казахстан выполняется обновление государственной геодезической, нивелирной и гравиметрической сети (Афонин, Кинжигужин & Дрозд, 2021). В рамках данного проекта рассматриваются переход к новой геоцентрической системе координат, а также построение региональной модели геоида Казахстана, которая позволит решить проблему перехода из эллипсоидальных высот, полученных методом ГНСС-наблюдений, к геоидальным, полученным путем геометрического нивелирования.

Геоид представляет собой уровенную поверхность, совпадающую со средним уровнем морей и океанов, мысленно продолженную под материками. Модель геоида показывает высоту его точек над поверхностью эллипсоида, который служит математической моделью Земли (Kim, Yun & Choi, 2020). При создании региональной модели геоида происходит уточнение глобальных моделей гравитационного поля планеты на определенной площади. Технология создания подобной модели включает построение первичной модели геоида по данным наземной гравиметрической съемки с учетом рельефа местности, а затем уравнивание модели геоида по разностям спутниковых и нивелирных высот. В итоге получают комбинированную или гибридную модель регионального геоида (Непоклонов, 2020).

На территории большинства развивающихся стран и практически во всех развитых странах созданы современные цифровые модели геоида, отвечающие современным требованиям точности. К примеру, построены современные модели геоида для Европы, Южной Америки, Африки и Австралии. Цифровые модели геоида, построенные за последние десятилетия, выполнены с разрешающей способностью от одной до пяти минут, а точность достигает нескольких дециметров.

Качество моделирования регионального геоида зависит от гравиметрической и топографической изученности территории страны. На поверхности планеты покрытие гравиметрическими съемками остается неравномерным, местами даже с присутствием белых пятен.

При построении модели геоида Казахстана исходными материалами могут служить: существующие глобальные модели геоида (рис. 1); имеющиеся гравиметрические карты двухсоттысячного масштаба и крупнее; данные GPS-измерений, полученные из различных доступных источников международного и местного значения.

Гравиметрической основой для создания цифровых моделей геоида могут служить карты аномалий силы тяжести в редукциях Буге или в свободном воздухе. В связи с этим возникает задача создания актуальной гравиметрической карты всей территории Казахстана.

Обзор литературы. Вопрос создания новой государственной гравиметрической карты является актуальным для многих стран мира, поэтому на сегодняшний день многие страны строят современные гравиметрические карты с совместным использованием цифровых моделей рельефа и глобальных моделей геопотенциала, а также точных и детальных гравиметрических измерений.

В настоящее время создаются многочисленные обновленные национальные карты аномалий силы тяжести с эффективным использованием улучшенных топографических и геопотенциальных моделей и все более совершенных гравиметрических данных. С применением современных подходов относительно недавно были созданы несколько новых карт в европейских странах: Австрии, Венгрии, Италии и Хорватии (Varga & Stipčević, 2021), а также в Словении, Бразилии и Китае. Рассмотрим некоторые из них в качестве примера.

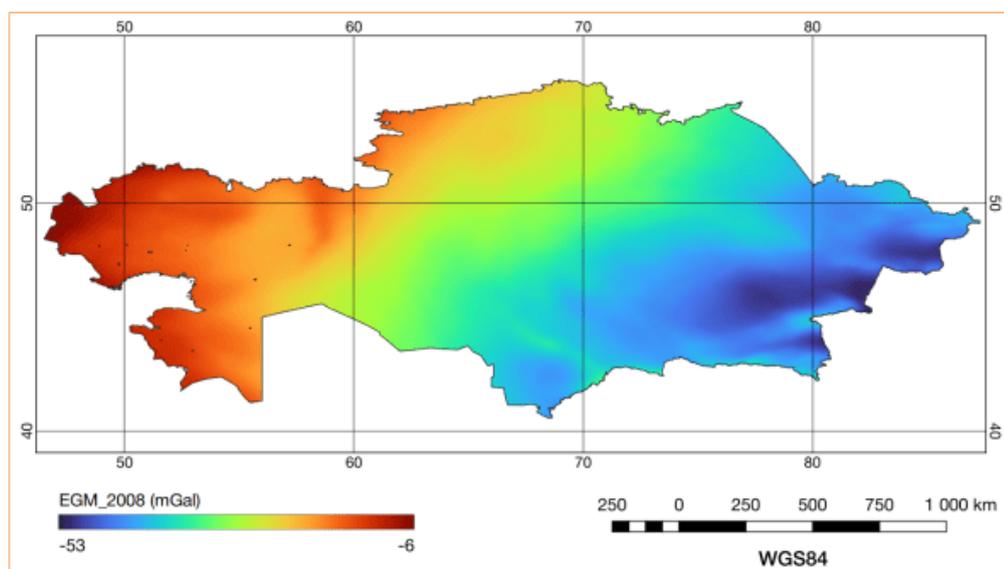


Рисунок 1. Модель геоида EGM_2008 на территории РК

Примечание – составлено автором на основе (ICGEM International Centre for Global Earth Models)

До последнего времени в Словении использовалась карта аномалий Буге, созданная во второй половине предыдущего века в Потсдамской гравиметрической системе. В 1996 году Словения приступила к формированию новой гравиметрической сети (на базе гравиметрической системы IGSN71) с целью создания новой национальной системы высот и новой модели квазигеоида (Medved, Odalović & Koler, 2021).

Для расчета новой системы отсчета высот в Словении были проведены региональные гравиметрические измерения. До этого был проведен анализ плотности существующих гравиметрических точек. На основании этого было выдвинуто предложение по уплотнению точек в районах с недостаточной плотностью точек (Medved, Kuhar & Koler, 2019). В ходе работы использованы оригинальные цифровые модели местности на территории Словении совместно с данными SRTM-3 v2.1 (Shuttle Radar Topography Mission). Также использованы наборы старых и новых гравиметрических данных совместно с гравиметрическими данными по приграничным территориям соседних стран (Италия, Австрия и Венгрия). Большинство этих данных были использованы для создания квазигеоида Словении. Старый набор данных преобразован из исходных координат Гаусса-Крюгера (эллипсоид Бесселя) в поперечные координаты Меркатора ETRS89 (эллипсоид GRS80). Полная гравитационная аномалия Буге для Словении была получена путем введения поправки за рельеф к гравитационным аномалиям Буге.

Новые карты гравитационных аномалий в свободном воздухе и в редукциях Буге были составлены для территории Бразилии. В процессе работы были интегрированы все доступные гравиметрические данные вместе с новыми данными, полученными за последние годы (dos Santos & Zanon et al, 2022). Контроль качества и последующие процессы привязки к координатной сетке в единой системе всего набора данных разработаны с помощью программного обеспечения Oasis Montaj. Области без покрытия данными в северном регионе Бразилии дополнены значениями силы тяжести из геопотенциальной модели XGM2019e. Полученные новые карты гравитационных аномалий в свободном воздухе и в редукциях Буге показывают более подробные коротковолновые геологические структуры, чем их предшественники.

Четыреста семьдесят восемь базовых гравитационных станций в Ираке были использованы для построения карты аномалий Буге Ирака (Al-Banna, Al-Karadaghi & Abdullah, 2020). Эта карта сравнивалась с картой Буге, построенной для тех же станций по международной формуле. Отмечено хорошее сходство форм и расположение аномалии, при этом значения гравитационной аномалии на новой карте увеличены примерно на 30 мГал. Восточная контурная линия нулевой гравитации на новой полученной гравитационной карте совпадает с западной границей тектонической Месопотамской зоны. При этом большинство отрицательных гравитационных аномалий локализованы в Месопотамской области, где расположена основная часть месторождений углеводородов восточной части этой страны. Зоны отрицательной гравитации подтверждают границы самых глубоких пород осадочного бассейна Ирака. Полученные результаты очень ценны для геологических приложений.

Современные гравиметрические карты, построенные в результате интеграции наземных, спутниковых и морских наблюдений за гравитационным полем, вместе с планетарными моделями геопотенциала служат основой при решении широкого круга научно-технических задач, к числу которых относятся: определение характеристик гравитационного поля (Голдобин, 2019), построение геологической модели земной

коры (Исагалиева, Исаев & Истекова, 2021), оценка глубины залежей полезных ископаемых (Shirazy et al., 2021), исследование геодинамической активности территорий (Исагалиева, 2023).

Гравиметрическая изученность Казахстана. Первая гравиметрическая карта Казахстана в масштабе 1:200 000 была издана в 1961 г. и в течение 40 лет систематически издавалась вплоть до 2001 г., когда было завершено ее издание на всю огромную территорию Республики Казахстан, составляющую более 2700 тыс. км². Карты аномалий силы тяжести в редукциях Буге построены в двухсоттысячном масштабе для плотности промежуточного слоя 2,30 г/см³ и 2,67 г/см³. При их составлении были использованы данные гравиметрических съемок более крупных масштабов, имеющиеся на территории листа на год составления.

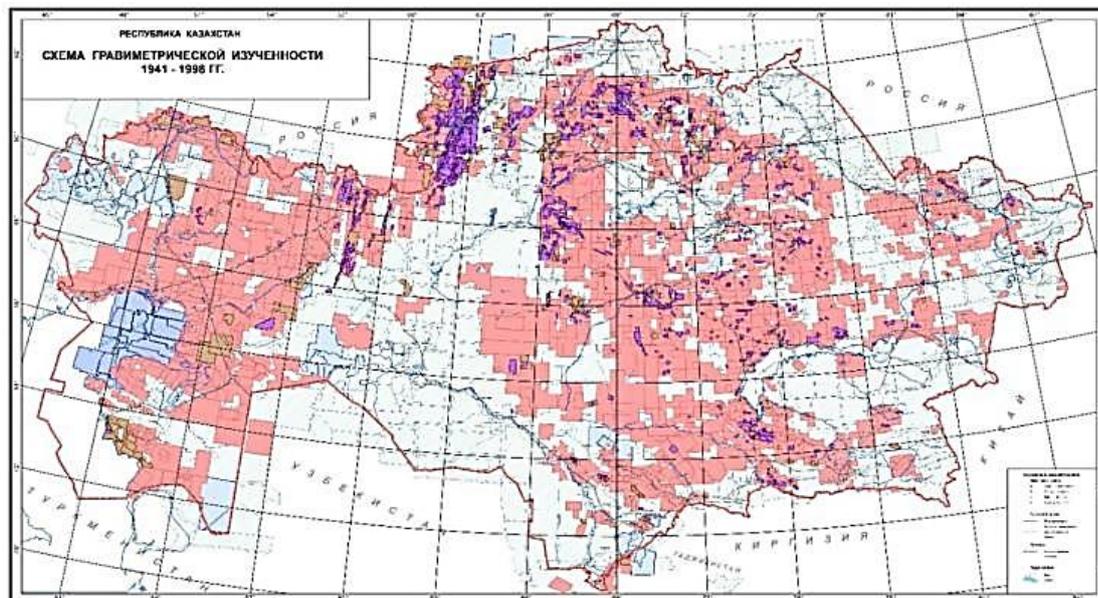
За период с 1941 по 1998 гг. на территории Республики Казахстан выполнены следующие виды гравиметрических работ (Технический отчет ТОО «НПЦ Геокен, 2023):

1. Гравиметрическая съемка масштаба 1:200 000 - 1:100 000 на площади 2680 тыс. км² по сети 4-3x2 км с сечением карт 1-2 мГал. Северо-восточная часть акватории Каспийского моря обеспечена гравиметрической съемкой масштаба 1:100 000 по сети 2x1 км (рис. 2).

2. Гравиметрическая съемка масштаба 1:50 000 и 1:25 000 с сечением карт от 0,2 до 1 мГал на площади 1220 тыс. км², что составляет 44 % территории республики.

3. Гравиметрическая съемка масштаба 1:10 000 - 1:5 000 на площади 82 тыс. км², что составляет 3 % территории республики; сеть съемки 500-50 x 100-50 м, сечение карт 0,1 - 0,2 - 0,25 мГал. Государственная опорная гравиметрическая сеть на территории Республики Казахстан представлена государственной гравиметрической сетью (ГГС) I класса в количестве 77 пунктов с точностью $\pm 0,03 - 0,04$ мГал; ГГС II класса – в количестве 758 пунктов с точностью $\pm 0,06$ мГал; ГГС III класса – в количестве 3500 пунктов с точностью $\pm 0,02 - 0,04$ мГал (относительно пунктов I класса).

По результатам гравиметрических данных, полученных на всю площадь Казахстана, созданы карты аномалий силы тяжести масштабов: 1:1000 000, 1:500 000 и 1:200 000. Для перспективных районов подготовлена к изданию серия гравиметрических карт масштаба 1:50 000 (более 100 трапеций).



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

Контуры наземных гравиметрических съемок масштаба:

- 1:10 000
 - 1:25 000
 - 1:50 000
 - 1:100 000
 - 1:200 000

- контуры морских гравиметрических съемок масштаба 1:100 000 с донными гравиметрами

Рисунок 2. Схема гравиметрической изученности за период с 1941 по 1998 гг.

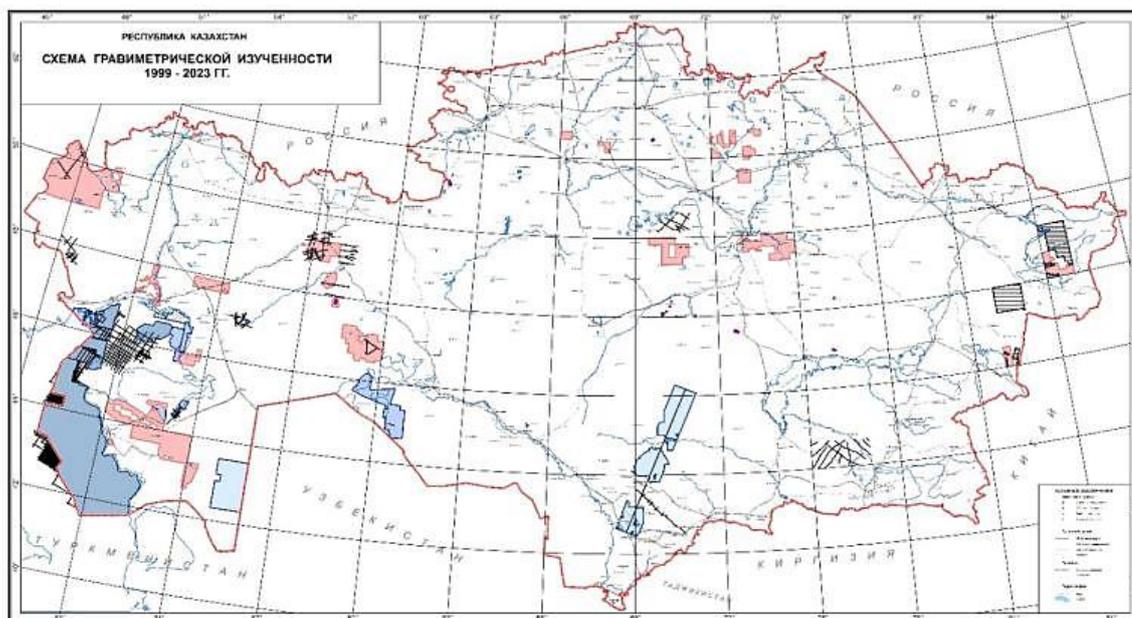
Примечание – составлено автором на основе (Технический отчет о результатах выполненных работ по составлению гравиметрической основы для определения модели геоида. ТОО «НПЦ Геокен», 2023)

Из общего объема выполненных гравиметрических работ в Казахстане 85 % выполнили организации Министерства геологии Казахской ССР. В Западном Казахстане гравиметрические работы также проводили тресты «Саратовнефтегеофизика», «Эмбанефтегеофизика», «Мангышлакнефтегеофизика» Министерства нефтяной промышленности СССР, в Центральном, Северном и Южном Казахстане – Волковская, Зеленогорская и Краснохолмская экспедиции I-го Главного геологического управления Министерства геологии СССР (МГ СССР). Морские работы и опорную сеть II класса выполняли экспедиции МГ СССР. Опорная сеть I класса создана экспедициями ГУГиК (Главное управление геодезии и картографии).

Начиная с 1998 г., большая часть гравиразведочных работ на суше, акватории Казахстанского сектора Каспийского моря (КСКМ), Аральского моря, Бухтарминского водохранилища выполнялись на отдельных участках по госзаказу или заказам недропользователей силами этой компании под руководством Шагирова Б.Б., Лапина А.В., Коврижных П.Н., Архипова В.К., Золотова А.А. и др. (рис. 3).

На территории Западного Казахстана были выполнены гравиметрические съемки в масштабах 1:50 000 и 1:100 000 в период с 2001 по 2022 гг. с целью изучения глубинного геологического строения недр, выделения локальных структур и участков, перспективных для добычи углеводородного сырья.

С целью решения задач опережающей геофизики для ГДП-200 выполнены гравиметрические съемки масштаба 1:50 000 на территории Центрального и Восточного Казахстана в 2014-2015 гг., а также в Западном Казахстане в 2022-2023 гг.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

Контурь наземных гравиметрических съемок масштаба:

■ - 1:10 000 ■ - 1:25 000 ■ - 1:50 000 ■ - 1:100 000

Контурь морских гравиметрических съемок масштаба:

■ - 1:50 000 в транзитной зоне ■ - 1:50 000 по льду ■ - 1:100 000-1:200 000 с набортными гравиметрами

▨ - контурь аэрогравиметрических съемок масштаба 1:100 000

Рисунок 3. Схема гравиметрической изученности за период с 1999 по 2023 гг. [14]

Примечание - составлено автором на основе (Технический отчет о результатах выполненных работ по составлению гравиметрической основы для определения модели геоида. ТОО «НПЦ Геокен», 2023)

В период 2006-2011 гг. выполнены морские гравиметрические измерения на территории КСКМ, а также серия региональных профилей для увязки с ранее выполненными гравиметрическими съемками.

Впервые на территории Казахстана на участках Маканчинском и Бухтарминском в 2015 г. ТОО «НПЦ «ГЕОКЕН» выполнена аэрогравиметрическая съемка масштаба 1:100 000 по сети 500x5000 м.

Необходимо отметить выполнение повторных высокоточных гравиметрических измерений с точностью не хуже $\pm 0,007$ мГал на месторождениях УВС Республики Казахстан в рамках геодинамического мониторинга для обеспечения продолжительного наблюдения за деформацией горных пород и движением флюидов в геологической структуре месторождения углеводородов и выполнения корреляционного анализа изменения гравитационных аномалий в процессе добычи полезных ископаемых. Основными исполнителями этих работ были ТОО «Экогеоунайгаз», ТОО «НПЦ «ГЕОКЕН», ТОО «Жанажол Мунай Сервис». В настоящее время эти исследования проводятся не менее чем на 50 месторождениях УВС.

В 1997 г. по Республиканским бюджетным программам начата цифровизация гравиметрических данных. Оцифровка и создание базы данных (БД) гравиметрической изученности были выполнены РГП «Специализированное гравиметрическое предприятие» (далее РГП «СГП») в 1997-2002 гг.

Начиная с 1997 г. и по 2016 г. включительно, РГП «СГП» выполняло оцифровку данных первичных наблюдений гравиметрических съемок по Республике Казахстан, пополняя Банк гравиметрических данных (БГД) Республики Казахстан. К настоящему времени оцифровано 43 % от общих объемов оцифровки.

Материалы и методы исследования. Гравиметрические карты создаются в основном в виде карт аномалий силы тяжести в свободном воздухе и в редукциях Буге. Аномалия силы тяжести представляет из себя разность между измеренным значением силы тяжести g на поверхности Земли и вычисленным значением силы тяжести γ_0 на поверхности эллипсоида.

Нормальное значение силы тяжести γ_0 вычисляется по формуле Гельмерта:

$$\gamma_0 = 987030(1 + 0.005302\sin 2\varphi - 0.000007\sin^2 2\varphi) - 14 \text{ мГал}, \quad (1)$$

где γ_0 – нормальное значение силы тяжести; φ – широта места наблюдения.

В процессе определения аномалии силы тяжести $\Delta g_{\text{св.}}$ в свободном воздухе вводится поправка δg_1 за высоту точки H^y над уровнем моря, мГал.

$$\Delta g_{\text{св.}} = g - (\gamma_0 + \delta g_1), \quad (2)$$

где $\Delta g_{\text{св.}}$ – аномалия силы тяжести в свободном воздухе; g – измеренное значение силы тяжести; γ_0 – нормальное значение силы тяжести; δg_1 – поправка за высоту точки H^y над уровнем моря.

$$\delta g_1 = -0.30855(1 + 0.00071\cos 2\varphi)H^y, \quad (3)$$

где δg_1 – поправка за высоту точки H^y над уровнем моря; φ – широта места наблюдения; H^y – высота точки над уровнем моря.

Причиной существования аномалии силы тяжести в свободном воздухе является различие между формами и плотностью реальной Земли и Нормальной Земли (уровненным эллипсоидом).

При определении силы тяжести в редукциях Буге вводится поправка δg_2 за влияние топографических масс, учитывающая плотность промежуточного слоя между уровнем моря и физической поверхностью Земли.

$$\Delta g_{\text{Б}} = g - (\gamma_0 + \delta g_1) + \delta g_2, \quad (4)$$

где $\Delta g_{\text{Б}}$ – силы тяжести в редукции Буге; g – измеренное значение силы тяжести; γ_0 – нормальное значение силы тяжести; δg_1 – поправка за высоту точки H^y над уровнем моря; δg_2 – поправка за влияние топографических масс.

$$\delta g_2 = -0.0419\bar{\rho}H^y, \quad (5)$$

где δg_2 – поправка за влияние топографических масс; $\bar{\rho}$ – средняя плотность пород промежуточного слоя; H^y – высота точки над уровнем моря.

Технология построения гравиметрической карты состоит из следующих этапов: выбор масштаба карты и сечения изоаномал; интеграция всех гравиметрических измерений в единую систему; определение плотности слоя; интерполяция значений Δg и оформление самой карты (Кузнецов, Куделина, Леонтьева & Фатюнина, 2020).

Согласно инструкции по гравиметрической разведке, гравиметрические карты создаются в рамках отдельных трапеций определенного масштаба в проекции Гаусса в системе координат 1942 г. К примеру, размер трапеции двухсоттысячного масштаба составляет 10 минут по широте и 15 минут по долготе. Топографическая часть карты вместе с сеткой географических и прямоугольных координат должна представлять основную ситуацию на местности: населенные пункты, дороги, гидрографию и другие

значимые объекты местности. Нанесение на карту гравиметрических пунктов является строго обязательным. При этом точность нанесения должна быть 0,2 мм в масштабе карты.

На картах масштаба 1: 100 000 и мельче значения аномалий подписываются с точностью до 0,1 мГал, на крупномасштабных картах (за исключением горных районов) – с точностью 0,01 мГал.

В верхней части карты должны быть приведены: гравиметрическая система, вид аномалии силы тяжести, учтенные поправки при вычислении аномалий силы тяжести, принятая плотность промежуточного слоя, формула, по которой вычислена нормальная сила тяжести, номенклатура карты.

Если требуется учесть влияние рельефа территории, в аномалию Δg в обязательном порядке вводятся поправки, вычисленные с плотностью 2,67 г/см³ и реальной. При составлении гравиметрической карты плотностью промежуточного слоя 2,30 г/см³ поправка за рельеф не вводится. В случае если реальная плотность равна 2,30 г/см³, составляется дополнительная интерпретационная карта с введением поправок за рельеф.

Процессу создания гравиметрических карт предшествует этап анализа существующих карт и материалов отчетов по выполненным гравиметрическим съемкам на территории страны.

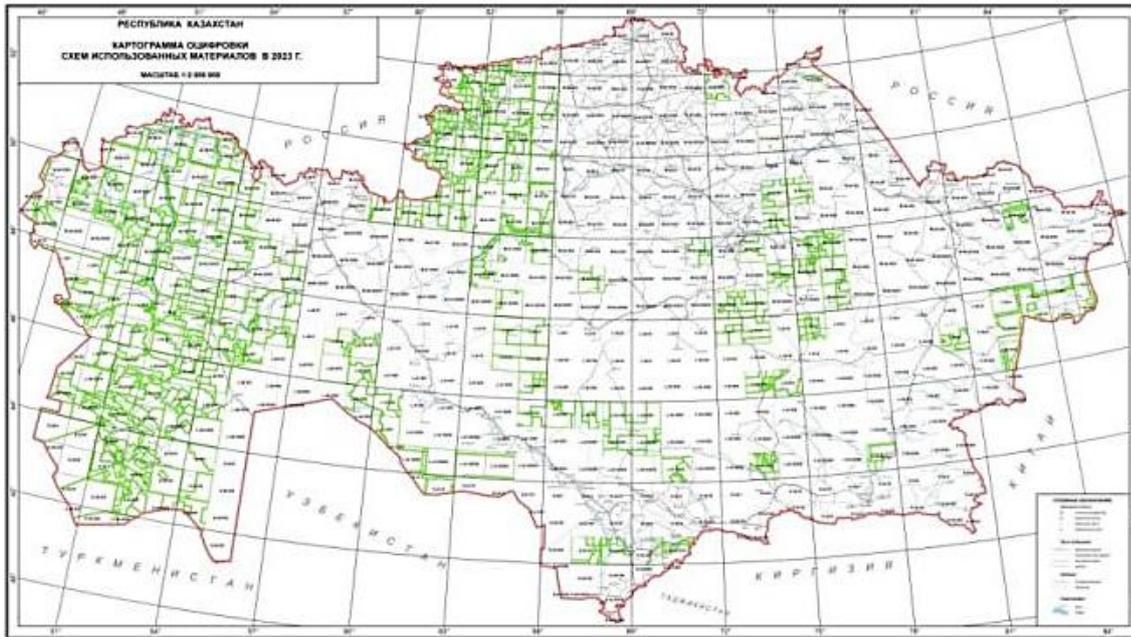
Результаты и их обсуждение. В рамках реализации Программы целевого финансирования по моделированию геоида для территории Казахстана принято решение о создании карт аномалий силы тяжести в редукциях Буге с плотностью промежуточного слоя $\rho_{пр.} = 2,67$ г/см³ в масштабе 1:200 000 в геоинформационной системе ArcGIS версии 10.x.

В настоящее время активно ведутся работы по пространственной привязке необходимых карт, для качественного выполнения которых разработаны технология геопространственной привязки карт в ПО ArcGIS и структура систематизированного хранения данных. Начата работа по оцифровке значений аномалий Буге при плотности промежуточного слоя 2,67 г/см³ и приложения к ним со значениями высот и поправок за рельеф на пунктах наблюдений. Подготовлена цифровая информация по 227 листам гравиметрических карт масштаба 1:200 000 из 591 листа по всей площади Казахстана. На рис. 4 показана картограмма результатов оцифровки схем использованных материалов.

Данные сведены в единую структурированную пространственную базу данных, которая позволит в последующем выполнять работы по составлению гравиметрической основы для определения модели геоида Казахстана. Все растровые и векторные данные приведены в единую систему координат WGS 1984 и Балтийскую систему высот. Каждый лист гравиметрической карты сопровождается информацией о схеме использованного гравиметрического материала (рис. 5). Также приводится информация об организации, выполнявшей гравиметрическую съемку, год съемки, точность и масштаб (табл. 1).

Совместная обработка всех видов гравиметрических измерений, полученных за последнее время, позволяет повысить детальность и точность составления гравиметрической карты нашей страны. Новая карта аномалий силы тяжести будет отражать реальные гравитационные характеристики, которые послужат полезной информацией для проведения геофизических и геологических исследований.

Применение современного программного обеспечения для хранения, обработки и визуализации данных позволяет повысить эффективность процесса построения гравиметрической карты, демонстрируя превосходные результаты при меньших затратах времени по сравнению с прежними методами.



 Контурсы отчетов, оцифрованных по схемам использованных материалов

Рисунок 4. Картограмма результатов оцифровки схем использованных материалов
Примечание - составлено автором



Рисунок 5. Пример оцифровки схемы использованных материалов
Примечание - составлено автором

Таблица 1. Пример заполнения атрибутивной таблицы слоя Used_material

Номер контура	Организация, выполнившая съемку	Авторы отчета	Год съемки	Масштаб съемки	Номер ТГФ	СКО высот, м	Метод определения высот
2330	Казахская аэрогеофизическая экспедиция КазНИИ минерального сырья	Волков А.И.	1972	1:50 000	5213	± 0.37	Геометрическое, тригонометрическое нивелирование
2526	Казахская аэрогеофизическая экспедиция КазНИИ минерального сырья	Волков А.И. Малетин В.И.	1972	1:50 000	4783	± 0.05	Геометрическое, тригонометрическое нивелирование

Примечание – составлено автором

Закключение. В настоящий момент создается новая карта гравиметрических аномалий на всю обширную территорию Казахстана, основанная на современных методах расчета и обновленных входных данных как гравиметрических, так и ЦММ. Мы предполагаем, что новая карта аномалий силы тяжести территории Казахстана будет иметь более высокое качество и лучшее отражение гравитационного поля. Таким образом, данная гравиметрическая карта послужит гравиметрической основой для построения модели геоида Казахстана, а также позволит решать ряд геологических, геофизических и геодинамических задач на более высоком уровне.

Согласно плану реализации программы целевого финансирования, создание новой гравиметрической карты Казахстана должно быть полностью завершено до конца 2025 г. Она будет составлена в соответствии с требованиями точности и детальности, в единой гравиметрической системе, с пространственной привязкой к государственной геодезической сети и должна послужить гравиметрической основой для создания региональной модели геоида на всю территорию Казахстана. Новая карта аномалий силы тяжести будет использована для исследования характера изменения гравитационного поля на территории страны, для изучения глубинного геологического строения недр, тектонических процессов на территории Казахстана и геодинамических процессов на месторождениях полезных ископаемых.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882366 «Разработка модели геоида Республики Казахстан как основа единой государственной системы координат и высот»).

Список литературы

- Al-Banna A. S., Al-Karadaghi S. S., Abdullah H. H. (2020). The Bouguer anomaly map of Iraq according to a new local theoretical gravity equation and its geological importance. *Iraqi Journal of Science*, vol. 61, no. 6, 1392-1400, <https://doi.org/10.24996/ijss.2020.61.6.17>.
- dos Santos R. P. Z. et al. (2022) New free-Air and Bouguer Gravity Anomalies Maps of Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, vol. 40, no. 6, 19-28, <https://doi.org/10.22564/brjg.v40i6.2195>.
- ICGEM International Centre for Global Earth Models (ICGEM). URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints/> (accessed 15 April 2024).

- Kim K. B., Yun H. S., Choi H. J. (2020). Accuracy evaluation of geoid heights in the national control points of south Korea using high-degree geopotential model. *Applied Sciences*, vol. 10, № 4, 1466, <https://doi.org/10.3390/app10041466>.
- Medved, K., Kuhar, M., Koler, B. (2019). Regional Gravimetric Survey of Central Slovenia. *Measurement*, vol. 136, 395–404, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.065>.
- Medved, K., Odalović, O., Koler, B. (2021). New Bouguer Anomaly Map for the Territory of the Slovenia. *Remote Sensing*, vol. 13, № 22, 4510, <https://doi.org/10.3390/rs13224510>.
- Shirazy A. et al. (2021). Geophysical study: Estimation of deposit depth using gravimetric data and Euler method (Jalalabad iron mine, kerman province of IRAN). *Open Journal of Geology*, vol. 11, no. 8, 340–355, <https://doi.org/10.4236/ojg.2021.118018>.
- Varga M., Stipčević J. (2021). Gravity anomaly models with geophysical interpretation of the Republic of Croatia, including Adriatic and Dinarides regions. *Geophysical journal international*, vol. 226, №3, 2189–2199, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab180>.
- Афонин К.Ф., Кинжигужинов С.М., Дрозд А.С. (2021). Анализ состояния государственной геодезической сети Республики Казахстан с учетом перспектив ее развития. Вестник СГУГиТ, Т. 26, № 1, 6-15. // Afonin K.F., Kinzhiguzhinov S.M., Drozd A.S. (2021). Analiz sostoyaniya gosudarstvennoy geodezicheskoi seti Respubliki Kazakhstan s uchetom perspektiv ee razvitiya. Vestnik SGUGiT, T. 26, № 1, 6-15.
- Голдобин Д.Н. (2019). Разработка методики комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным глобальных моделей геопотенциала. дис., 201. // Goldobin D.N. (2019). Razrabotka metodiki kompleksnogo opredeleniya kharakteristik gravitatsionnogo polya po dannym global'nykh modelei geopotentsiala. dis., 201.
- Исагалиева А.К., Исаев В.И., Истекова С.А. (2021). Методика интерпретации гравиметрических данных при построении геологической модели земной коры Прикаспийского региона. Вестник Казахстанско-Британского технического университета, Т. 17, № 2, 21-29. // Isagalieva A.K., Isaev V.I., Istekova S.A. (2021). Metodika interpretatsii gravimetricheskikh dannykh pri postroenii geologicheskoi modeli zemnoi kory Prikaspiiskogo regiona. Vestnik Kazakhstansko-Britanskogo tekhnicheskogo universiteta, T. 17, № 2, 21-29.
- Исагалиева А.К. (2023). Геофизические критерии геодинамического районирования нефтегазоносных районов юга Прикаспийской впадины. дис., 180. // Isagalieva A.K. (2023). Geofizicheskie kriterii geodinamicheskogo raionirovaniya neftegazonosnykh raionov yuga Prikaspiiskoi vpadiny. dis., 180.
- Непоклонов В.Б. (2020). Разработка предварительной модели геоида на территорию страны по спутниковым данным (на примере республики Кот-Дивуар). Автореф. дис., 24. // Nepoklonov V. B. (2020). Razrabotka predvaritel'noi modeli geoida na territoriyu strany po sputnikovym dannym (na primere respubliky Kot-D'ivuar). Avtoref. dis., 24.
- Кузнецов О.Ф., Куделина И.В., Леонтьева Т.В., Фатюнина М.В. (2020). Геофизические методы поисков месторождений полезных ископаемых [Электронный ресурс]: учеб. пособие, 106. // Kuznetsov O.F., Kudelina I.V., Leont'eva T.V., Fatyunina M.V. (2020). Geofizicheskie metody poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Elektronnyi resurs]: ucheb. posobie, 106.
- ТОО «НПЦ Геокен» (2023). Технический отчет о результатах выполненных работ по составлению гравиметрической основы для определения модели геоида, 1 - 25. // TOO «NPTs Geoken» (2023). Tekhnicheskii otchet o rezul'tatakh vypolnennykh rabot po sostavleniyu gravimetricheskoi osnovy dlya opredeleniya modeli geoida, 1 - 25.

Information about authors

Kassymkanova Kh.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. Baikunurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kenesbayeva A. – PhD, Senior Lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikunurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), E-mail: a.kenesbayeva@satbayev.university; ORCID ID:0000-0002-0869-5762, +77077517163

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. Baikunurov of the Satbayev University Almaty, Kazakhstan, E-mail: e.orynbassarova@satbayev.university, ORCID ID:0000-0001-6421-4698, +7 701 528 79 72

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

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