




Обзорная статья

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАЗАХСТАНЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Канат Б. Самарханов^{1,2}  PhD, Гузялия А. Мусина^{1*} , Марал Х. Шкиева¹ , Аян Б. Жумаканов¹ ,
Эльмира О. Орынбасарова³ 

¹ ТОО «GEOID», Астана, Казахстан; kanat.baurzhanuly@gmail.com (КБС), snezhinka200184@gmail.com (ГАМ), maral.shkiyeva@gmail.com (МХШ), A.Zhumakanov@geo-id.kz (АБЖ)

² Международный научный комплекс «Астана», Астана, Казахстан; kanat.baurzhanuly@gmail.com (КБС)

³ НАО «КазНИТУ им. К.Сатпаева», Алматы, Казахстан; Elmiraorynbassarova@gmail.com (ЭОО)

Автор корреспонденции: Гузялия А. Мусина, snezhinka200184@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гравиметрия
Казахстан
гравиметры
геодинамика
геоид
гравиметрические сети
квазигеоид
геодезия
геология
цифровая модель рельефа

АБСТРАКТ

В статье рассматривается современное состояние и применение гравиметрических съемок в Казахстане, с особым акцентом на использование спутниковой гравиметрии, в частности данных миссий GRACE и GRACE-FO, для мониторинга водных объектов и экологических изменений. Исследование подчеркивает значительную роль гравиметрических методов в изучении глубокого тектонического строения рудных регионов и создании модели геоида Казахстана.

Современный уровень развития науки дает широкие возможности применения алгоритмов искусственного интеллекта, включая машинное и глубокое обучение, а также проведения исследований с применением спутниковых данных. В данном научном исследовании представлены результаты анализа информации об изучении динамики водных ресурсов и ледниковых систем в Казахстане, где применен алгоритм машинного обучения с улучшением пространственного разрешения результатов мониторинга GRACE. Результаты исследований подтверждают, что применение спутниковых данных GRACE позволяют проводить мониторинговые исследования на больших территориях и могут быть использованы для получения данных о состоянии и динамике водных ресурсов и ледниковых систем.

В статье подчеркивается трансформирующее влияние миссии GRACE на науки о Земле, что способствует лучшим стратегиям смягчения последствий климатических изменений и эффективному управлению окружающей средой, что крайне важно для устойчивого развития Казахстана.

По статье:

Получено: 31.05.2024

Пересмотрено: 30.04.2025

Принято: 04.06.2025

Опубликовано: 30.06.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Гравиметрический метод традиционно занимает одно из ключевых мест в изучении фигуры Земли, её внутренних структур и динамических процессов. Данные, полученные в ходе гравиметрических исследований, широко применяются на различных этапах геологоразведочных работ и играют существенную роль в анализе геологического строения глубинных рудоконтролирующих структур.

Метод гравиметрии основан на изучении вариаций плотности горных пород, отражающих состав и состояние геологических комплексов. Плотностные характеристики глубинных пород представляют собой один из основных факторов, влияющих на интенсивность гравитационного поля Земли. Для решения локальных задач, таких как поиск и разведка месторождений полезных ископаемых, требуется высокая точность измерений на ограниченных территориях.

В геодезии гравиметрические данные необходимы для всей поверхности Земли. Они должны соответствовать метрологическим стандартам и обеспечивать единство измерений.

Наземные гравиметрические измерения, в частности, используются для уточнения высот геоида.

Последние десятилетия характеризуются заметным снижением объёмов гравиметрических съёмок из-за отсутствия государственных заказов и прекращением развития опорных гравиметрических сетей, что также демонстрирует дефицит материалов на данный период. Это, в свою очередь, привело к дефициту актуальных данных. Однако в последнее время возобновляется интерес к гравиметрическим исследованиям, в особенности в связи с активным развитием нефтедобывающей отрасли. Это способствует не только проведению геологоразведочных работ, но и созданию геодинамических полигонов для мониторинга движения земной поверхности.

Для цитирования:

Самарханов К., Мусина Г., Шкиева М., Жумаханов А., Орынбасарова Э.
Современное состояние гравиметрических исследований в Казахстане и возможности применения спутниковой гравиметрии для мониторинга водных объектов // Гидрометеорология и экология, 117 (2), 2025, 91-104.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современные гравиметрические съёмки на территории Республики Казахстан

Начало 2000 г. можно считать современным этапом развития гравиметрических работ. Гравиметрическая съёмка остаётся одним из основных методов для исследования недр Республики Казахстан.

В работе [1] представлены результаты исследований Жезказганского рудного района с целью выявления медного оруденения. Поиск месторождений меди осуществлялся с использованием разнообразных геофизических методов, в том числе и гравиметрического. Результаты интерпретации данных геофизических методов сопоставляются с информацией площадной сейсморазведки. Основная методологическая стратегия заключается в обнаружении дополнительных критериев для локализации месторождений меди на основе глубинной структуры, такой как структурно-тектонические, стратиграфические и литологические особенности геологических формаций.

В Жезказганском рудном районе проведено обширное гравиметрическое исследование, в ходе которого были получены данные о глубинном строении региона на различных уровнях, включая средне- и нижнепалеозойские горизонты. Территория района полностью охвачена гравиметрическими съёмками различного масштаба, с более детальными данными для рудных районов. Гравиметрические карты, полученные в результате исследования, отличаются высоким качеством и включают в себя информацию о региональных и локальных аномалиях гравитационного поля.

Области рудных месторождений изучены более подробно с помощью съёмок в масштабе 1:50 000 и выше. Построенные гравиметрические карты имеют высокое качество и дополняются картами трансформаций гравитационного поля, включая региональные и локальные составляющие, а также вертикальные и горизонтальные производные аномалии. Сечения изоаномал проведены с интервалом в 1 и 0,5 мГал.

Активно продолжается изучение Прикаспийской впадины. Например, в исследовании [2] описывается применение гравиметрических карт различного масштаба для изучения глубинного тектонического строения Прикаспийского региона Республики Казахстан. В результате цифрового преобразования растровых карт поля силы тяжести были получены карты трансформации гравитационного поля Прикаспийской впадины.

Данные гравиметрических исследований Прикаспийской впадины, полученные из карт силы тяжести масштаба 1:1500000, были преобразованы для изучения структуры земной коры. С использованием низкочастотной фильтрации были исключены локальные аномалии, что позволило выделить региональное гравитационное поле. Это поле, представленное на карте в виде изоаномалей, дало обширное представление о геологическом строении Прикаспийского региона Республики Казахстан на различных уровнях глубины.

Интеграция гравиметрических данных с геодинамической моделью впадины и её окружающих структур позволила установить их взаимную согласованность. Такой подход способствовал углублённому пониманию геологической и геодинамической эволюции региона, а также особенностей его современного строения.

Для детального выявления неоднородностей в строении литосферы на различных глубинных уровнях гравиметрические данные требуют дополнительной верификации. В

качестве независимых методов подтверждения могут быть использованы магнитотеллурическое зондирование, сейсмические и сейсмотомографические исследования, а также комплекс геологических методов.

Комплексный анализ гравиметрических, сейсмических и магнитотеллурических данных позволяет дифференцировать различные глубокозалегающие геологические структуры, включая магматические очаги, гранулиты основного состава, зоны приращения базальтовых слоёв, вершины мантийных плюмов и другие тектонические элементы.

Современные достижения гравиметрических съёмок также хорошо описаны в докладе [3], в котором обсуждается состояние геофизической изученности территории Республики Казахстан.

За период 1998...2011 годов проведены гравиразведочные работы на суше и акватории Казахстанского сектора Каспийского моря, изучены площади Федоровский блок, Лиман, Жанаталап Южный, Алибек Восточный, с. Нуржанов, Прорва Западная и прилегающие территории с применением гравиметров CG-3, CG-5. Плотность съёмки составила от 2...4 до 20 точек на 1 км², точность определения аномалий Буге 0,03...0,07 мГал, созданы гравиметрические карты сечением 0,25 мГал.

Реализованы гравиметрические работы с точностью 0,09 мГал и выше в транзитной и других труднодоступных зонах (сор Кайдак, транзитная зона Каспия, пойма р. Урал и другие), тем самым получены сплошные массивы гравитационного поля.

В период 2003...2004 годы на площади структур Кашаган, Курмангазы, Жамбыл выполнены морские гравиметрические работы на бортом гравиметром LaCoste & Romberg модели S. Погрешность измерения составила 0,2...0,29 мГал, по итогам работ построены карты аномалий силы тяжести с сечением 0,5...1 мГал, масштаба 1:100000.

В 2006...2009 годах на акватории перспективных участков Курмангазы, Жамбыл осуществлены гравии-магниторазведочные работы. В 2010...2011 годах проведена морская гравимагнитная съёмка в масштабе 1:100000 на севере и 1:200000 на юге Казахстанского сектора Каспийского моря, по данным которых создана единая гравиметрическая основа по всей акватории казахстанского сектора Каспийского моря.

В 2010...2011 годах компания «Геокен» выполнила морские съёмки в южной части казахского сектора Каспийского моря на борту судна «Аксиома» с использованием гравиметров LaCoste & Romberg, Чекан АМ и GT-2М [4].

В 2013 году гравиметрические исследования выполнялись на участке Захатсор. По материалам работ была сформирована матрица гравиметрического поля, создана инновационная цифровая карта пространственного распределения аномального гравитационного поля, проведены комплексные работы: электроразведка магниторазведка, гравиразведка на участке месторождений Бенкала и Южная Бенкала.

По результатам обзора и исследований, авторы рекомендуют объединение различных геолого-геофизических методов и использовании их в зависимости от эффективности и адаптированности к определенным поверхностным и глубинным геологическим условиям.

Начиная с 1998 года, большая часть гравиразведочных работ на суше, акватории Казахстанского сектора Каспийского моря, Аральского моря, Бухтарминского водохранилища выполнялись на отдельных участках по госзаказу или заказам недропользователей силами компании компанией ТОО «Геокен» (рисунок 1).

Помимо новых гравиметрических съёмок, развиваются также и методы обработки данных. Например, в работе [5], представлен метод трехмерной инверсии гравиметрических данных с использованием нетривиальной референтной модели по месторождению Восточный Жайрем. Данное исследование проведено по гравиметрическим и магнитометрическим съёмкам, выполненным в 2016 году компанией ТОО «Геокен». Всего было отработано 56 погонных км гравиметрической съёмки (1223 станции) в масштабе 1:10000 (межпрофильное расстояние 100 м). По участку Восточный Жайрем была построена трехмерная литологическая модель с привлечением ретроспективных данных о плотностных свойствах вмещающих пород и руд. На основе этих данных была построена трехмерная плотностная модель, которая в будущем использовалась для высокоточной фокусированной трехмерной инверсии гравиметрических данных.

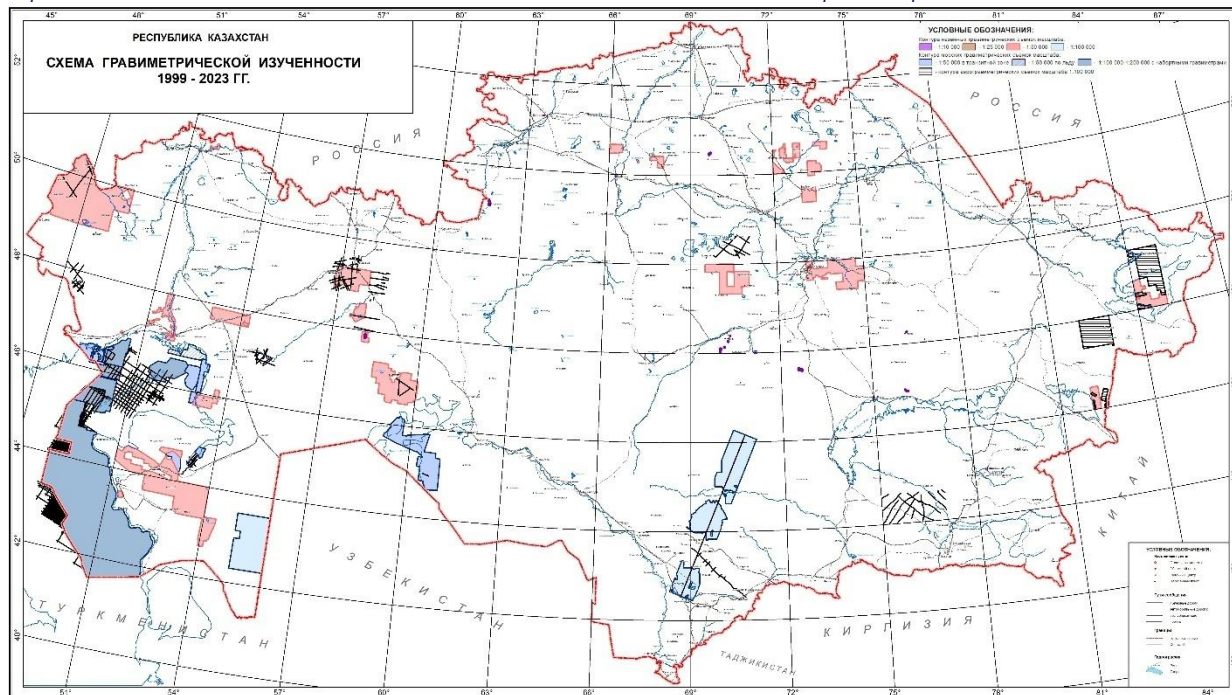


Рисунок 1. Схема гравиметрической изученности за период с 1999 по 2023 г.

В публикации [6] представлены результаты обработки данных гравитационного мониторинга одного из нефтегазоносных коллекторов Каспийской провинции на северо-западе Казахстана в разработанной ГИС-оболочке GravGIS. Данная система содержит ряд процедур таких как статистическая обработка и фильтрация измеренных данных, идентификация аномальных зон и создание атласа аномалий, который дополняется решением прямых гравиметрических задач. Для областей, признанных перспективными, инверсия вычисляется с применением одного из методов стохастической оптимизации - метода имитационного отжига. Для этого был разработан специальный вычислительный модуль GeoM.

Авторы отмечают, что система дает возможность объединить в одной оболочке данные первичного мониторинга силы тяжести в сочетании с данными нивелирования вертикальных перемещений земной коры в зоне наблюдения за нефтегазоносным пластом, а также данные тепловизионных, геохимических исследований и исследований скважин, а решения прямых задач гравиметрии сопоставимы по решениями, полученными с использованием других известных методов обработки гравитационных данных. Программный код системы защищен патентом Республики Казахстан.

Говоря о современном этапе развития гравиметрических исследований, нельзя не отметить важность спутниковой гравиметрии, особенно данных спутниковых миссий GRACE и GRACE-FO.

Спутниковая гравиметрия с временным разрешением, ярким примером которой является инновационная миссия Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), открыла новую эру в понимании процессов массопереноса внутри земной системы. Программа GRACE, начатая в 2002 году в сотрудничестве НАСА и Немецкого аэрокосмического центра (DLR), стала ключевым инструментом для изучения динамики распределения массы на нашей планете.

Трансформирующее влияние миссии GRACE на науку о Земле было подчеркнуто всесторонним обзором, проведенным Байроном Тэпли и его командой в 2019 году [7...8]. Их анализ, основанный на изучении 2000 рецензируемых исследований, подчеркивает, что миссия GRACE является незаменимым инструментом для мониторинга различных аспектов системы Земли. Эти аспекты включают круговорот земных вод, баланс массы ледниковых щитов и ледников, колебания уровня моря и изменения давления на дне океана. Более того, миссия GRACE выявила сложные взаимодействия и переходы, которые характеризуют процессы изменения климата [9].

Миссия GRACE-FO, запущенная 22 мая 2018 года, является совместным проектом НАСА и Немецкого исследовательского центра геонаук (GFZ) и продолжает работу миссии GRACE (2002...2017). Спутники-близнецы GRACE-FO, следуя друг за другом на расстоянии 220 км, отслеживают движение воды на Земле, мониторят изменения в запасах подземных вод, крупных озер и рек, влажности почвы, ледниковых щитов и уровня моря (рисунок 2). Эти данные помогают создать уникальную картину климата Земли и оказывают значительное влияние на общество. GRACE-FO также тестирует новую технологию для повышения точности измерений.

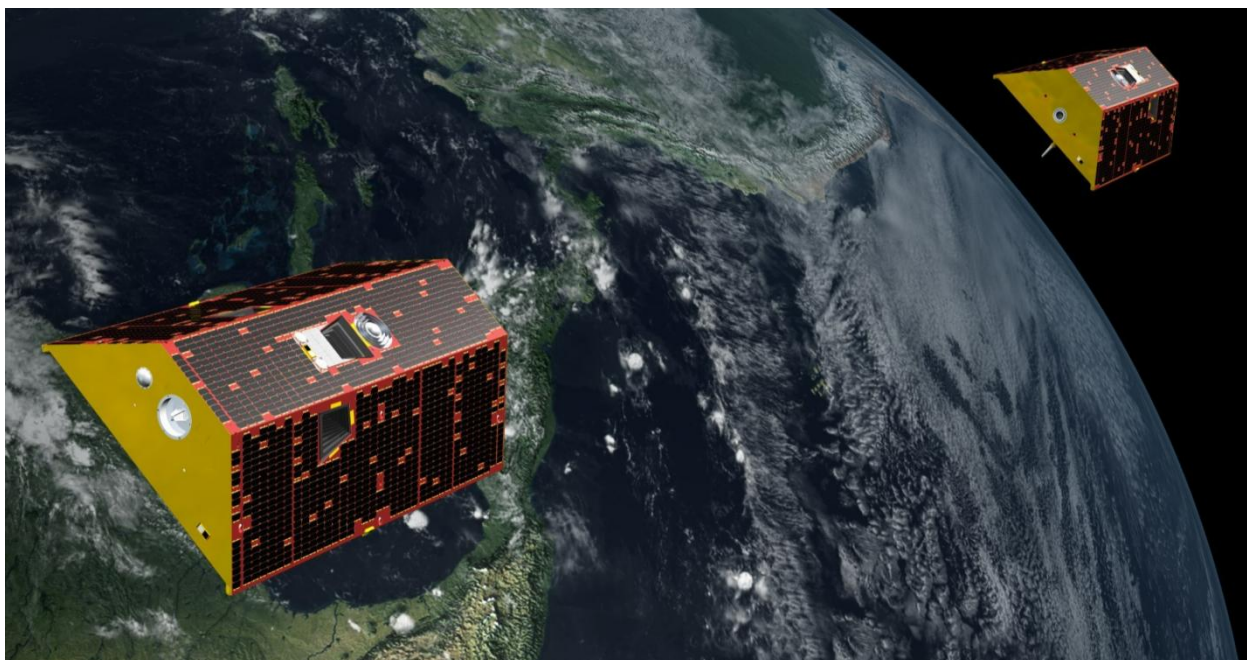


Рисунок 2. Иллюстрация GRACE-FO на орбите

Необработанные данные, полученные в рамках миссии GRACE-FO, представляют собой измерения вариаций расстояния между двумя спутниками-близнецами, движущимися по орбите вокруг Земли на расстоянии приблизительно 220 км (137 миль) друг от друга. В процессе движения спутники постоянно обмениваются микроволновыми сигналами, что позволяет высокоточно фиксировать изменения межспутникового расстояния. Области с повышенной гравитационной аномалией оказывают первичное воздействие на ведущий спутник, изменяя его траекторию, после чего аналогичное воздействие испытывает ведомый спутник при прохождении над той же аномальной областью. Эти изменения регистрируются системой высокоточного микроволнового зондирования. Дополнительно, акселерометры на борту спутников измеряют негравитационные ускорения, а GPS-приёмники определяют их точное положение. На основе этих данных формируются ежемесячные карты среднего гравитационного поля Земли, отражающие перераспределение массы, преимущественно связанное с динамикой водных ресурсов [10].

Важным аспектом исследований, проводимых в рамках миссии GRACE, является анализ взаимосвязи между запасами наземных вод и изменениями уровня мирового океана. Колебания запасов наземных вод оказывают значительное влияние на уровень моря, а данные GRACE способствуют расшифровке этой сложной взаимозависимости. Глубокое понимание данной динамики является критически важным для точной интерпретации глобальных тенденций изменения уровня моря, поскольку перераспределение наземных водных масс может как маскировать, так и усиливать долгосрочные тренды повышения уровня мирового океана [11].

Одним из наиболее выдающихся достижений миссии GRACE является её способность выявлять изменения в балансе массы ледников. Миссия обнаружила усиление подводного таяния и уменьшение поддержки фронтов ледников, что привело к увеличению темпов динамической разгрузки льда и истощению массы ледниковых регионов. Примечательно,

что временной ряд данных GRACE по Гренландии подтверждает независимые оценки, показывая, что 60 % общей потери массы связано с усилением таяния в ответ на тенденции потепления в Арктике, а оставшиеся 40 % - с усиленным динамическим оттоком льда [12].

Миссия GRACE внесла значительный вклад в изучение сложной взаимосвязи между запасами наземных вод и уровнем моря, сделав этот аспект одним из ключевых направлений современных исследований. Колебания объемов наземных вод оказывают существенное влияние на динамику уровня мирового океана, и данные GRACE сыграли важную роль в детальном анализе этой зависимости. Глубокое понимание данных процессов имеет критическое значение для точной интерпретации глобальных изменений уровня моря, поскольку перераспределение наземных водных масс может как маскировать, так и усиливать долгосрочные тенденции его повышения.

Изменение уровня моря является одним из важнейших индикаторов глобального климатического изменения и экологических трансформаций, обусловленных как природными процессами, так и антропогенным воздействием. Его социально-экономические последствия, включая влияние на проживание и хозяйственную деятельность населения, имеют фундаментальное значение. С момента запуска гравитационных спутников Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) в 2002 году стало возможным получать высокоточные измерения изменений массы мирового океана. Дополнительно, с 2005 года сеть поплавков Argo предоставляет ценные данные для оценки стерических изменений уровня моря. В своем исследовании [13] авторы проанализировали использование спутниковой альтиметрии, данных GRACE и Argo для изучения динамики глобального среднего уровня моря (GMSL).

Данные Argo собираются Океанографическим институтом Скриппса, IPRC и JAMSTEC, охватывая акваторию от 65° южной широты до 65° северной широты. Они предоставляют информацию о температуре и солёности водных масс от поверхности океана до глубины 2000 метров, что позволяет рассчитывать термостерические компоненты изменения уровня моря.

Анализ данных GRACE, Argo и спутниковой альтиметрии в целом демонстрирует согласованные тренды, однако, как отмечает [13], между отдельными измерениями могут наблюдаться расхождения. Для оценки неопределённостей результатов используются стандартные отклонения внутри ансамбля данных, что позволяет количественно характеризовать степень согласованности различных измерений.

Глобальные данные о среднем уровне моря собираются учреждениями, такими как AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) и CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). Эти данные корректируются с учетом различных факторов, включая ионосферную задержку, тропосферные эффекты, электромагнитные ошибки, приливы и ледниковую изостатическую корректировку (GIA). Карты аномалий уровня моря (DT-MSLA) предоставляют среднемесячные данные с 1993 по 2012 год [11].

Данные GRACE и GRACE-FO, предоставляемые такими учреждениями, как CSR (Center for Space Research), JPL (Jet Propulsion Laboratory) и GFZ (GeoForschungsZentrum), включают ежемесячные решения уровня 2 версии 06 в коэффициентах сферических гармоник (GSM), корректируемые с учетом GIA.

Подчеркивается важность интеграции спутниковой альтиметрии, наблюдений GRACE и данных Argo для изучения изменений GMSL (Global Mean Sea Level). Постоянный сбор данных и анализ необходимы для точного установления соответствия между системами GRACE и GRACE-FO. Появление спутниковой гравиметрии GRACE произвело революцию в наших возможностях отслеживать и понимать перемещения масс внутри системы Земли, углубив наше понимание климатических процессов и улучшив управление водными ресурсами.

Также в статье «Индикация природных опасностей с использованием изменений гравитационного поля Земли, наблюдаемых системой GRACE», сообщается, что в документе обсуждаются практические применения колебаний гравитационного поля Земли, измеренных спутниковой системой GRACE за 13-летний период. Спутниковые наблюдения

дают возможность контролировать региональные гидрологические режимы и прогнозировать стихийные бедствия. На вариации гравитационного поля влияют астрономические факторы и динамические процессы, отражающие изменения водных масс в атмосфере, океане и литосфере. В исследовании анализируются изменения вариаций гравитационного поля в различных регионах, таких как Аляска и Гренландия, и их последствия для изменения климата и природных явлений. В документе также освещается использование спутниковых данных для изучения изменений окружающей среды, таких как влияние на водные ресурсы в бассейне Верхней Волги и озере Байкал.

Исследование [14], проведенное коллективом авторов представляет всесторонний анализ различных глобальных оценок TWS, полученных с помощью GRACE и моделей GLDAS, включая межгодовую и сезонную изменчивость, распределения вероятности и пространственные особенности по шести континентам. Особое внимание уделено причинам расхождений между оценками GRACE и GLDAS, с целью повышения точности мониторинга глобальных водных изменений. Работа представляет собой первую попытку столь масштабного сравнения данных GRACE, предоставляя практическое руководство для ученых, политиков и специалистов, использующих гидрологическую информацию при анализе изменений водных ресурсов Земли.

Данные дистанционного зондирования, полученные в исследовательской работе [15] доказали свою высокую информативность и эффективность при решении различных глобальных и локальных гидрологических задач, особенно полезны при определении состояния водных объектов, параметризации характеристик речного стока для выявления спектра опасных гидрологических явлений, оценке влияния изменения климата по водным ресурсам и гидрологическим процессам. Дистанционное зондирование в гидрологии МГУ имени М.В. Ломоносова эффективно для оценки расходов воды, определения ее характеристик по характеристикам воды и изучения устьевых процессов. Анализ динамики дельты морского края и трансформации мутности от вершин дельты к устьевому взморью также важен. GRACE позволяет обеспечить баланс гидрологического цикла и невязку водного баланса, доказали свою высокую информативность и эффективность при решении различных глобальных и локальных гидрологических задач, особенно полезны при определении состояния водных объектов, параметризации характеристик речного стока для выявления спектра опасных гидрологических явлений, оценке влияния изменения климата по водным ресурсам и гидрологическим процессам. Дистанционное зондирование в гидрологии МГУ имени М.В. Ломоносова эффективно для оценки расходов воды, определения ее характеристик по характеристикам воды и изучения устьевых процессов. Анализ динамики дельты морского края и трансформации мутности от вершин дельты к устьевому взморью также важен. GRACE позволяет обеспечить баланс гидрологического цикла и невязку водного баланса.

Статья [16] представляет комплексный анализ изменений подземных вод (GWS) в китайской провинции Шаньдун за период с 2002 по 2021 год, основанный на спутниковых данных GRACE/GRACE-FO. Авторы исследуют пространственные и временные тренды истощения водных ресурсов, выявляя региональные различия в динамике потерь. В работе оценивается точность прогноза изменений GWS с использованием современных алгоритмов искусственного интеллекта — SVM, LSTM и SSA — где наилучшие результаты показала модель машин опорных векторов. Важным вкладом является использование данных глобальной гидрологической модели WaterGAP для валидации полученных результатов. Также отмечен временный рост запасов в 2020...2021 годах, требующий дальнейшего анализа. Работа демонстрирует потенциал спутниковых технологий и ИИ (искусственный интеллект) для мониторинга водных ресурсов в условиях изменения климата.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты применения гравиметрии в мировой практике

Прогнозируемые эксперименты с различными обучающими выборками (228, 204 и 180 месяцев) были проведены для анализа краткосрочного прогнозирования изменения GWS. Результаты показали, что модель SVM превзошла методы LSTM и SSA с точки зрения

коэффициентов корреляции со значениями 0,68, 0,75 и 0,56 для 228, 204 и 180 обучающих выборок соответственно. Результаты были сопоставимы с результатами ARMA [16].

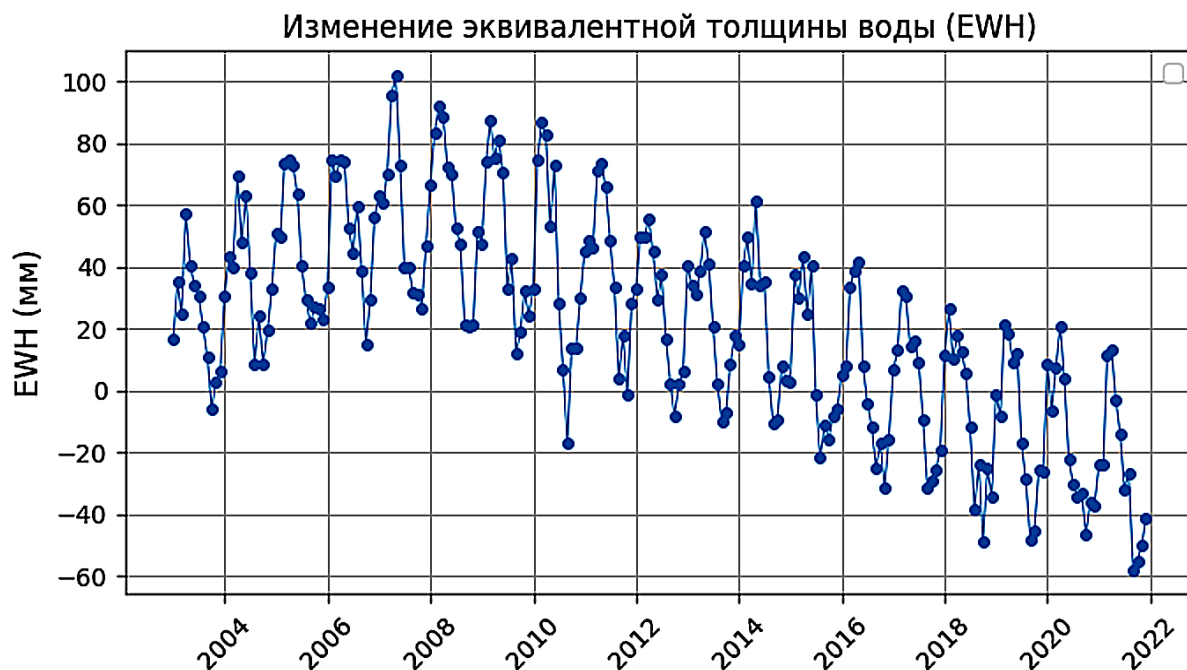


Рисунок 3. Изменение показателя GWS и его линейный тренд в провинции Шаньдун за последние 20 лет [16]

Анализ полученного графика показывает, что линейная скорость изменения запасов наземных вод (GWS) в период с 2003 по 2006 год составила $9,84 \pm 6,35$ мм/год. В последующий временной интервал, с 2007 по 2014 год, наблюдается значительная потеря запасов наземных вод по данным GRACE, характеризующаяся линейной скоростью изменения $-5,80 \pm 2,28$ мм/год. В дальнейшем темпы потерь несколько снизились: в период с 2015 по 2022 год линейная скорость составила $-5,39 \pm 3,65$ мм/год, что, возможно, связано с реализацией проекта по переброске водных ресурсов с юга на север. Однако, несмотря на данные изменения, тенденция снижения уровня запасов наземных вод по данным GRACE продолжалась до 2019 года. В период с 2020 по 2021 год был зафиксирован резкий рост значений GWS, причины которого требуют дальнейшего детального изучения.

Авторы исследования по изучению подземной воды использовали алгоритмы искусственного интеллекта, включая методы машинного и глубокого обучения, для обработки гидрометеорологических данных с целью повышения пространственного разрешения мониторинга GRACE [16]. В дальнейшем они планируют сосредоточиться на уточнении масштабирования данных GRACE для более детализированного анализа изменений запасов наземных вод.

Результаты применения гравиметрии в Казахстане

В научной статье «Selection of a calibration system for relative gravimeters and testing of the processing using the example of the Zhetygen calibration baseline in Kazakhstan» [17] рассмотрены современные методы калибровки относительных гравиметров и их применимость в условиях Казахстана. Авторы систематизируют как лабораторные, так и полевые методы определения калибровочной функции, анализируя преимущества и недостатки каждого подхода с учётом точности, доступности и диапазона измерений. Особое внимание уделяется наиболее применимому в полевых условиях методу — калибровке на гравиметрической базисной линии, а также представлены результаты многолетних измерений с использованием гравиметров Scintrex CG-5 на линии Жетыген. Выявлена необходимость создания вертикальной базисной линии нового типа в горной местности для расширения диапазона измерений и обеспечения соответствия международным стандартам.

Результаты исследования подтверждают, что калибровочная функция гравиметров может со временем изменяться, что требует регулярной проверки и корректировки шкального коэффициента. Анализ шести кампаний измерений за 2019...2023 годы показал не только различия в стабильности показаний отдельных приборов, но и зависимость калибровочных параметров от диапазона гравитационного поля. Авторы подчеркивают, что существующие в Казахстане калибровочные линии недостаточны по своему диапазону, что ограничивает точность при проведении высокоточных гравиметрических съемок в горных районах. Планируется создание новой базисной линии в районе Алматы с гравитационным перепадом более 300 мГал, что позволит существенно повысить качество калибровки современных приборов.

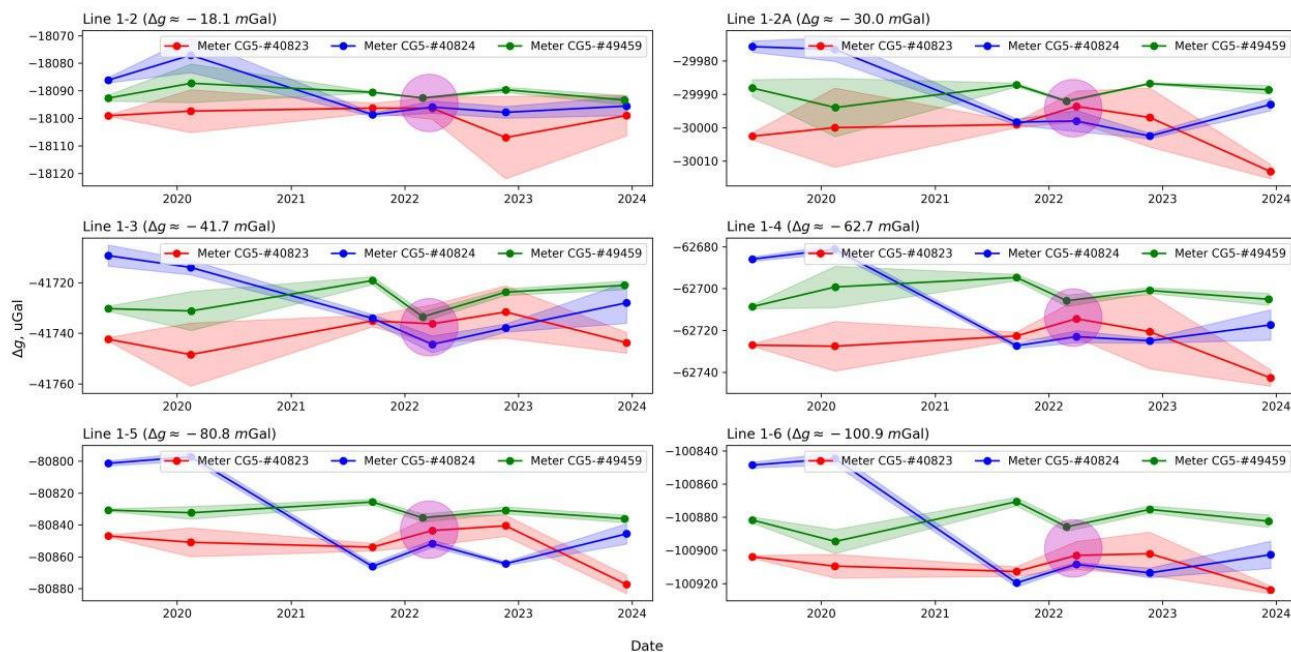


Рисунок 4. Изменения во времени значений измеренных разностей силы тяжести по каждому относительно гравиметру

В Прикаспийской впадине использование гравиметрических данных масштаба 1:1 500 000 в сочетании с методами спектральной фильтрации обеспечило построение модели гравитационного поля с выделением региональных аномалий, отражающих структуру земной коры [2]. Аналогичным образом, в Каспийском и Аральском регионах морские и наземные съёмки позволили сформировать гравиметрическую основу с высокой плотностью точек, обеспечившую необходимую точность интерпретации [4].

Отдельное направление — применение спутниковых миссий GRACE и GRACE-FO. Полученные данные позволили впервые в Казахстане осуществить мониторинг подземных вод и изменений в ледниковых системах, в том числе в Зайсанском бассейне и предгорьях Тянь-Шаня. Это имеет важное значение для оценки дефицита водных ресурсов и прогнозирования климатических рисков.

Таблица 1

Основные проекты гравиметрических исследований в Казахстане (1998...2023 гг.)

Регион исследования	Масштаб работ	Методы и оборудование	Основные результаты
Жезказганский рудный район	1:50 000	CG-5, инверсия, сейсмика	Глубинная модель, выявление рудоконтролирующих зон
Восточный Жайрем	1:10 000	3D инверсия, магнитометрия	Трёхмерная литологическая модель
Прикаспийская впадина	1:1 500 000	Цифровая фильтрация, буге-анализ	Региональные аномалии, тектоническое районирование
Каспийское море	1:100 000	LaCoste & Romberg, гравимагниторазведка	Единая гравиметрическая основа
Мониторинг ледников (GRACE)	~300 км	GRACE/GRACE-FO, ИИ-модели	Оценка массы ледников, тренды по подземным водам

Картографические материалы

С 1998 по 2023 гг. в Казахстане было создано значительное количество гравиметрических карт различного масштаба, отражающих как локальные, так и региональные особенности гравитационного поля. Эти карты широко применяются в инженерной геологии, гидрологии, геоэкологии и геодинатике.

Также примером является создание детальных карт по участкам «Бенкала» и «Южная Бенкала» с шагом изоаномал 0,25 мГал, дополненных трансформированными картами вертикальных с шагом изоаномал 0,25 мГал, дополненных трансформированными картами вертикальных производных. Для анализа структуры литосферы используются карты производных второго порядка, а также пространственные изоаномальные сечения, позволяющие визуализировать глубинные неоднородности [5].

В последние годы наблюдаются следующие ключевые тренды в области картографирования и интерпретации гравиметрических данных:

- переход от одномерной интерпретации к трёхмерному инверсному моделированию с использованием исторических плотностных данных;
- внедрение алгоритмов ИИ, включая машины опорных векторов и метод имитационного отжига;
- интеграция гравиметрии с геоинформационными системами, в частности GravGIS, для автоматизации обработки и визуализации;
- усиление фокуса на климатически обусловленные изменения (запасы влаги, динамика снежного покрова и ледников);

Таблица 2*Классификация гравиметрических карт и их прикладное значение*

Тип карты	Масштаб	Применение
Карты силы тяжести (аномалий Буге)	1:50 000...1:1 500 000	Геологическое районирование, поиск месторождений
Карты производных аномалий	1:50 000...1:100 000	Анализ глубинных структур
Карты трансформаций	Региональные	Моделирование тектонических блоков
Пространственные сечения	Локальные	Геодинатические и геоэкологические исследования

Таким образом, современная гравиметрия в Казахстане представляет собой комплексный, технологически насыщенный научный и прикладной инструмент, способный эффективно решать задачи геомониторинга, природопользования и ресурсной безопасности страны [5].

Преимущества и недостатки спутниковой гравиметрии.

Спутниковая гравиметрия, реализуемая в рамках миссий GRACE и GRACE-FO, открывает новые перспективы для гидрометеорологических исследований и мониторинга изменений массы земной поверхности на территории Казахстана. Учитывая значительные запасы подземных вод, а также обширные ледниковые массивы данного региона, данные, полученные с помощью спутников GRACE, обладают высокой значимостью для оценки динамики водных ресурсов и процессов, происходящих в ледниковых системах.

Особая актуальность данного направления исследований обусловлена тем, что водные ресурсы Казахстана играют ключевую роль в обеспечении функционирования сельского хозяйства и энергетического сектора. В этой связи использование современных методов обработки данных, в частности алгоритмов искусственного интеллекта, направленных на повышение пространственного разрешения гравиметрических измерений, позволит не только более точно отслеживать локальные изменения водного баланса, но и разрабатывать эффективные стратегии управления природными ресурсами. Это, в свою очередь, будет способствовать достижению устойчивого развития страны, обеспечивая рациональное использование и сохранение водных ресурсов в условиях изменяющегося климата.

Несмотря на значительные достижения в области спутниковой гравиметрии, применение данных миссий GRACE и GRACE-FO сопряжено с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при их интерпретации и использовании в научных и прикладных исследованиях.

Низкое пространственное разрешение: гравиметрические данные GRACE имеют ограниченное пространственное разрешение (порядка нескольких сотен километров), что

затрудняет их применение для локального анализа. Это особенно актуально для задач, требующих детального картирования изменений гравитационного поля, например, в геологоразведке или мониторинге небольших водных объектов.

- Погрешности интерпретации данных: восстановление распределения масс на поверхности и в недрах Земли на основе спутниковых измерений является сложной задачей, требующей использования дополнительных моделей и аппроксимаций. Это может приводить к ошибкам в интерпретации, особенно при оценке небольших или кратковременных изменений массы.

- Влияние негравитационных факторов: движение спутников подвержено воздействию негравитационных сил, таких как солнечная радиация и атмосферное сопротивление, что может вносить дополнительные неопределенности в измерения. Для минимизации этих эффектов применяются акселерометрические корректировки, однако остаточные ошибки могут сохраняться.

- Необходимость интеграции с другими методами: для повышения точности и детализации данных гравиметрии GRACE требует совместного использования с наземными гравиметрическими измерениями, сейсмическими и гидрометеорологическими наблюдениями. Без такой интеграции возможно искажение интерпретации пространственно-локализованных процессов.

- Ограниченный временной охват и перерывы в данных: Данные GRACE охватывают период с 2002 года, однако перерыв между завершением работы первой миссии (2017) и запуском GRACE-FO (2018) привел к разрыву временного ряда. Подобные пропуски могут усложнять анализ долгосрочных изменений в гравитационном поле Земли.

Спутниковая гравиметрия требует учета указанных ограничений и комплексного подхода, включающего использование дополнительных геофизических и геодезических данных.

Спутниковая гравиметрия обладает рядом значительных преимуществ в научных и прикладных областях. Она обеспечивает глобальный охват, позволяя измерять гравитационное поле Земли, включая труднодоступные регионы. Технология применяется для анализа динамических процессов, таких как изменения массы ледников, уровня океанов и подземных вод, что имеет значение для климатических исследований и управления водными ресурсами. Также она помогает прогнозировать природные катастрофы, включая землетрясения, наводнения и засухи. В геофизике и геодезии спутниковая гравиметрия используется для создания точных моделей гравитационного поля и повышения точности спутниковой навигации. Кроме того, ее применение приносит экономические выгоды, например, в добыче полезных ископаемых и сельском хозяйстве [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании представлен обзор современного состояния и применения гравиметрических съемок на территории Республики Казахстан, а также использование гравиметрических данных для определения модели геоида.

Развитие гравиметрических исследований в Казахстане представляет собой важное направление, обусловленное необходимостью детального изучения геодинамических процессов, мониторинга водных ресурсов и совершенствования методов геологоразведки. В связи с этим можно выделить несколько перспективных направлений, которые могут способствовать дальнейшему развитию данной области науки и ее практическому применению: применение спутниковой гравиметрии для мониторинга водных ресурсов; применение гравиметрических исследований в геологоразведке и добывающей промышленности; развитие гравиметрического мониторинга геодинамических процессов; применение алгоритмов машинного и глубокого обучения для повышения точности и пространственного разрешения гравиметрических данных; создание и модернизация гравиметрической сети Казахстана важно для задач геодезии, картографирования и контроля вертикальных движений земной коры.

Таким образом, развитие гравиметрических исследований в Казахстане требует комплексного подхода, включающего использование спутниковых и наземных технологий,

совершенствование методологии измерений, интеграцию с другими геофизическими методами и внедрение современных алгоритмов обработки данных. Реализация данных направлений позволит не только углубить фундаментальные исследования структуры Земли, но и обеспечить практическое применение гравиметрии в стратегически важных отраслях экономики, таких как водное хозяйство, горнодобывающая промышленность и сейсмология.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из шести источников: Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан; ТОО «ГеоКен» и ТОО «GEOID» данные наземных гравиметрических съемок; Открытые проекты NASA, GFZ и CSR; Отчеты по рудным районам Казахстана; Цифровые модели рельефа и геоиды; Программное обеспечение GravGIS; Международные спутниковые и океанографические архивы.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – КБС; управление данными – МХШ; формальный анализ – МХШ; методология – КБС, ГАМ, МХШ, АБЖ; руководство – КБС; визуализация – ГАМ; написание исходного текста – КБС, ГАМ, МХШ, АБЖ, ЭОО; написание и редактирование окончательного текста – КБС, ГАМ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов выражает благодарность Сермягину Роману Александровичу за оказание консультаций в процессе написания данного исследования. Мы также благодарны всем неназванным рецензентам за их конструктивные комментарии и предложения, которые помогли значительно улучшить качество данной публикации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках грантового финансирования по научным проектам «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот (BR21882366)»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдарбеков Ж. К., Истекова С. А., Гласс Х. Комплексные геофизические исследования при изучении геологического строения Жезказганского рудного района в Казахстане // Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2021», Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Геленджик, 2021. – С. 61.
2. Исагалиева А. К., Исаев В. И., Истекова С. А. Методика интерпретации гравиметрических данных при построении геологической модели земной коры Прикаспийского региона // Вестник Казахстанско-Британского Технического Университета. – 2021. – №17(2). – С. 21–29.
3. Истекова С. А., Жылкыбаева Г. А. Состояние геофизических исследований в Казахстане // Вестник Современной Науки. – 2015. – № 9–2. – С. 107–115.
4. Коврижных П.Н., Шагров Б.Б., Юрист С.Ш., Болотин Ю.В., Саурков Ж., Каренов Т. Морские съемки на Каспии гравиметрами GT-2M, Чекан АМ и LR: сравнение точности // Геология и Охрана Недр. – 2013. – №4. – С. 58–62.
5. Каминский В.Ф., Ефимов А.А., Кирмасов А.Б., Коврижных П.Н. Трехмерная инверсия гравиметрических данных с использованием нетривиальной референтной модели на месторождении Восточный Жайрем // Геоинформатика. – 2021. – №1. – С. 17–25.
6. Nazirova A. B., Dubovenko Y. I., Abdoldina F. N., Kuzminets M. P. Optimization of GIS modules for processing data of gravity monitoring of subsoil in the Republic of Kazakhstan. Geoinformatics, 2021, Vol. 1, pp. 1–6.
7. Tapley B. D., Watkins M. M., Flechtner F., Reigber C., Bettadpur S., Rodell M., Sasgen I., Famiglietti J. S., Landerer, F. W., Chambers D. P. Contributions of GRACE to understanding climate change. Nature Climate Change, 2019, Vol. 9(5), pp. 358–369.
8. Tapley B.D., Landerer F. W., Chambers D. P., Reager J. T., Gardner A. S., Save H., Ivins E. R., Swenson S. C., Boening C., Dahle C., Wiese D. N., Dolslaw H., Tamisiea M. E., Velicogna I. Contributions of GRACE to understanding climate change. In Nature Climate Change, 2019, Vol. 9, Issue 5, pp. 358–369. Nature Publishing Group. doi: 10.1038/s41558-019-0456-2
9. Hassan A. A., Jin S. Water cycle and climate signals in Africa observed by satellite gravimetry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, Vol. 17(1), pp. 012149.
10. Kornfeld, R., Arnold B., Gross M., Dahya N., Klipstein W. GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, pp. 56. doi: 10.2514/1.A34326
11. Chang L., Sun W. Consistency analysis of GRACE and GRACE-FO data in the study of global mean sea level change. Geodesy and Geodynamics, 2022, Vol. 13(4), pp. 321–326.
12. Flechtner F., Reigber C., Rummel, R., Balmino G. Satellite gravimetry: a review of its realization. Surveys in Geophysics, 2021, Vol. 42(5), pp. 1029–1074.
13. Chen L., He Q., Liu K., Li J., Jing C. Downscaling of GRACE-derived groundwater storage based on the random forest model. Remote Sensing, 2019, Vol. 11(24), pp. 2979.
14. Yang T., Wang C., Yu Z., Xu F. Characterization of spatio-temporal patterns for various GRACE-and GLDAS-born estimates for changes of global terrestrial water storage. Global and Planetary Change, 2013, Vol. 109, pp. 30–37.
15. Айбулатов Д., Зотов Л., Фролова Н., Чалов С. Современные возможности использования методов дистанционного зондирования для получения информации о водных объектах // Земля из Космоса: Наиболее Эффективные Решения. – 2015. – № 5. – С. 34–37.

16. Li W., Bao L., Yao G., Wang F., Guo Q., Zhu J., Zhu J., Wang Z., Bi J., Zhu C. The analysis on groundwater storage variations from GRACE/GRACE-FO in recent 20 years driven by influencing factors and prediction in Shandong Province, China. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14(1), pp. 5819.
17. Sermiagin R., Kemerbayev N., Kassymkanova K. K., Mussina G., Shkiyeva M., Kosarev N., Samarkhanov K., Batalova A., Rakhimzhanov A., Kalen Y. Selection of a calibration system for relative gravimeters and testing of the processing using the example of the Zhetysay calibration baseline in Kazakhstan. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2024. doi: 10.1007/s40328-024-00454-x
18. Кашеев Р. А. Современные методы спутниковой гравиметрии. – Казань: Казан. Ун-т, 2015.

REFERENCES

1. Aidarbekov Zh. K., Istekova S. A., Glass Kh. (2021). Kompleksnye geofizicheskie issledovaniya pri izuchenii geologicheskogo stroeniya Zhezkazganskogo rudnogo raiona v Kazakhstane [Integrated geophysical studies in studying the geological structure of the Zhezkazgan ore district in Kazakhstan]. *Materialy 17-j nauchno-prakticheskoy konferencii i vystavki «Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2021»*, Gelendzhik, 26–30 aprelja 2021 goda, Gelendzhik, 2021, pp. 61 [in Russian].
2. Isagalieva A. K., Isaev V. I., Istekova S. A. (2021). Metodika interpretacii gravimetricheskikh dannyh pri postroenii geologicheskoy modeli zemnoj kory Prikaspijskogo regiona [Methodology of interpretation of gravimetric data in building a geological model of the Earth's crust of the Caspian region]. *Vestnik Kazakhstansko-Britanskogo Tekhnicheskogo Universiteta*, Vol. 17(2), pp. 21–29 [in Russian].
3. Istekova S. A., Zhylykbaeva G. A. (2015). Sostoyanie geofizicheskikh issledovaniy v Kazakhstane [State of geophysical research in Kazakhstan]. *Vestnik Sovremennoi Nauki*, Vol. 9–2, pp. 107–115 [in Russian].
4. Kovrizhnyh P.N., Shagrov B.B., Jurist S.Sh., Bolotin Ju.V., Saurkov Zh., Karenov T. (2013). Morskije semki na Kaspii gravimetrami GT-2M, Chekan AM i LR: sravnenie tochnosti [Marine surveys in the Caspian Sea by GT-2M, Chekan AM and LR gravimeters: comparison of accuracy]. *Geologija i Ohrana Nedr*, Vol. 4, pp. 58–62 [in Russian].
5. Kaminskij V.F., Efimov A.A., Kirmasov A.B., Kovrizhnyh P.N. (2021). Trehmernaja inversija gravimetricheskikh dannyh s ispol'zovaniem netrivial'noj referentnoj modeli na mestorozhdenii Vostochnyj Zhajrem [Three-dimensional inversion of gravimetric data using non-trivial reference model in the East Zhajrem field]. *Geoinformatika*, Vol. 1, pp. 17–25 [in Russian].
6. Nazirova A. B., Dubovenko Y. I., Abdoldina F. N., Kuzminets M. P. (2021). Optimization of GIS modules for processing data of gravity monitoring of subsoil in the Republic of Kazakhstan. *Geoinformatics*, Vol. 1, pp. 1–6.
7. Tapley B. D., Watkins M. M., Flechtner F., Reigber C., Bettadpur S., Rodell M., Sasgen I., Famiglietti J. S., Landerer F. W., Chambers D. P. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 9(5), pp. 358–369.
8. Tapley B.D., Landerer F. W., Chambers D. P., Reager J. T., Gardner A. S., Save H., Ivins E. R., Swenson S. C., Boening C., Dahle C., Wiese D. N., Dolslaw H., Tamisiea M. E., Velicogna I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. In *Nature Climate Change*, Vol. 9, Issue 5, pp. 358–369. Nature Publishing Group. doi: 10.1038/s41558-019-0456-2
9. Hassan A. A., Jin S. (2014). Water cycle and climate signals in Africa observed by satellite gravimetry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 17(1), pp. 012149.
10. Kornfeld R., Arnold B., Gross M., Dahya N., Klipstein W. (2019). GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission. *Journal of Spacecraft and Rockets*, pp. 56. doi: 10.2514/1.A34326
11. Chang L., Sun W. (2022). Consistency analysis of GRACE and GRACE-FO data in the study of global mean sea level change. *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 13(4), pp. 321–326.
12. Flechtner F., Reigber C., Rummel R., Balmino G. (2021). Satellite gravimetry: a review of its realization. *Surveys in Geophysics*, Vol. 42(5), pp. 1029–1074.
13. Chen L., He Q., Liu K., Li J., Jing, C. (2019). Downscaling of GRACE-derived groundwater storage based on the random forest model. *Remote Sensing*, Vol. 11(24), pp. 2979.
14. Yang T., Wang C., Yu Z., Xu F. (2013). Characterization of spatio-temporal patterns for various GRACE-and GLDAS-born estimates for changes of global terrestrial water storage. *Global and Planetary Change*, Vol. 109, pp. 30–37.
15. Ajbulatov D., Zotov L., Frolova N., Chalov S. (2015). Sovremennye vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov distancionnogo zondirovaniya dlja poluchenija informacii o vodnyh obektah [Modern possibilities of using remote sensing methods to obtain information about water bodies]. *Zemlja iz Kosmosa: Naibolee Jefferktivnye Reshenija*, Vol. S, pp. 34–37 [in Russian].
16. Li W., Bao L., Yao G., Wang F., Guo Q., Zhu J., Zhu J., Wang Z., Bi J., Zhu, C. (2024). The analysis on groundwater storage variations from GRACE/GRACE-FO in recent 20 years driven by influencing factors and prediction in Shandong Province, China. *Scientific Reports*, Vol. 14(1), pp. 5819.
17. Sermiagin R., Kemerbayev N., Kassymkanova K. K., Mussina G., Shkiyeva M., Kosarev N., Samarkhanov K., Batalova A., Rakhimzhanov A., Kalen Y. (2024). Selection of a calibration system for relative gravimeters and testing of the processing using the example of the Zhetysay calibration baseline in Kazakhstan. *Acta Geodaetica et Geophysica*. doi: 10.1007/s40328-024-00454-x
18. Kashheev R. A. Sovremennye metody sputnikovoj gravimetrii [Modern methods of satellite gravimetry]. – Kазань: Kазан. Un-t, 2015 [in Russian].

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ГРАВИМЕТРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРДІҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ СУ ОБЪЕКТІЛЕРІН МОНИТОРИНГЛЕУ ҮШІН СПУТНИКТІК ГРАВИМЕТРИЯНЫ ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Канат Б. Самарханов^{1,2} PhD, Гузьялия А. Мусина^{1*}, Марал Х. Шкиева¹, Аян Б. Жумаканов¹, Эльмира О. Орынбасарова³

¹ ЖШС «GEOID», Астана, Қазақстан; kanat.baurzhanuly@gmail.com, snezhinka200184@gmail.com, maral.shkiyeva@gmail.com, A.Zhumakanov@geo-id.kz

² «Астана» халықаралық ғылыми кешені, Астана, Қазақстан; kanat.baurzhanuly@gmail.com

³ Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан; Elmiraorynbassarova@gmail.com

Автор корреспонденциясы: Гузьялия А. Мусина, snezhinka200184@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

гравиметрия
Қазақстан
гравиметрлер
геодинамика
геоид
гравиметриялық желілер
квазигеоид
геодезия
геология
рельефтің цифрлық моделі

Мақала жайында:

Жіберілді: 31.05.2024
Қайта қаралды: 30.04.2025
Қабылданды: 04.06.2025
Жарияланды: 30.06.2025

АБСТРАКТ

Мақалада Қазақстандағы гравиметриялық түсірілімдердің қазіргі жағдайы мен қолданылуы қарастырылады, әсіресе су айдындары мен экологиялық өзгерістерді мониторингтеу үшін GRACE және GRACE-FO миссияларының деректерін пайдалануға ерекше назар аударылады. Зерттеу гравиметриялық әдістердің кен орындары орналасқан аймақтардың терең тектоникалық құрылымын зерттеудегі және Қазақстан геоиды моделін жасаудағы маңызды рөлін атап өтеді.

Қазіргі заманғы ғылым деңгейі жасанды интеллект алгоритмдерін, соның ішінде машиналық және тереңдетілген оқытуды қолдануға, сондай-ақ спутниктік деректерді пайдалана отырып зерттеулер жүргізуге кең мүмкіндіктер береді. Бұл ғылыми зерттеуде Қазақстандағы су ресурстары мен мұздық жүйелерінің динамикасын зерттеу бойынша ақпаратты талдау нәтижелері ұсынылған, онда GRACE мониторингінің нәтижелерінің кеңістіктік ажыратымдылығын жақсартатын машиналық оқыту алгоритмі қолданылды. Зерттеу нәтижелері спутниктік GRACE деректерін кең ауқымды аумақтарда мониторинг жүргізу үшін пайдалануға болатынын және су ресурстары мен мұздық жүйелерінің жағдайы мен динамикасы туралы мәліметтер алуға мүмкіндік беретінін растайды.

Мақалада GRACE миссиясының Жер туралы ғылымдарға трансформациялық әсері атап өтіледі, бұл климаттық өзгерістердің салдарын азайту стратегияларын жақсартуға және қоршаған ортаны тиімді басқаруға ықпал етеді, ал бұл Қазақстанның тұрақты дамуы үшін аса маңызды.

THE CURRENT STATE OF GRAVIMETRIC RESEARCH IN KAZAKHSTAN AND THE POSSIBILITY OF USING SATELLITE GRAVIMETRY FOR MONITORING WATER BODIES

Kanat Samarkhanov^{1,2} PhD, Guzyaliya Mussina^{1*}, Maral Shkieva¹, Ayan Zhumakanov¹, Elmira Orynbassarova³

¹ LLP «GEOID», Astana, Kazakhstan; kanat.baurzhanuly@gmail.com, snezhinka200184@gmail.com, maral.shkiyeva@gmail.com, A.Zhumakanov@geo-id.kz

² «Astana» International Scientific Complex, Astana, Kazakhstan; kanat.baurzhanuly@gmail.com

³ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; Elmiraorynbassarova@gmail.com

Corresponding author: Guzyaliya Mussina, snezhinka200184@gmail.com

KEY WORDS

gravimetry
Kazakhstan
gravimeters
geodynamics
geoid
gravimetric networks
quasi-geoid
geodesy
geology
digital relief model

About article:

Received: 31.05.2024
Revised: 30.04.2025
Accepted: 04.06.2025
Published: 30.06.2025

ABSTRACT

The article examines the current state and application of gravimetric surveys in Kazakhstan, with a particular focus on the use of satellite gravimetry, specifically data from the GRACE and GRACE-FO missions, for monitoring water bodies and environmental changes. The study highlights the significant role of gravimetric methods in investigating the deep tectonic structure of ore-bearing regions and in developing a geoid model of Kazakhstan.

The modern level of scientific development provides broad opportunities for applying artificial intelligence algorithms, including machine learning and deep learning, as well as conducting research using satellite data. This scientific study presents the results of an analysis of information on the dynamics of water resources and glacial systems in Kazakhstan, where a machine learning algorithm was applied to improve the spatial resolution of GRACE monitoring results. The research findings confirm that the use of GRACE satellite data allows for large-scale monitoring studies and can be utilized to obtain data on the state and dynamics of water resources and glacial systems.

The article emphasizes the transformative impact of the GRACE mission on Earth sciences, contributing to improved strategies for mitigating the effects of climate change and effective environmental management, which is crucial for the sustainable development of Kazakhstan.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).