

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_19

MPNТИ 36.16.35, 37.31.23

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ВЫСОТЫ ГЕОИДА В ТЯНЬ-ШАНЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ GRACE-FO

GRACE-FO ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ТЯНЬ-ШАНЬ ӨңІРІНДЕГІ ГЕОИД БИІКТІГІНІҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ ВАРИАЦИЯЛАРЫН ТАЛДАУ

SPATIO-TEMPORAL GEOID HEIGHT VARIATIONS IN THE TIEN SHAN REGION DERIVED FROM GRACE-FO DATA

Д.А. Шоганбекова ^{1,2}, А.С. Уразалиев ^{1*}, Н.Н. Жақсығұл ^{1,2}, М.С. Қожахметов ^{1,3}¹Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан²Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан³Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Уразалиев Асет Сейсенбекович, e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz

Ключевые слова:

геоид, вариация,
GRACE-FO, сейсмическая
активность,
гравитационное поле,
аномалия,
перераспределение масс.

АННОТАЦИЯ

Исследована пространственно-временная изменчивость высоты геоида в пределах Тянь-Шаньской орогенической системы по данным спутниковой миссии GRACE-FO за 2019–2025 гг. В основу анализа положены ежемесячные глобальные геопотенциальные модели GFZ RL06.3, обработанные с учетом замены коэффициентов низких степеней, применения декорреляционного фильтра DDK3 и последующей сезонно-трендовой декомпозиции временных рядов. Установлено, что вариации высоты геоида в регионе формируются под совместным влиянием гидрологических, криосферных и геодинамических процессов. Сезонная компонента характеризуется устойчивой внутригодовой повторяемостью со средней амплитудой около 3,6 мм: положительные экстремумы приурочены к весеннему периоду, отрицательные — к осеннему. На этом фоне выявлен долговременный отрицательный тренд, наиболее выраженный в высокогорных районах Тянь-Шаня, где скорость снижения достигает 0,53 мм/год. Пространственно-временная согласованность аномалий 2024 года с усилением региональной сейсмичности позволяет предполагать наличие тектонической составляющей в наблюдаемом сигнале. Полученные результаты подтверждают потенциал спутниковой гравиметрии как инструмента регионального мониторинга современного перераспределения масс и геодинамической активности.

Түйінді сөздер:

геоид, вариация, GRACE-FO, сейсмикалық белсенділік, гравитациялық өріс,

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада 2019-2025 жж. аралығындағы GRACE-FO спутниктік миссиясының деректері негізінде Тянь-Шань орогендік жүйесі шегіндегі геоид биіктігінің кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігі зерттелді. Талдау үшін GFZ RL06.3 ай сайынғы жаһандық геопотенциалдық модель-



© 2026 Д.А. Шоганбекова, А.С. Уразалиев, Н.Н. Жақсығұл, М.С. Қожахметов

Данная работа распространяется на условиях лицензии

Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

аномалия, массаның қайта бөлінуі.

дері пайдаланылып, төменгі дәрежелі коэффициенттерді алмастыру, DDK3 декорреляциялық сүзгісін қолдану және уақыттық қатарларды маусымдық-трендтік декомпозициялау орындалды. Зерттеу нәтижелері өңірдегі геоид биіктігінің вариациялары гидрологиялық, криосфералық және геодинамикалық процестердің бірлескен әсерімен қалыптасатынын көрсетті. Маусымдық құраушы орташа амплитудасы шамамен 3,6 мм болатын тұрақты жылышылық қайталанушылықпен сипатталады: оң экстремумдар көктемде, ал теріс экстремумдар күзде байқалады. Осы фон аясында ұзақмерзімді теріс тренд анықталды, оның ең жоғары қарқыны Тянь-Шаньның биік таулы аудандарында байқалып, жылына 0,53 мм-ге дейін жетеді. 2024 жылғы аномалиялардың аймақтық сейсмикалық белсенділіктің күшеюімен кеңістіктік-уақыттық сәйкестігі бақыланатын сигналда тектоникалық құрамдас болуы мүмкін екенін көрсетеді. Алынған нәтижелер спутниктік гравиметрияның массаның қазіргі қайта бөлінуін және геодинамикалық белсенділікті аймақтық мониторингтеудің тиімді құралы екенін дәлелдейді.

keywords:

geoid, variation, GRACE-FO, seismic activity, gravitational field, anomaly, mass redistribution.

ABSTRACT

This study investigates the spatio-temporal variability of geoid height within the Tien Shan orogenic system using GRACE-FO satellite data for the period 2019–2025. The analysis is based on monthly GFZ RL06.3 global geopotential models processed with low-degree coefficient replacement, DDK3 decorrelation filtering, and subsequent seasonal-trend decomposition of the time series. The results show that geoid height variations in the region are controlled by the combined influence of hydrological, cryospheric, and geodynamic processes. The seasonal component exhibits stable intra-annual recurrence with an average amplitude of about 3.6 mm, with positive extrema occurring in spring and negative extrema in autumn. Against this background, a long-term negative trend was identified, most pronounced in the high-mountain areas of the Tien Shan, where the rate of decrease reaches 0.53 mm/yr. The spatio-temporal consistency between the 2024 anomalies and the increase in regional seismic activity suggests a possible tectonic contribution to the observed signal. The obtained results confirm the potential of satellite gravimetry as an effective tool for regional monitoring of contemporary mass redistribution and geodynamic activity.

ВВЕДЕНИЕ

Точное моделирование геоида – эквипотенциальной поверхности земного гравитационного поля — имеет важное значение для современной геодезии и смежных наук о Земле. Геоид используется как физическая опорная поверхность для определения ортометрических высот и обеспечивает связь между эллипсоидальными высотами, получаемыми по ГНСС-наблюдениям, и высотами, отсчитываемыми относительно гравитационного поля Земли. В геофизике, геодинамике и океанологии модели геоида также применяются для исследования пространственного распределения масс и связанных с ним изменений гравитационного поля (Torge et al., 2023; Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006).

Точность моделирования геоида зависит от качества и пространственной плотности гравиметрических наблюдений, точности цифровых моделей рельефа и глубин, степени развития глобальных моделей гравитационного поля, используемых вычислительных алгоритмов и согласованности систем отсчета. Развитие вычислительных методов и

технологий обработки данных позволило существенно повысить точность статических моделей геоида (Sansò & Sideris, 2013). Вместе с тем Земля является динамической системой, поэтому гравитационное поле изменяется во времени вследствие перераспределения масс внутри Земли и на ее поверхности. К основным источникам таких изменений относятся гидрологические и криосферные процессы, атмосферные и океанические вариации, а также деформации литосферы. Перераспределение масс вызывает изменения гравитационного потенциала и, следовательно, временные вариации высоты геоида (Godah et al., 2017a; Szelachowska et al., 2022).

Существенный прогресс в изучении временной изменчивости гравитационного поля обеспечили спутниковые гравиметрические миссии GRACE, GRACE-FO, CHAMP и GOCE (Tapley et al., 2019; Landerer et al., 2020). Их данные сделали возможным переход от статических моделей геоида к динамическому анализу перераспределения масс в гидросфере, криосфере и литосфере, а также к оценке связанных с этим деформаций земной коры (Chen et al., 2022).

Исследования показывают, что амплитуда временных вариаций высоты геоида существенно зависит от природных условий региона. В областях с интенсивным гидрологическим циклом она может достигать нескольких десятков миллиметров, тогда как в более устойчивых районах ограничивается несколькими миллиметрами (Godah et al., 2020; Zhang et al., 2024). В тектонически активных горных областях дополнительный вклад в наблюдаемый интегральный сигнал могут вносить деформационные процессы в литосфере (Molnar & Tapponnier, 1978).

Особый интерес представляет юго-восточная часть Казахстана и сопредельные территории Центральной Азии, расположенные в пределах активной орогенической системы Тянь-Шаня. Регион характеризуется высокой сейсмичностью и интенсивной современной деформацией земной коры, связанной с взаимодействием Индийской и Евразийской плит (Abdrakhmatov et al., 1996). В таких условиях временные изменения гравитационного поля могут формироваться под совместным воздействием поверхностного перераспределения водных и ледниковых масс и процессов деформации литосферы.

При интерпретации пространственно-временных вариаций гравитационного поля необходимо учитывать региональный характер как поверхностного перераспределения масс, так и геодинамических процессов. Основные структуры Тянь-Шаньской орогенической системы выходят за административные границы отдельных государств, поэтому исследуемую территорию целесообразно рассматривать как единую региональную систему.

Несмотря на развитие спутниковой гравиметрии, пространственно-временные вариации высоты геоида в пределах Тянь-Шаня и сопредельных районов Центральной Азии остаются изученными недостаточно, особенно с точки зрения их сопоставления с современной сейсмической активностью. Цель настоящего исследования состоит в количественной оценке изменений высоты геоида в 2019–2025 гг. по данным GRACE-FO, выделении сезонной и трендовой составляющих и анализе пространственно-временной согласованности выявленных аномалий с сейсмичностью региона.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе пространственно-временных вариаций высоты геоида в тектонически активном регионе Тянь-Шаня по данным GRACE-FO и их сопоставлении с каталогом региональной сейсмичности. При этом наблюдаемая согласованность рассматривается как основание для оценки возможной геодинамической составляющей сигнала, но не как доказательство причинно-следственной связи.

Полученные результаты могут быть полезны для развития региональных исследований временной изменчивости гравитационного поля и для последующего

комплексного геодинамического анализа с привлечением независимых наземных и спутниковых наблюдений.

Результаты также представляют интерес для исследований, связанных с современными высотными системами и мониторингом временных изменений гравитационного поля, включая задачи, актуальные для реализации Международной высотной референтной системы (IHRF, International Height Reference Frame). Дальнейшее развитие работы предполагает интеграцию спутниковой гравиметрии с ГНСС, гидрологическими, климатическими и гляциологическими данными.

ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область исследования охватывает юг и юго-восток Казахстана, а также прилегающие районы Кыргызстана и западную часть Китая. Пространственные границы находятся в диапазоне от 39° до 51,5° северной широты и от 64,5° до 87,5° восточной долготы, что позволяет охватить основные структуры Тянь-Шаньской орогенической системы (рисунок 1). Выбор границ обусловлен не административным делением, а геодинамической целостностью территории, что важно при анализе региональных изменений гравитационного поля и высоты геоида.

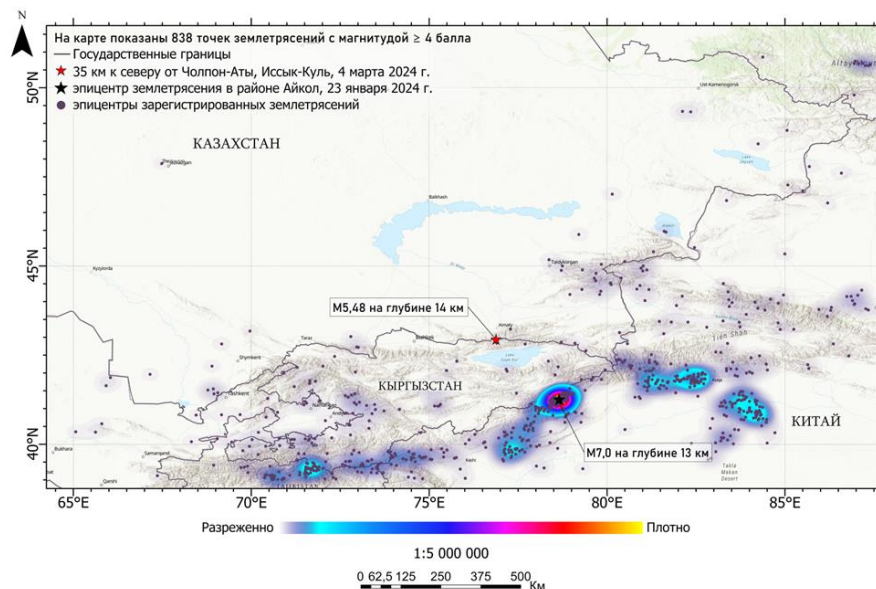


Рисунок 1. Карта исследуемой территории

Примечание – составлено авторами

Район исследования расположен в пределах активной орогенической системы Тянь-Шаня и характеризуется сложным рельефом, включающим высокогорные хребты, предгорные зоны и межгорные котловины. В южной и юго-восточной частях территории преобладают горные структуры Тянь-Шаня, тогда как к северу рельеф постепенно переходит в равнинные формы. Регион характеризуется современными горизонтальными и вертикальными деформациями земной коры, установленными геодезическими и геофизическими наблюдениями.

Тектоническая активность региона обусловлена продолжающимся взаимодействием Индийской и Евразийской плит. Связанные с этим деформации земной коры и литосферы могут сопровождаться перераспределением масс и изменениями гравитационного поля (Abdrakhmatov et al., 1996). Вместе с тем выделение такого вклада по данным GRACE-FO требует учета других источников временной изменчивости поля.

Существенный вклад в региональное перераспределение масс вносят гидрологические и криосферные процессы. В Тянь-Шане наблюдаются изменения водного баланса, связанные с деградацией ледников и вариациями поверхностных и подземных вод [Farinotti et al., 2015]. Эти процессы непосредственно влияют на временную изменчивость гравитационного поля и должны учитываться при интерпретации вариаций высоты геоида.

Основные тектонические элементы Тянь-Шаня не ограничиваются государственными границами. Зоны активной деформации и разломные структуры простираются по всей территории Казахстана, Кыргызстана и западных регионов Китая. По этой причине для интерпретации аномалий геоида необходимо рассматривать данный регион как единую систему с расширенными пространственными границами.

В последние годы в рассматриваемом регионе отмечались как значительные гидрометеорологические изменения, так и периоды повышенной сейсмической активности. В таких условиях вариации высоты геоида могут отражать наложение нескольких процессов перераспределения масс, поэтому их интерпретация требует осторожного сопоставления с независимыми данными (Van Dijk et al., 2025).

Регион характеризуется высокой геодинамической активностью, однако подробные исследования связи между тектоническими структурами Тянь-Шаня и пространственными колебаниями высоты геоида по-прежнему носят ограниченный характер. Это подчеркивает актуальность данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенного исследования проанализированы пространственно-временные изменения высоты геоида в пределах изучаемой территории в период с 2019 по 2025 годы на основе спутниковых гравиметрических данных миссии GRACE-FO. Исходные данные поступили от Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM; Ince et al., 2019) и представлены в виде ежемесячных глобальных геопотенциальных моделей (ГГМ) версии RL06.3, созданных Центром геонаук имени Гельмгольца (GFZ; Dahle et al., 2019).

Для повышения надежности анализа применены стандартные этапы предварительной обработки данных. Коэффициенты сферических гармоник степени 1, описывающие геоцентрическое движение, заменены значениями, приведенными в (Sun et al., 2016). Коэффициент C20 второй степени нулевого порядка скорректирован с использованием решения спутниковой лазерной дальнометрии (SLR) (Loomis et al., 2019).

Для уменьшения коррелированного шума, характерного для решений GRACE/GRACE-FO, применен декорреляционный фильтр DDK3 (Kusche et al., 2009), позволяющий снизить уровень полосового шума при сохранении регионального геофизического сигнала (Godah et al., 2017a). Модели ограничены максимальной степенью и порядком 60. При таком спектральном ограничении и примененной фильтрации эффективное пространственное разрешение составляет порядка нескольких сотен километров, поэтому результаты интерпретируются на региональном, а не локальном масштабе.

Следует учитывать, что применение фильтрации и спектрального ограничения может сопровождаться утечкой и ослаблением сигнала, особенно в областях с резкими пространственными градиентами, к которым относятся горные районы Тянь-Шаня. В настоящей работе количественная оценка эффекта утечки сигнала отдельно не выполнялась; это рассматривается как одно из ограничений исследования и должно учитываться при интерпретации амплитуд и пространственной локализации выявленных аномалий.

Помимо гравиметрических данных, в работе использованы сведения о сейсмической активности из каталога Геологической службы США (USGS) («Каталог землетрясений Геологической службы США», 2026) за 2019–2025 годы. Для изучаемой территории

проведен анализ характеристик землетрясений: времени возникновения, магнитуды и глубины очагов.

Сопоставление временных аномалий высоты геоида с периодами повышенной сейсмической активности позволяет оценить их возможную пространственно-временную согласованность и сформулировать гипотезу о потенциальном геодинамическом вкладе (Panet et al., 2007). При этом вариации высоты геоида по данным GRACE-FO отражают интегральное перераспределение масс и не могут быть однозначно отнесены к тектоническим процессам. Наряду с деформациями литосферы вклад в наблюдаемый сигнал вносят сезонные и межгодовые изменения поверхностных, подземных и ледниковых вод. Поэтому в настоящем исследовании сопоставление с сейсмичностью используется как качественный диагностический признак, а не как доказательство причинно-следственной связи.

Совместное рассмотрение спутниковых гравиметрических и сейсмологических данных повышает информативность интерпретации, однако само по себе не обеспечивает количественного разделения гидрологической, криосферной и геодинамической составляющих сигнала. Такое разделение требует привлечения независимых гидрологических, климатических, гляциологических и/или ГНСС-данных.

Методы. Оценка изменений высоты геоида (ΔN) проводилась с применением специализированного программного комплекса IGiK-TVGMF (Instytut Geodezji i Kartografii – Temporal Variations of Gravity/Mass Functionals), созданного W. Godah [Godah, 2019]. Реализация выполнена в среде MATLAB и включает ряд модулей, отвечающих за расчет и анализ временных изменений гравитационных параметров.

Основной блок (TVGMF–Computation) позволяет рассчитывать набор функционалов на основе ежемесячных глобальных моделей геопотенциала, построенных по данным спутниковых гравиметрических миссий. Дополнительные модули – TVGMF–Analysis (PCA/EOF) и TVGMF–Analysis (SA) – предназначены для статистической обработки временных рядов с использованием метода главных компонент (PCA/EOF) и метода сезонной декомпозиции (SA).

В рамках данного исследования ПО IGiK-TVGMF было доработано для совместимости с современными решениями ГТМ, основанными на результатах миссии GRACE-FO, что обеспечило корректный учет временных изменений гравитационного поля в исследуемый период.

На основе сферического гармонического представления гравитационного поля Земли был выполнен расчет вариаций высоты геоида ΔN (формула 1):

$$\Delta N(\lambda, \varphi) = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{l=2}^{l_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l (\Delta C_{lm} \cos m\lambda + \Delta S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

где $\Delta N(\lambda, \varphi)$ – вариация высоты геоида в точке с долготой λ и широтой φ ; GM – геоцентрическая гравитационная постоянная; r – геоцентрический радиус точки вычисления; γ – нормальная сила тяжести; R – средний радиус Земли, используемый в ГТМ; l и m – соответственно степень и порядок сферической гармоник; $l_{\max}$ – максимальная степень разложения (в настоящей работе $l_{\max} = 60$); $P_{lm}(\sin \varphi)$ – полностью нормированная присоединенная функция Лежандра; ΔC_{lm} и ΔS_{lm} – временные вариации полностью нормированных коэффициентов сферических гармоник относительно выбранного референсного уровня. В настоящем исследовании значения ΔN рассчитывались относительно средних коэффициентов за 2019 г.

Для выявления временной структуры изменений ΔN применялся подход сезонной декомпозиции с использованием аддитивной модели. В этом случае наблюдаемый сигнал рассматривается как совокупность нескольких компонент (формула 2):

$$\Delta N(t) = T(t) + S(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где t – временной параметр (в месяцах);

$T(t)$ – трендовая составляющая, описывающая долговременную изменчивость интегрального сигнала перераспределения масс; ее физическая природа может включать гидрологический, криосферный и возможный геодинамический вклад;

$S(t)$ – сезонная составляющая, связанная с периодически повторяющимися изменениями распределения водных, снежных и ледниковых масс;

$\varepsilon(t)$ – остаточная составляющая, включающая кратковременную изменчивость, нерегулярные эффекты и неописанную моделью часть сигнала.

В анализе отдельно рассматривались трендовая, сезонная и остаточная составляющие. Сезонная декомпозиция разделяет временной ряд по характерным временным масштабам, но не разделяет физические источники сигнала. Поэтому трендовая и остаточная компоненты не интерпретируются как исключительно тектонические без дополнительной проверки независимыми данными.

Такой подход позволяет описать повторяющиеся сезонные вариации, долговременную тенденцию и нерегулярные отклонения ΔN . Для последующей физической интерпретации выделенных компонент необходимо учитывать интегральный характер измерений GRACE-FO и возможное наложение поверхностных и литосферных процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-временные вариации высоты геоида (ΔN), оцененные на основе данных миссии GRACE-FO за период с января 2019 г. по ноябрь 2025 г. для исследуемого региона, рассматриваются в данном разделе. Основное внимание уделено анализу изменений ΔN в пределах орогенической системы Тянь-Шаня.

Представлены результаты расчета временных вариаций высоты геоида и их пространственного распределения, а также анализ и моделирование временных рядов ΔN с выделением трендовой, сезонной и остаточной составляющих. Дополнительно выполнено сопоставление выявленных аномалий с сейсмической активностью региона Тянь-Шаня.

Временные вариации высот геоида. Карты пространственного распределения за период ΔN 01/2019–11/2025 представлены на рисунке 2. Следует отметить, что указанные значения ΔN рассчитаны относительно средних коэффициентов сферических гармоник, зафиксированных в первый год наблюдений (2019 год). Динамика средних значений ΔN по всей исследуемой зоне отображена на рисунке 3.

Анализ данных, представленных на рисунках 2 и 3, показывает выраженную сезонную изменчивость высоты геоида. Максимальные положительные отклонения преимущественно приходятся на весенние месяцы и согласуются с периодом накопления снежно-водных масс, тогда как минимальные значения чаще отмечаются в конце лета и осенью, когда возрастают сток и испарение. Такая интерпретация соответствует ожидаемому сезонному гидрологическому циклу.

Рисунок 2 показывает, что вариации ΔN проявляются как во времени, так и в пространстве, причем их амплитуда различается между отдельными частями исследуемой территории. Например, разность между апрелем 2019 года (+2,4 мм) и октябрём 2023 года (–6,4 мм) составляет около 8,8 мм.

Пространственная неоднородность поля ΔN прослеживается и в пределах отдельных временных эпох. В сентябре 2025 года значения изменялись от –6,2 до +0,6 мм, что соответствует пространственному диапазону около 6,8 мм. Такая неоднородность отражает региональное перераспределение масс и может формироваться под совместным влиянием рельефа, гидрологических и криосферных процессов, а также возможной геодинамической составляющей.

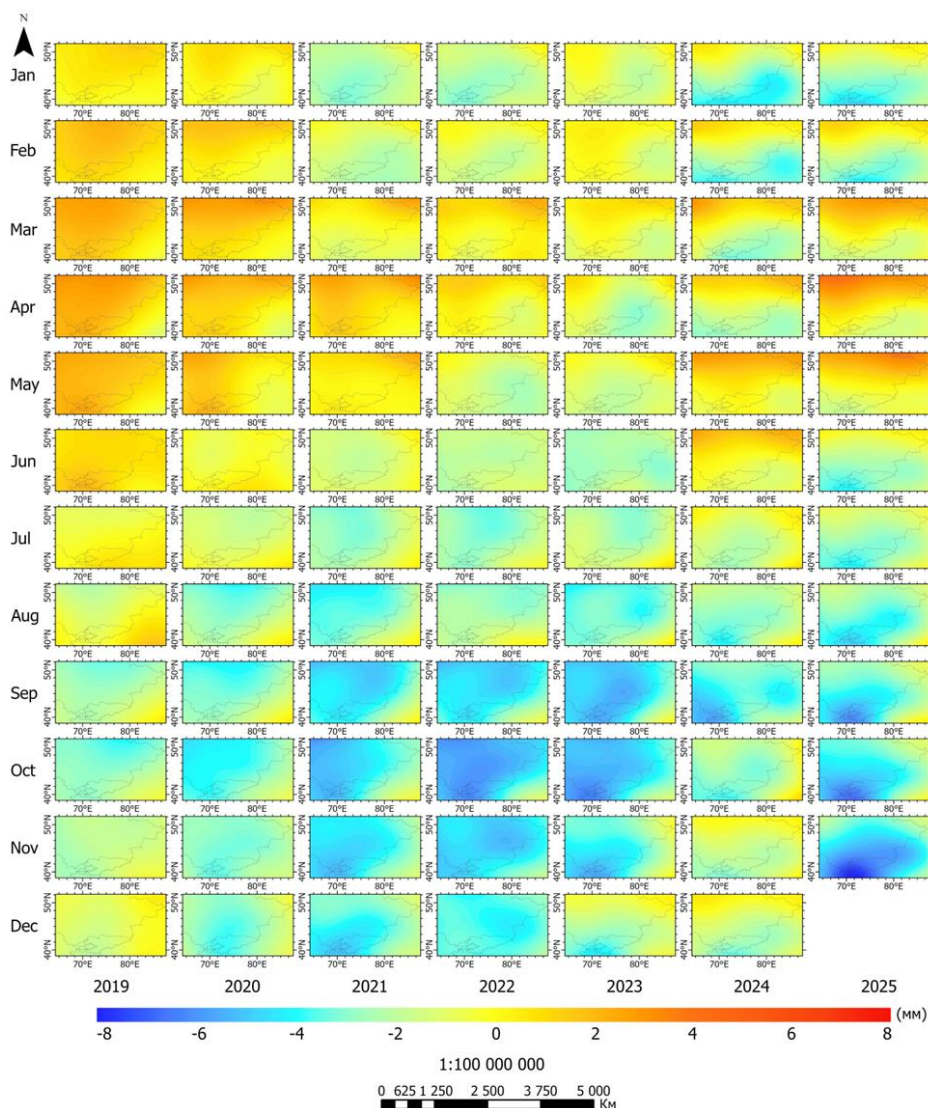


Рисунок 2. Пространственное распределение временных изменений высоты геоида (ΔN) на исследуемой территории за период январь 2019 г. – ноябрь 2025 г.

Примечание – составлено авторами

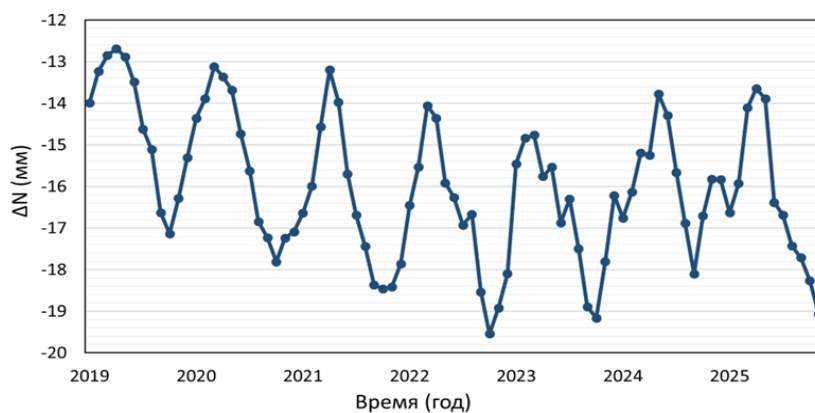


Рисунок 3. Временной ряд средних значений изменений высоты геоида (ΔN) на исследуемой территории за период январь 2019 г. – ноябрь 2025 г.

Примечание – составлено авторами

Различия в годовых амплитудах ΔN , представленные на рисунке 2, указывают на неоднородность процессов перераспределения масс в пределах исследуемого региона. По рисунку 3 до 2022 года прослеживается постепенное снижение средних значений высоты геоида, которое может быть связано с долговременными изменениями запасов воды и ледниковой массы. После 2023 года временной ряд характеризуется повышенной изменчивостью и выраженными минимумами. Эти отклонения отличаются от устойчиво повторяющейся сезонной компоненты, однако без независимых гидрологических и криосферных данных их физическое происхождение нельзя определить однозначно. Временное совпадение заметного снижения ΔN в начале 2024 года с периодом повышенной сейсмической активности позволяет рассматривать возможный геодинамический вклад.

Анализ и моделирование временных изменений высоты геоида. На рисунке 4 представлена сезонная компонента временного ряда ΔN за 2019–2025 гг., а на рисунке 5 – пространственное распределение средних сезонных изменений. Сопоставление этих результатов показывает, что средняя сезонная амплитуда ΔN в исследуемом регионе составляет около 3,6 мм: от +1,6 мм весной до –2,0 мм осенью.

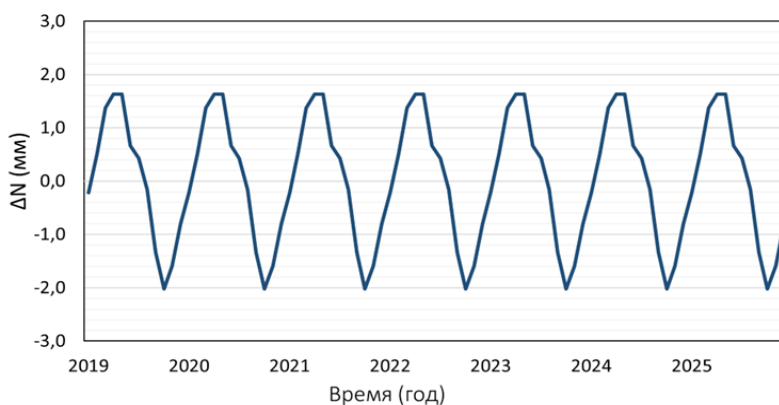


Рисунок 4. Сезонная компонента вариаций высоты геоида (ΔN) на исследуемой территории за период 2019–2025 гг.

Примечание – составлено авторами

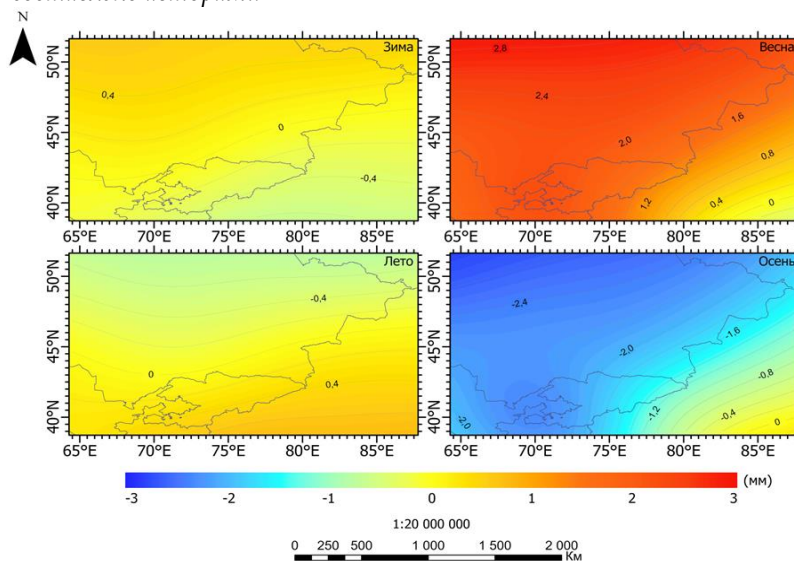


Рисунок 5. Средние сезонные колебания высоты геоида (ΔN) в пределах исследуемой территории за период январь 2019 г. – ноябрь 2025 г.

Примечание – составлено авторами

Полученные результаты согласуются с анализом временного ряда: максимальные сезонные значения ΔN наблюдаются преимущественно в марте–мае, минимальные — в сентябре–ноябре. Выраженная сезонная повторяемость отражает регулярное перераспределение масс, формирующее основную часть краткопериодной изменчивости гравитационного поля. Пространственный анализ на рисунке 5 показывает неоднородность амплитуды сезонного сигнала в пределах территории. Повышенная изменчивость в горных районах Тянь-Шаня может быть связана прежде всего с особенностями водно-снежного и ледникового баланса; возможный вклад геодинамических процессов по данным только GRACE-FO количественно не выделяется.

Полученная сезонная амплитуда ΔN (около 3,6 мм) сопоставима с величинами, установленными для других регионов, но отражает особенности водно-ледникового режима Тянь-Шаня. В предыдущих исследованиях значения временных вариаций геодезических высот и связанных гравитационных функционалов существенно различаются в зависимости от региона и интенсивности гидрологического цикла (Godah et al., 2017b; Godah et al., 2020; Zhang et al., 2024). В частности, для крупных речных бассейнов амплитуды могут быть значительно выше, чем в рассматриваемом засушливом внутриконтинентальном регионе.

Детальный пространственный анализ по сезонам (рисунок 5) выявил следующие закономерности:

- Зимой наблюдается переходный режим с преобладанием слабоположительных значений на севере и постепенным уменьшением ΔN к югу, что согласуется с началом накопления снежного покрова в высокогорных районах.

- Весной зафиксирован наиболее выраженный положительный сигнал ΔN (до +2,8 мм), локализованный преимущественно в северо-западной и центральной частях региона. В южных и юго-восточных высокогорных районах Тянь-Шаня значения составляют около +1,2...+1,6 мм. Пространственно-временная структура сигнала согласуется с сезонным увеличением запасов воды и снега.

- Летом поле ΔN становится менее контрастным: в северных и центральных районах значения близки к нулю или слабоположительны, тогда как в юго-восточной части Тянь-Шаня начинается постепенное снижение ΔN , соответствующее периоду стока талых вод и усиления испарения.

- Осенью наблюдается общее снижение ΔN , достигающее около –2,4 мм в северной части и –1,2...–1,6 мм в ряде прилегающих районов. Такая сезонная фаза может быть связана с уменьшением запасов поверхностных и подземных вод перед началом нового зимнего цикла.

Стабильность сезонного цикла указывает на существенную роль климатически обусловленного перераспределения водных и снежно-ледниковых масс в формировании краткопериодных вариаций ΔN . Наложение сезонного сигнала на долговременную тенденцию требует отдельного анализа источников тренда. В тектонически активном Тянь-Шане возможная геодинамическая составляющая не исключается, однако ее количественное выделение возможно только при совместном использовании GRACE-FO с независимыми гидрологическими, гляциологическими и ГНСС-данными.

Долгосрочные (трендовые) изменения высоты геоида. Долгосрочные изменения ΔN за 2019–2025 гг. представлены на рисунке 6. Для исследуемого региона в целом прослеживается отрицательная тенденция, выраженность которой меняется во времени. Этот тренд отражает долговременное перераспределение масс, однако по данным GRACE-FO без дополнительной информации невозможно однозначно определить относительный вклад гидрологических, криосферных и геодинамических процессов.

Трендовая составляющая на рисунке 6 в целом снижается. С 2022 года до середины 2023 года отмечается период относительной стабильности со значениями около –0,5 мм, после чего отрицательная тенденция усиливается и к концу 2025 года достигает примерно –1,2 мм.

Сопоставление временных изменений с их пространственным распределением (рисунок 2) показывает неоднородность тренда по территории. В высокогорных районах юго-восточной части Тянь-Шаня суммарное снижение за рассматриваемый период достигает примерно 3,2 мм, что соответствует средней скорости около $-0,53$ мм/год. Пространственная приуроченность наиболее выраженного отрицательного тренда к горным районам согласуется с возможным совместным влиянием деградации ледников, изменений водного баланса и геодинамических процессов, но не позволяет количественно разделить их вклад.

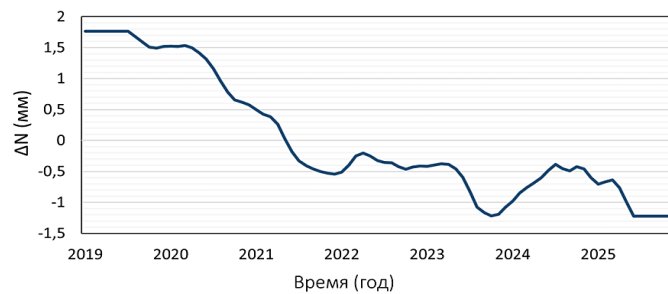


Рисунок 6. Долгосрочные (трендовые) изменения высоты геоида в период с 2019 по 2025 годы

Примечание – составлено авторами

В центральной и северной частях изменения выражены слабее и составляют порядка $-1,5$ мм за рассматриваемый период (около $-0,25$ мм/год). В западной части локальное снижение ΔN достигает примерно $-2,0$ мм. Эти различия могут быть связаны с пространственной неоднородностью гидрологического и криосферного баланса, а также с возможным вкладом процессов деформации литосферы.

На рисунке 6 прослеживается общий отрицательный тренд, свидетельствующий о продолжающемся долговременном перераспределении масс в пределах исследуемой территории. В отличие от ранее рассмотренной общенациональной тенденции (Shoganbekova et al., 2025), для Тянь-Шаньского региона в 2024–2025 гг. полной стабилизации не наблюдается. Усиление отрицательной тенденции может быть связано с несколькими источниками, включая изменения ледниковой массы и водных запасов, а также возможные геодинамические процессы; относительный вклад этих факторов в настоящей работе не определялся.

Геодинамический контекст региона необходимо учитывать при интерпретации тренда. Продолжающееся внутриконтинентальное сжатие Тянь-Шаня сопровождается горизонтальными деформациями и вертикальными движениями земной коры. Однако наличие современной тектонической деформации само по себе не означает, что наблюдаемый тренд ΔN имеет преимущественно тектоническое происхождение.

По данным Pan et al. 2019, средняя вертикальная скорость земной поверхности в Тянь-Шане по GPS за исследованный ими период составляла $0,72 \pm 0,12$ мм/год, а оцененный по GRACE упругий отклик на изменение поверхностной нагрузки — около $0,39$ мм/год; остаточная тектоническая составляющая оценена примерно в $0,33 \pm 0,12$ мм/год. Эти результаты подтверждают существенную роль современных тектонических движений в орогенезе Тянь-Шаня, однако относятся к другому периоду наблюдений и основаны на совместной инверсии GPS и GRACE. Поэтому их нельзя напрямую использовать для количественного разложения тренда ΔN , полученного в настоящей работе за 2019–2025 гг.

Таким образом, выявленный долговременный отрицательный тренд ΔN следует интерпретировать как интегральный сигнал перераспределения масс. Пространственное совпадение

областей наиболее выраженных изменений с тектонически активными структурами допускает наличие геодинамической составляющей, но ее доминирование не установлено. Для количественной атрибуции тренда необходим совместный анализ GRACE-FO с независимыми гидрологическими, климатическими, гляциологическими и ГНСС-наблюдениями.

Современные тектонические процессы в регионе развиваются в рамках длительной кайнозойской эволюции Тянь-Шаньской орогенической системы, связанной с продолжающимся внутриконтинентальным сокращением и утолщением земной коры. Этот геодинамический фон важен для интерпретации наблюдений, но не рассматривается в настоящей работе как единственная причина изменений высоты геоида.

Сопоставление аномалий геоида с сейсмической активностью в 2024 году. В 2024 году в пределах исследуемой территории выявлены отклонения ΔN относительно сезонной и трендовой составляющих. С учетом интегральной природы сигнала GRACE-FO эти отклонения не интерпретируются как однозначное проявление сейсмотектонических процессов. Их сопоставление с сейсмичностью используется для оценки пространственно-временной согласованности и возможного геодинамического вклада.

Данные GRACE-FO характеризуют суммарные изменения гравитационного поля, обусловленные перераспределением масс в атмосфере, гидросфере, криосфере и твердой Земле. Поэтому выявленные аномалии ΔN могут содержать несколько наложенных составляющих. В настоящей работе совпадение аномалий с периодами повышенной сейсмичности рассматривается как наблюдаемая пространственно-временная согласованность, а не как статистически подтвержденная корреляция или причинно-следственная связь.

По каталогу Геологической службы США (USGS) («Каталог землетрясений Геологической службы США», 2026) в 2024 году на исследуемой территории отмечено заметное увеличение числа землетрясений с магнитудой $M \geq 4,0$ (рисунок 7), что характеризует период повышенной региональной сейсмической активности.

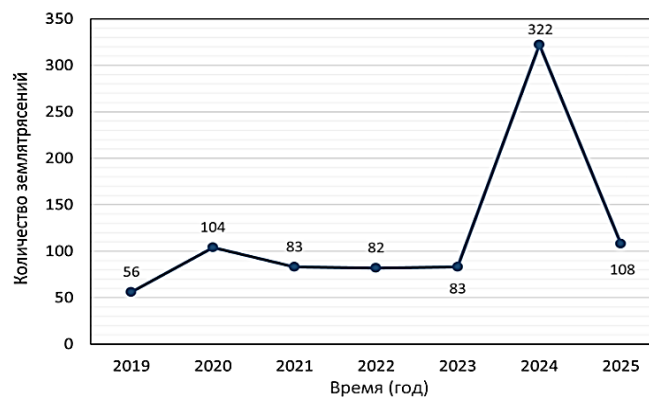


Рисунок 7. Количество землетрясений с магнитудой $\geq 4,0$ на исследуемой территории
Примечание – составлено авторами

В 2024 году зарегистрировано 322 события с $M \geq 4,0$, тогда как в 2019–2023 гг. годовое количество составляло от 56 до 104 событий; таким образом, число событий в 2024 году примерно втрое превышает максимальное значение предыдущих пяти лет. В 2025 году количество землетрясений снизилось до 108. Такое изменение сейсмичности делает 2024 год обоснованным периодом для пространственно-временного сопоставления с аномалиями ΔN (рисунок 7), но само по себе не определяет происхождение гравитационного сигнала. Детальное пространственное сопоставление аномальных вариаций высоты геоида ΔN и плотности эпицентров землетрясений ($M \geq 4,0$) за январь–март 2024 года представлено на рисунке 8.

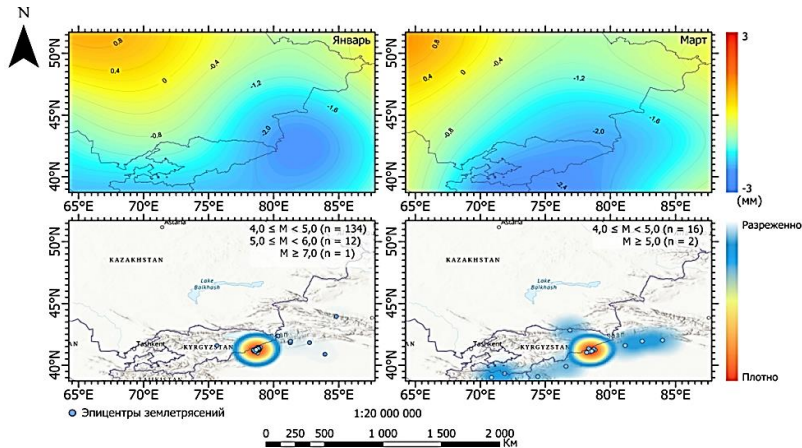


Рисунок 8. Вариации высоты геоида и плотность эпицентров землетрясений ($M \geq 4,0$), январь-март 2024

Примечание – составлено авторами

Анализ показывает следующие особенности пространственной согласованности:

1. В юго-восточной части исследуемой территории, на стыке Казахстана, Кыргызстана и Китая, в январе–марте 2024 года прослеживается область отрицательных значений ΔN порядка $-2,0...-2,4$ мм, пространственно близкая к зоне повышенной плотности эпицентров землетрясений, включая события с $M \geq 5,0$.

2. Наиболее выраженная отрицательная аномалия на рисунке 8 пространственно приурочена к району сильного землетрясения $M = 7,0$, произошедшего 23 января 2024 года. Теоретически косейсмическое и постсейсмическое перераспределение масс может вносить вклад в гравитационный сигнал (Panet et al., 2007), однако пространственное разрешение и месячная дискретность GRACE-FO не позволяют по представленному сопоставлению изолировать вклад отдельного землетрясения от гидрологических, криосферных и других региональных процессов.

3. Районы повышенной концентрации сейсмической активности в начале 2024 года частично совпадают с областями отрицательных значений ΔN . Такая пространственная согласованность допускает возможный вклад деформационных процессов в интегральный сигнал, но для его подтверждения необходим количественный анализ с независимыми геодезическими и геофизическими данными.

4. Следовательно, выявленное совпадение следует рассматривать как наблюдаемую пространственную ассоциацию. По имеющимся данным нельзя установить, является ли она результатом косейсмических деформаций, совместного воздействия нескольких процессов перераспределения масс или их наложения.

С геофизической точки зрения одними из возможных механизмов формирования гравитационной составляющей при сильных землетрясениях являются смещения по разломам, вертикальные движения блоков и изменения плотностной структуры земной коры (Panet et al., 2007). Такие процессы потенциально могут проявляться в спутниковом гравитационном сигнале, однако их выделение требует специального моделирования косейсмического и постсейсмического отклика.

В тектонически активных регионах интерпретация временных вариаций гравитационного поля осложняется наложением гидрологических, криосферных и литосферных процессов. Поэтому выявленные в 2024 году особенности рассматриваются как основание для дальнейшего комплексного анализа, а не как доказательство влияния изменений гравитационного поля на возникновение землетрясений или обратной причинной связи.

Полученные результаты показывают, что временные вариации высоты геоида могут содержать информацию о региональном перераспределении масс в тектонически активной области. Вместе с тем комплексный характер сигнала GRACE-FO требует осторожной интерпретации. Наблюдаемая пространственно-временная согласованность

аномалий ΔN и повышенной сейсмичности подтверждает целесообразность совместного использования спутниковой гравиметрии, ГНСС, гидрологических и сейсмологических наблюдений в дальнейших исследованиях геодинамики Тянь-Шаня.

Полученные результаты обосновывают необходимость продолжительного совместного мониторинга гравитационного поля и сейсмичности региона. Расширение анализа за счет независимых ГНСС, гидрологических, климатических и гляциологических данных позволит количественно оценить вклад отдельных источников в наблюдаемые вариации ΔN .

Ограничения интерпретации. В настоящей работе не выполнялись расчет коэффициента корреляции между временными рядами ΔN и сейсмичности, анализ временного запаздывания и оценка статистической значимости их связи. Кроме того, гидрологическая, криосферная и геодинамическая составляющие долговременного сигнала количественно не разделялись независимыми данными. Поэтому выводы о сейсмотектоническом вкладе основаны только на пространственно-временном сопоставлении и сформулированы как гипотеза, требующая дальнейшей проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа данных миссии GRACE-FO и сейсмологических каталогов за период 2019–2025 гг. получены следующие результаты:

1. Динамика гравитационного поля: в пределах исследуемой территории вариации высоты геоида демонстрируют выраженную сезонность на фоне долговременного отрицательного тренда. В юго-восточной части региона суммарное снижение ΔN за рассматриваемый период достигает около 3,2 мм. Наблюдаемый тренд интерпретируется как интегральное проявление долговременного перераспределения масс, формируемого гидрологическими, криосферными и возможными геодинамическими процессами.

2. Сезонная изменчивость: краткопериодные колебания характеризуются устойчивой внутригодовой повторяемостью. Максимум сезонной компоненты приходится на весенний период (+1,6 мм), а минимальные значения — на осень (–2,0 мм), при средней амплитуде около 3,6 мм. Такая структура согласуется с сезонным перераспределением водных, снежных и ледниковых масс.

3. Пространственно-временная согласованность с сейсмичностью: в 2024 году отрицательные аномалии ΔN до –2,4 мм пространственно и во времени совпадают с периодом повышенной сейсмической активности и зонами повышенной плотности эпицентров. Это совпадение позволяет предполагать возможный геодинамический вклад в наблюдаемый интегральный сигнал, однако не является статистически подтвержденной корреляцией и не доказывает прямую причинно-следственную связь с косейсмическими деформациями.

4. Научная значимость: результаты демонстрируют потенциал GRACE-FO для исследования региональной пространственно-временной изменчивости гравитационного поля Тянь-Шаня. Для надежного выделения геодинамической составляющей необходима интеграция спутниковой гравиметрии с независимыми ГНСС, гидрологическими, климатическими и гляциологическими данными, а также применение количественных статистических методов сопоставления.

Практическая значимость полученных результатов состоит в формировании основы для дальнейшего комплексного мониторинга перераспределения масс и современной геодинамики в трансграничном регионе Казахстана, Кыргызстана и Китая.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP27510909.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ: Оригинальные материалы, представленные в этом исследовании, включены в статью. С дополнительными вопросами можно обратиться к автору-корреспонденту.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность разработчику программы IGiK-TVGMF - W. Godah за предоставление программного обеспечения, использованного в настоящем исследовании.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке исправленной версии рукописи инструмент искусственного интеллекта использовался исключительно для языкового и стилистического редактирования текста. Научные результаты, исходные данные, методология, интерпретация и выводы проверены авторами, которые несут полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abdrakhmatov, K. Y., Aldazhanov, S. A., Hager, B. H., Hamburger, M. W., Herring, T. A., Kalabaev, K. B., ... & Zubovich, A. V. (1996). Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 384(6608), 450-453. <https://doi.org/10.1038/384450a0>
- Chen, J., Cazenave, A., Dahle, C., Llovel, W., Panet, I., Pfeffer, J., & Moreira, L. (2022). Applications and challenges of GRACE and GRACE follow-on satellite gravimetry. *Surveys in Geophysics*, 43(1), 305-345. <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09685-x>
- Dahle, C., Murböck, M., Flechtner, F., Döbrowsky, H., Michalak, G., Neumayer, K. H., ... & Förste, C. (2019). The GFZ GRACE RL06 monthly gravity field time series: Processing details and quality assessment. *Remote Sensing*, 11(18), 2116. <https://doi.org/10.3390/rs11182116>
- Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., ... & Güntner, A. (2015). Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8(9), 716-722. <https://doi.org/10.1038/ngeo2513>
- Godah, W. (2019). IGiK-TVGMF: A MATLAB package for computing and analysing temporal variations of gravity/mass functionals from GRACE satellite based global geopotential models. *Computers & geosciences*, 123, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.11.008>
- Godah, W., Szelachowska, M., & Krynski, J. (2017a). On the analysis of temporal geoid height variations obtained from GRACE-based GGMs over the area of Poland. *Acta geophysica*, 65(4), 713-725. <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0064-3>
- Godah, W., Szelachowska, M., & Krynski, J. (2017b). On the estimation of physical height changes using GRACE satellite mission data—A case study of Central Europe. *Geodesy and Cartography*, 66(2). <https://doi.org/10.1515/geocart-2017-0013>
- Godah, W., Szelachowska, M., Krynski, J., & Ray, J. D. (2020). Assessment of temporal variations of orthometric/normal heights induced by hydrological mass variations over large river basins using GRACE mission data. *Remote sensing*, 12(18), 3070. <https://doi.org/10.3390/rs12183070>
- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical geodesy*. Vienna: Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/3-211-27467-7_3
- Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., & Schuh, H. (2019). ICGEM—15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth system science data*, 11(2), 647-674. <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>
- Kusche, J., Schmidt, R., Petrovic, S., & Rietbroek, R. (2009). Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. *Journal of geodesy*, 83(10), 903-913. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0308-3>
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., ... & Yuan, D. N. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE follow-on instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL088306. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>
- Loomis, B. D., Rachlin, K. E., & Luthcke, S. B. (2019). Improved Earth oblateness rate reveals increased ice sheet losses and mass-driven sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6910-6917. <https://doi.org/10.1029/2019GL082929>
- Molnar, P., & Tapponnier, P. (1978). Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B11), 5361-5375. <https://doi.org/10.1029/JB083iB11p05361>
- Pan, Y., Chen, R., Yi, S., Wang, W., Ding, H., Shen, W., & Chen, L. (2019). Contemporary mountain-building of the Tianshan and its relevance to geodynamics constrained by

- integrating GPS and GRACE measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11), 12171-12188. <https://doi.org/10.1029/2019JB017566>
- Panet, I., Mikhailov, V., Diamant, M., Pollitz, F., King, G., De Viron, O., ... & Lemoine, J. M. (2007). Coseismic and post-seismic signatures of the Sumatra 2004 December and 2005 March earthquakes in GRACE satellite gravity. *Geophysical Journal International*, 171(1), 177-190. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03525.x>
- Sansò, F., & Sideris, M. G. (Eds.). (2013). *Geoid determination: theory and methods*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74700-0>
- Shoganbekova, D., Urazaliyev, A., Godah, W., Nurakynov, S., Zhaksyngul, N., & Kozhakhmetov, M. (2025). Temporal variations of geoid heights over Kazakhstan from GRACE-FO data and their relation with hydrological changes in the Caspian Sea and seismic activity. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1662855. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1662855>
- Sun, Y., Riva, R., & Ditmar, P. (2016). Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J2 from a combination of GRACE data and geophysical models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11), 8352-8370. <https://doi.org/10.1002/2016JB013073>
- Szelachowska, M., Godah, W., & Krynski, J. (2022). Contribution of GRACE satellite mission to the determination of orthometric/normal heights corrected for their dynamics—a case study of Poland. *Remote sensing*, 14(17), 4271. <https://doi.org/10.3390/rs14174271>
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., ... & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change*, 9(5), 358-369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>
- Torge, W., Müller, J., & Pail, R. (2023). *Geodesy*. In *Geodesy*. De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110723304>
- Van Dijk, A.I.J. M., Beck, H.E., Boergens, E., De Jeu, R.A.M., Dorigo, W.A., Edirisinghe, C., ... & Larraondo, P.R. (2025). *Global water monitor 2024, summary report*. <https://www.globalwater.online/globalwater/wp-content/uploads/2018/09/GWM-Report-2024.pdf>
- Zhang, S., Guo, J., Shi, T., Chang, X., Zhu, G., Huang, L., ... & Liu, X. (2024). Height variations in the Mississippi River basin from daily time-varying satellite gravity data and hydrological model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 9846-9857. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3397620>
- U.S. Geological Survey. (2026). *Earthquake Catalog*. <https://earthquake.usgs.gov/>

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Шоганбекова Дания Асыगतовна – «Геодезия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD), «Ионосфера институты» ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері, Халықаралық білім беру корпорациясының қауымдастырылған профессоры

Шоганбекова Дания Асыगतовна – доктор философии (PhD) по специальности «Геодезия», главный научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», ассоциированный профессор Международной образовательной корпорации

Shoganbekova Daniya Assyगतovna – Doctor of Philosophy (PhD) in Geodesy, Chief Researcher at LLP “Institute of Ionosphere, Associate Professor at the International Educational Corporation.

e-mail: d.shoganbekova@ionos.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6825-4774>



Уразалиев Асет Сейсенбекович – «Геодезия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD), «Ионосфера институты» ЖШС-нің Спутниктік және геодинамикалық зерттеулер зертханасының меңгерушісі

Уразалиев Асет Сейсенбекович – доктор философии (PhD) по специальности «Геодезия», заведующий лабораторией спутниковых и геодинамических исследований ТОО «Институт ионосферы»

Urazaliyev Asset Seisenbekovich – Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty “Geodesy”, Head of the Laboratory of Satellite and Geodynamic Research at LLP “Institute of Ionosphere”

e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7444-2897>



Жақсығұл Найля Нұрланқызы – «Ионосфера институты» ЖШС-нің ғылыми қызметкері, Халықаралық білім беру корпорациясының «Геодезия» мамандығы бойынша PhD докторанты

Жақсығұл Найля Нұрланқызы – научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», PhD-докторант по специальности «Геодезия» Международной образовательной корпорации

Zhaksyguul Nailya Nurlankyzy – researcher at LLP “Institute of Ionosphere”, PhD doctoral student in Geodesy at the International Educational Corporation

e-mail: n.zhaksyguul@ionos.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3597-5056>



Қожахметов Мағжан Серікжанұлы – «Ионосфера институты» ЖШС-нің ғылыми қызметкері, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің «Геокеңістіктік цифрлық инженерия» мамандығы бойынша PhD докторанты

Қожахметов Мағжан Серікжанұлы – научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», PhD-докторант по специальности «Геопространственная цифровая инженерия» Казахского Национального Исследовательского Технического университета им. К. Сатпаева

Kozhakhmetov Magzhan Serikzhanuly – researcher at LLP “Institute of Ionosphere”, PhD doctoral student in Geospatial Digital Engineering at the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev

e-mail: m.kozhakhmetov@ionos.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9433-8674>