Научная статья
УДК 332.2:551.59:502/504:364.6
doi: 10.55186/25876740_2026_69_5_616

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОДНОГО БАЛАНСА, КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ И АНТРОПОГЕННОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БАССЕЙН ОЗЕРА ТАНГАНЬИКА

В.В. Вершинин, Нтиндекуре Арлет Рейн

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

Аннотация. Озеро Танганьика — уникальный пресноводный водоём мирового значения, обеспечивающий жизненно важные ресурсы для миллионов жителей четырёх африканских стран. В условиях усиливающегося климатического и антропогенного воздействия актуальность комплексной оценки состояния его экосистемы не вызывает сомнений. Цель настоящего исследования, результаты которого изложены в настоящей публикации — интегральный анализ динамики водного баланса бассейна озера Танганьика за период 2003–2021 гг., а также оценка влияния климатических трендов и экономической (хозяйственной) деятельности на его гидрологический режим и экологическое состояние. Методологическая основа работы базируется на совместном использовании спутниковых данных гравиметрических миссий GRACE/GRACE-FO, альтиметрических измерений Hydroweb, продуктов реанализа (ERA5, IMERG) и гидрологического моделирования (GLDAS, MODIS). Такой подход позволил декомпозировать общий запас воды на основные компоненты и выявить закономерности их многолетней и сезонной изменчивости. Для проведения детального и системного анализа рассматриваемой проблемы, представленного в данной публикации, использованы данные значительного количества научных исследований, посвященных оценке гидрологических изменений в озере Танганьика, а также влияния на эти процессы климатического фактора и антропогенной (техногенной) хозяйственной деятельности на её прибрежных территориях. Установлено, что современная гидрологическая динамика бассейна характеризуется нарастающим дисбалансом между приходными и расходными составляющими. Повышение температуры поверхностных вод усиливает термическую стратификацию озера, ограничивая вертикальное перемешивание и снижая поступление питательных веществ в фотическую зону, что влечёт падение первичной продуктивности и сокращение рыбных запасов. Высокая корреляция между общим запасом воды и уровнем озера, выявленная по спутниковым данным, открывает возможности для прогнозирования экстремальных паводков, подобных наводнению в дельте Рузизи в 2021 году. Отдельное внимание уделено анализу антропогенных факторов: показано, что вырубка лесов, урбанизация, неочищенные сбросы, сельскохозяйственный сток и перелов рыбы усугубляют климатически обусловленные изменения, создавая угрозу деградации уникальных местообитаний эндемичных видов. В работе обоснована необходимость интеграции спутникового мониторинга в национальные системы управления водными ресурсами и подчеркнута критическая важность разработки адаптационных стратегий для сохранения этой уникальной экосистемы, оказывающей важное воздействие на экологию и экономику региона.

Ключевые слова: озеро Танганьика, водный баланс, спутниковые данные, гидрологическая динамика, климатические изменения, хозяйственная деятельность

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF WATER BALANCE, CLIMATIC TENDENCIES AND ANTHROPOGENIC ECONOMIC IMPACT ON THE TANGANYIKA LAKE BASIN

V.V. Vershinin, Ntindekure Arlette Reine

State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

Abstract. Lake Tanganyika is a unique freshwater body of global importance, providing vital resources for millions of residents of four African countries. In conditions of increasing climatic and anthropogenic impact, the relevance of a comprehensive assessment of the state of its ecosystem is beyond doubt. The purpose of this study, the results of which are presented in this publication, is an integral analysis of the dynamics of the water balance of the Lake Tanganyika basin for the period 2003-2021, as well as an assessment of the impact of climatic trends and economic (business) activities on its hydrological regime and ecological condition. The methodological basis of the work is based on the joint use of satellite data from the GRACE/GRACE-FO gravimetric missions, Hydroweb altimetric measurements, reanalysis products (ERA5, IMERG), and hydrological modeling (GLDAS, MODIS). This approach allowed us to decompose the total water reserve into its main components and identify patterns in their distribution. The detailed and systematic analysis of the problem presented in this publication is based on a significant number of scientific studies that assess the hydrological changes in Lake Tanganyika, as well as the impact of climate and anthropogenic (technogenic) activities on these processes in the coastal areas. It has been established that the current hydrological dynamics of the basin are characterized by an increasing imbalance between the input and output components. The increase in surface water temperature enhances the thermal stratification of the lake, limiting vertical mixing and reducing the supply of nutrients to the photic zone, which leads to a decrease in primary productivity and a reduction in fish stocks. The high correlation between the total water supply and the lake level, identified using satellite data, opens up opportunities for predicting extreme floods, such as the 2021 flood in the Ruzizi Delta. Special attention is paid to the analysis of anthropogenic factors: it is shown that deforestation, urbanization, untreated discharges, agricultural runoff, and overfishing exacerbate climate-related changes, threatening the degradation of unique habitats for endemic species. The paper substantiates the need to integrate satellite monitoring into national water management systems and emphasizes the critical importance of developing adaptation strategies to preserve this unique ecosystem, which has a significant impact on the region's ecology and economy.

***Keywords*:** Lake Tanganyika, water balance, satellite data, hydrological dynamics, climate change, economic activities

Введение *(актуальность проблемы)***.** Интегрированный анализ гидрологии, климата и антропогенных воздействий на озеро Танганьика выявляет устойчивый гидрологический и экологический дисбаланс, который проявляется в нарушении векового равновесия между поступлением воды в бассейн и её потерями. Хотя в отдельных частях водосбора, особенно в бассейне реки Малагараси, отмечается увеличение годовых сумм осадков (по данным IMERG — до 42,2 км^3/год), этого роста недостаточно для компенсации возросших потерь влаги. Основной вклад в эти потери вносит испарение с поверхности озера, которое по оценкам GLEV за 2003-2018 гг. составило в среднем 51,6 км^3/год, а также эвапотранспирация на водосборе, усиленные глобальным потеплением (Tapley et al., 2019; Pham-Duc et al., 2020) [1].

Таким образом, ключевой дисбаланс заключается в том, что приходная часть водного баланса (осадки) увеличивается недостаточно быстро, чтобы покрыть растущие расходные составляющие (испарение и эвапотранспирацию), что ведёт к нестабильности уровненного режима озера.

Сочетание более высоких температур поверхностного слоя, ослабления ветрового режима и усиления термической стратификации (устойчивого расслоения водной толщи) снижает способность озера к вертикальному

© Вершинин В.В., Нтиндекуре Арлет Рейн, 2026

перемешиванию и обновлению глубинных слоёв. В результате нарушается естественный подъём биогенных элементов (фосфора, азота) из придонных горизонтов в верхний, хорошо освещённый слой (фотическую зону), где происходит фотосинтез. Сокращение поступления питательных веществ ведёт к снижению первичной продуктивности фитопланктона — основы пищевой цепи, что в итоге приводит к сокращению запасов промысловых рыб. Этот дисбаланс формирует последовательную отрицательную обратную связь (каскадный эффект):

- повышение температуры поверхности озера;
- усиление термической стратификации и ослабление вертикального перемешивания;
- сокращение поступления глубинных питательных веществ в фотическую зону;
- падение первичной продуктивности фитопланктона;
- сокращение запасов эндемичных видов рыб, включая пелагических и прибрежных цихлид;
- уменьшение доходов прибрежных сообществ, для которых рыболовство является основным источником продовольствия и дохода.

Трёхмерные гидродинамические прогнозы показывают, что при сохранении текущего уровня выбросов парниковых газов (сценарий RCP 8.5) повышение температуры поверхностных вод озера к 2100 году может составить до 3°C, что приведёт к дальнейшему усилению стратификации и усугублению дефицита биогенов (Sterckx et al., 2023; Verburg et al., 2023) [2]. Отдельные модели прогнозируют риск частичного коллапса экосистемы в случае, если не будут приняты глобальные меры по сокращению выбросов парниковых газов, а также региональные меры по управлению водосбором (лесовосстановление, регулирование стока, очистка сточных вод). Таким образом, дальнейшее развитие ситуации в значительной степени зависит от эффективности климатической политики и устойчивости природопользования в бассейне.

Использованные методы и данные. Для исследования были объединены различные источники данных:

1. Спутниковые данные общего запаса воды (Total Water Storage, TWS) из миссии GRACE для оценки изменений объема воды в бассейне [3].
2. Данные уровня воды из базы Hydroweb, предоставляющие вариации уровней озер и водохранилищ, что позволяет вычислить компонент «поверхностные воды» (ΔSWS) [3].
3. Данные влажности почвы и запаса воды на суше (GLDAS-CLSM) для оценки изменений компонента «почвы» (ΔSMS) [3].
4. Наборы данных осадков (IMERG, CHIRPS, GSMaP, MSWEP, ERA5) и данных по испарению/эвапотранспирации (MODIS, ERA5 и др.) для расчета входящих и исходящих потоков водного баланса [4].
5. Библиографическое и наблюдаемое дополнение по антропогенным воздействиям: вырубка лесов, заиление, загрязнение, сверхинтенсивный промысел и др. [5].

Наблюдение. Оценка изменений объема воды в бассейне озера Танганьика основана на комбинировании двух основных источников спутниковых гидрологических данных: наблюдений общего запаса воды (TWS) миссий GRACE/GRACE-FO и альтиметрических измерений уровня воды, предоставляемых базой Hydroweb. Миссия GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), функционировавшая с 2002 по 2017 год и продолженная миссией GRACE-FO с 2018 года (Tapley et al., 2004; Landerer et al., 2020) [6], обеспечивает возможность измерения ежемесячных изменений гравитационного поля Земли.

Данные доступны через портал NASA PODAAC, а также на специализированном сайте GRACE-FO. Благодаря этим гравиметрическим наблюдениям возможно оценивать перераспределение масс континентальных вод в крупномасштабном формате, включая поверхностные воды, влажность почв, подземные воды и эквивалент водного запаса снега (Famiglietti et al., 2011; Tapley et al., 2019) [7]. В данном исследовании использовался продукт GRACE CNES L4 V1.5.3, предоставленный LEGOS/GRGS с пространственным разрешением 1°, что позволило получить ежемесячный временной ряд TWS за период 2003-2021 гг.

Для выделения только тех пикселей, которые находятся внутри исследуемой территории, был применен метод пространственной маски, основанный на границах бассейна озера Танганьика. Исходные значения TWS, выраженные в эквивалентной высоте водяного столба (EWH), были гармонизированы с использованием следующего уравнения:

$$\text{при } i = 1 \rightarrow n\text{: } \Delta TWS_{(i)} = TWS_{(i)} - TWS_{(0)}, \qquad [1]$$

где: $TWS_{(i)}$ — это помесячное исходное значение эквивалентной высоты воды (EWH), полученное по данным GRACE для всего бассейна в момент *i;*

$\Delta TWS_{(i)}$ выражено в км^3 и вычислено для периода 2003–2021 гг. что позволило получить динамику месячных изменений объема воды в бассейне (в км^3).

Полученные ряды ΔTWS являются ключевым индикатором общего водного баланса и позволяют оценить равновесие между поступлением влаги (осадки, сток) и потерями воды (эвапотранспирация, дренаж) [8].

Параллельно компоненту поверхностных вод (ΔSWS) определяли на основе альтиметрических данных Hydroweb (производство LEGOS/CLS). Эти данные обеспечивают высокоточные измерения изменений уровня воды озера Танганьика. Преобразование изменений высоты в изменения объема выполнялось с использованием комбинации альтиметрических рядов и батиметрических кривых. В период 2003-2021 гг. ΔSWS составляла в среднем 41,8% от общего водного запаса бассейна (TWS) [8].

Совместный анализ ΔTWS–ΔSWS также позволяет оценить запас подземных вод (ΔGWS) по уравнению:

$$\text{при } i = 1 \rightarrow n\text{:}$$
$$\Delta GWS_{(i)} = \Delta TWS_{(i)} - (\Delta SWS_{(i)} + \Delta SMS_{(i)}) \qquad [2]$$

где: ΔSMS — представляет собой влажность почвы, рассчитанную на основе данных GLDAS-CLSM, доступных через NASA GES DISC.

Интегрированный подход GRACE + Hydroweb + GLDAS, ранее использованный в ряде исследований (Biancamaria et al., 2019; Hu et al., 2021; Pham-Duc et al., 2020) [9], обеспечивает надежную реконструкцию гидрологического баланса бассейна озера Танганьика. Он показал, что запас поверхностных вод (SWS) имеет высокую степень корреляции с TWS (приблизительно 91%) с временным лагом около одного месяца [9].

Этот временной лаг особенно важен для управления рисками наводнений: величина SWS в мае, когда наблюдается пик паводков, может быть спрогнозирована с точностью до 95% на основе значений TWS за период с февраля по апрель. Такая предсказательная способность является ключевой для управления уязвимыми зонами, такими как Гатумба и дельта р.Рузизи в Бурунди, которые сильно пострадали от наводнений в мае 2021 г. (рис. 1).

Оценка компоненты «почва» в общем водном запасе бассейна озера Танганьика основана на использовании данных влажности почвы из системы GLDAS-CLSM (Global Land Data Assimilation System — Catchment Land Surface Model), разработанной NASA и доступной через портал NASA GES DISC. Эти данные, представленные с глобальным пространственным разрешением 0,25° и месячным временным шагом, позволяют оценить изменение запасов почвенной влаги (ΔSMS) путем интеграции гидрометеорологических параметров, таких как испарение и транспирация, сток, влажность верхних и глубоких почвенных слоев, а также тепловое состояние почвы.

Продукт GLDAS-CLSM (Noah, CLSM, Mosaic), широко используемый в исследованиях гидрологического цикла в Восточной Африке, обеспечивает согласованную реконструкцию водных потоков в пределах корнеобитаемой зоны, что позволяет выделить ту часть общего запаса воды (TWS), которая связана именно с почвами [11].

В рамках расчета водных притоков и потерь в бассейне озера Танганьика центральную роль играют спутниковые и реанализные данные о количестве осадков. Набор данных IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM), версия 6, разработанный NASA, предоставляет высокодетализированные данные о количестве осадков (с разрешением 0,1° и 30 минут), откалиброванные с помощью наземных дождемеров, что существенно повышает точность оценок в тропических регионах [11].

Продукт CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) обладает пространственным разрешением 0,05° и предоставляет длинный временной ряд (с 1981 года по настоящее время), основанный на сочетании данных наземных станций и спутниковых наблюдений.

Продукт *GSMaP* (Global Satellite Mapping of Precipitation), разработанный JAXA, обеспечивает данные о количестве осадков в почти реальном времени с почасовым и пространственным разрешением 0,1°[11]. Данные *MSWEP* (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation), которые объединяют спутниковые данные, реанализы и сведения с 75 000 дождемерных станций, обеспечивают повышенную точность оценок в горных и тропических районах.

Дополнительно атмосферная реанализная база ERA5, созданная Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕСМПП), предоставляет согласованные временные ряды осадков и испарения с почасовым разрешением 0,25° [11].

Для оценки водных потерь бассейна использовались данные эвотранспирации, полученные из продукта MODIS (MOD16A2), а также данные об испарении, полученные из ERA5. Фактическая эвапотранспирация (ETR), применяемая в уравнении водного баланса, представляет собой сумму значений испарения (E) и эвапотранспирации (ET), полученных из этих продуктов [12].

Все временные ряды (осадки, E и ET) были пространственно агрегированы на всю площадь водосборного бассейна с использованием гидрологических масок, что позволило выделить данные только из области, находящейся в пределах его точных границ.

Таким образом, входящие потоки (P) и выходные потоки (ETR), полученные из IMERG, CHIRPS, GSMaP, MSWEP, MODIS и ERA5, были интегрированы в общее уравнение водного баланса:

$$\text{при } i = 1 \rightarrow n\text{: } \Delta TWS_{(i)} = P_{(i)} - ETR_{(i)} - Q_{(i)} \qquad [3]$$

где: P обозначает количество осадков, ETR представляет сумму E и ET, а Q соответствует стоку из бассейна.

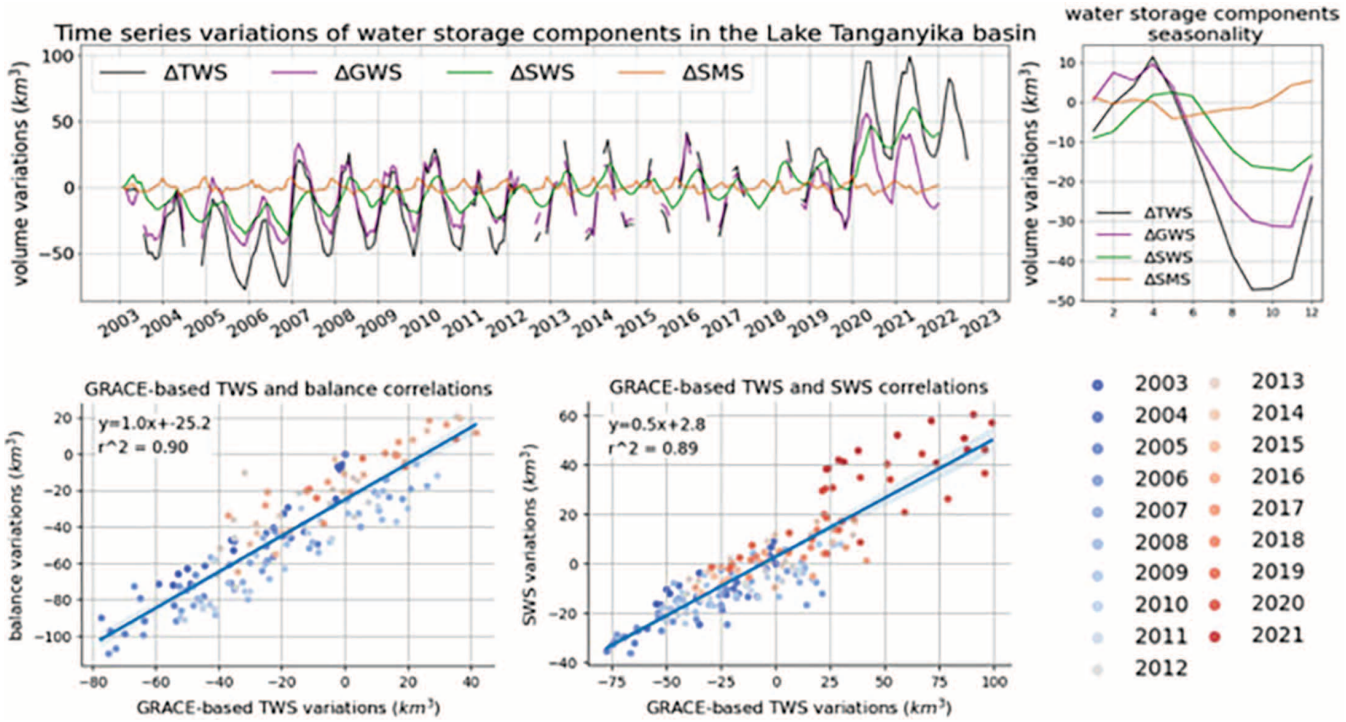

Рисунок 1. **Временная динамика компонентов водного баланса (вверху слева) и их сезонность (вверху справа). Корреляции между общим запасом воды (TWS), оценённым по данным GRACE, и водным балансом (внизу слева), а также между TWS по данным GRACE и запасом поверхностных вод (SWS) (внизу справа) [10]**
Figure 1**. Temporal dynamics of water balance components (top left) and their seasonality (top right). Correlations between total water storage (TWS) estimated from GRACE data and the water balance (bottom left), as well as between GRACE-derived TWS and surface water storage (SWS) (bottom right) [10]**

Совокупность этих наборов данных позволила точно оценить гидрологическую изменчивость бассейна озера Танганьика в период с 2003 по 2021 годы и определить наиболее согласованные комбинации данных для корректного закрытия водного баланса [12] (рис.2).

Сравнивая исторические оценки Branchu & Bergonzini (2004) с результатами, полученными в настоящем исследовании, можно выделить как изменчивость годовых водных потоков, так и чувствительность водного баланса к выбранным наборам данных. Branchu & Bergonzini предложили значение годовых осадков около 35,5 км^3 и испарение озера (E) порядка 55,3 км^3/год [14].

На рисунке 2 показаны водные балансы, полученные путем объединения данных об осадках (PEra, PChirps, PGsmap, PImerg и PMswep) с данными об испарении и эвапотранспирации (EMod и EEra). Например, PEra_EEra представляет собой комбинацию общего количества осадков и общего испарения по данным ERA5. Каждый водный баланс наложен на ΔTWS для определения наборов данных об осадках, испарении и эвапотранспирации, которые способны замкнуть водный баланс бассейна озера Танганьика.

Многоисточниковые расчёты показывают значительно более гетерогенные значения осадков в зависимости от выбранного продукта:

P_{era} ≈ 41,3 км^3/год, (данные ERA5; Hersbach et al., 2020),

PChirps ≈ 29,42 км^3/год, (Funk et al., 2015),

PGsmap ≈ 39,1 км^3/год, (Kubota et al., 2020),

PImerg ≈ 42,24 км^3/год, (Kubota et al., 2020),

PMswep ≈ 25,53 км^3/год. (Beck et al., 2019).

Такая разбросанность иллюстрирует высокую неопределённость спутниковых оценок в тропических регионах и подтверждает важность использования нескольких продуктов перед выбором комбинации, позволяющей «закрыть» водный баланс [14].

Для оценки испарения и эвапотранспирации использование продукта *GLEV* (период 2003-2018) даёт оценку E около 51,55 км^3/год, тогда как реанализ *ERA5 (EEra)* показывает более низкие значения (≈ 40,37 км^3/год в зависимости от выбранной комбинации) [15]. Эти различия отражают как методологические расхождения (методы расчёта E/ET, корректировки поверхности), так и различия пространственного и временного разрешения используемых продуктов. Сравнение годового водного баланса озера Танганьика представлено в таблице 1.

Для оценок испарения и эвапотранспирации использование продукта GLEV (период 2003–2018; Sharma et al., 2019) [17] дает величину испарения около 51.55 км^3/год, в то время как повторного анализа ERA5 (EEra) предоставляет более низкие значения, порядка 40.37 км^3/год. Эти расхождения отражают как методологические различия между продуктами (подходы к расчету E/ET, корректировки по поверхности), так и неодинаковые пространственно-временные разрешения применяемых наборов данных.

Что касается притоков и стока, Branchu и Bergonzini оценивали суммарные притоки порядка ~29.5 км^3/год и сток из озера около 9.7 км^3/год. В рамках настоящего исследования вклад двух основных рек-бассейнов (Рузизи + Малагараси) оценивается в ≈ 9.97 км^3/год [Hydroweb/LEGOS], а наблюдаемый сток составляет около 2.45 км^3/год. Эти значения указывают на то, что за период 2003-2021 гидрологическая динамика бассейна существенно изменилась: притоки, концентрирующиеся в отдельных подпоймах (в особенности Малагараси), возросли и частично компенсировали увеличившиеся потери через эвапотранспирацию с акватории озера.

Разница между более ранними оценками суммарного стока и уменьшенной суммой притоков (Рузизи + Малагараси) указывает, что значительная доля стока в бассейне перераспределяется через подземное хранение и латеральные потоки, которые не фиксируются непосредственно на исследуемых створах рек.

Совместная интерпретация данных GRACE (ΔTWS) (Tapley et al., 2019) [17], Hydroweb (ΔSWS; LEGOS), и GLDAS (ΔSMS) (Rodell et al., 2004) [18] позволяет интегрировать локальные значения в масштабный гидрологический контекст и декомпозировать водный сигнал: вариации SWS (рассчитанные по альтиметрическим данным) объясняют значительную долю колебаний TWS, однако подпочвенное хранение остается ключевым фактором водного баланса.

Для основной цели исследования — определения оптимальных комбинаций данных для закрытия водного баланса — наилучшую согласованность между наблюдаемым ΔTWS (GRACE) и вычисленным ΔTWS (P — ETR — Q) дают комбинации, включающие PImerg или P_{era} на входе и GLEV/ERA5 для расчета ETR. Важно отметить необходимость перекрестной валидации: калибровки наземных дождемеров и дополнительных измерений расхода на второстепенных притоках, что позволит уменьшить неопределенность осадков (около 13 мм/месяц по межпродуктовому анализу) и оценок ETR (порядка 9-12 мм/месяц согласно современным исследованиям [Sharma et al., 2019; Hersbach et al., 2020]) [17-19].

Сравнительный анализ различных комбинаций данных по осадкам и эвапотранспирации показал, что наилучшую согласованность с наблюдениями GRACE обеспечивает комбинация PEra_EMod, объединяющая данные об осадках ERA5-Land с данными об испарении GLEV и эвапотранспирации MOD16A2. Коэффициент корреляции между рассчитанным водным балансом и изменениями общего запаса воды (ΔTWS) составил 0.89.

Антропогенное давление в бассейне озера Танганьика. Бассейн озера Танганьика является одним из наиболее густонаселенных регионов Центральной Африки, и быстрый демографический рост создает возрастающее давление на наземные и водные экосистемы. Ряд исследований показывает, что экологическая динамика озера, уже существенно изменяемая климатическими колебаниями, одновременно подвергается воздействию усиливающейся хозяйственной деятельности в пределах всего водосборного бассейна (Cohen et al., 2005; Niyoyitungiye et al., 2019) [20-21].

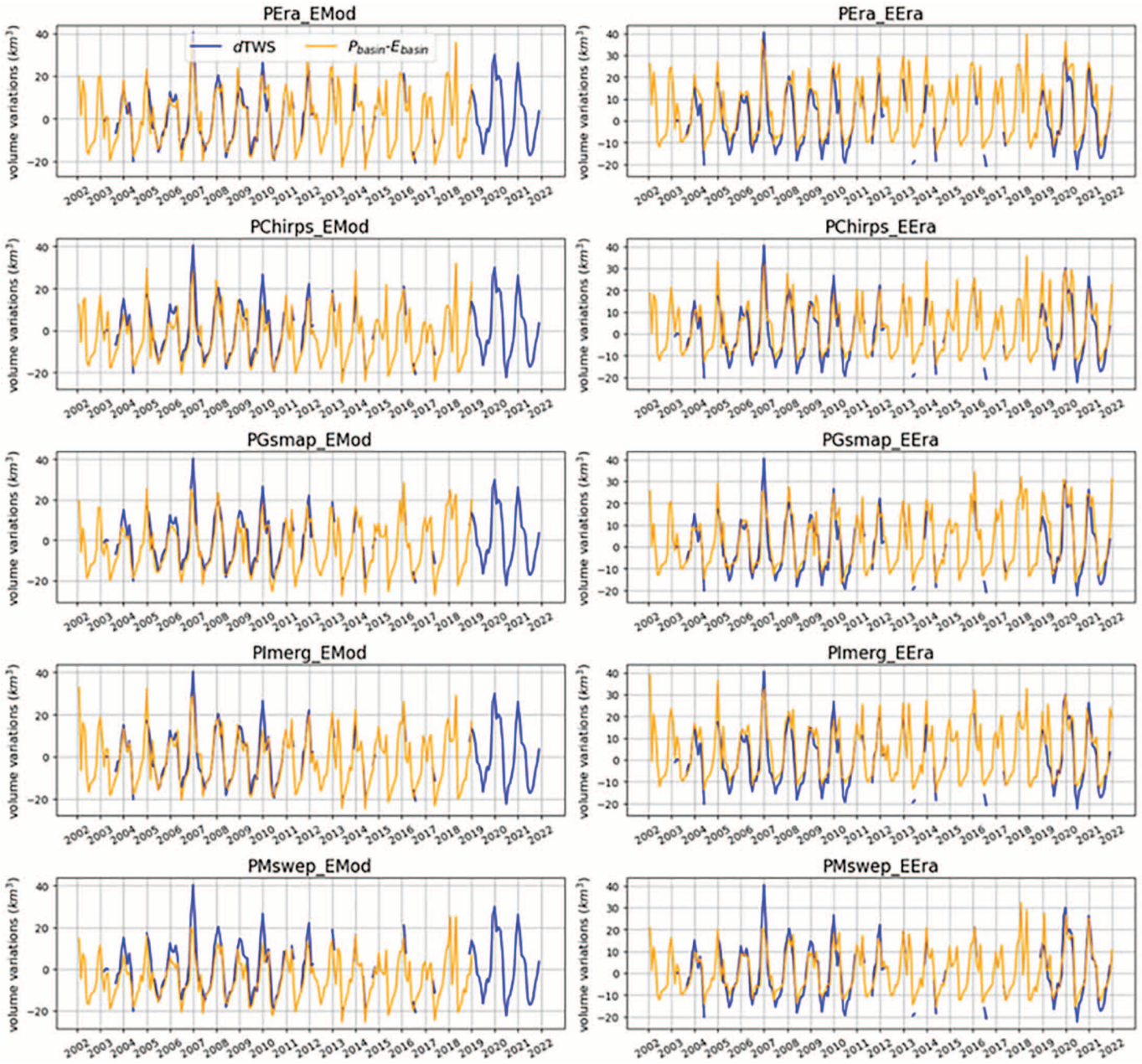

Рисунок 2. **Вариации ΔTWS (синий) и [P бассейна — E бассейна] (оранжевый). В левой колонке представлены комбинации данных осадков с EMod (GLEV E + MODIS ET), а в правой колонке — комбинации с EEra (суммарное испарение по ERA5). Поскольку временные ряды GLEV E прекращаются в 2018 году, комбинации с EMod также заканчиваются в 2018 году [13]**

Figure 2. **Variations in ΔTWS (blue) and [Pbasin — Ebasin] (orange). The left column shows combinations of rainfall data with EMod (GLEV E + MODIS ET), while the right column shows combinations with EEra (total evaporation from ERA5). Since the GLEV E time series ends in 2018, the combinations with EMod also terminate in 2018 [13]**

Эти антропогенные нагрузки устойчиво трансформируют гидрологические потоки, качество вод и эндемическое биоразнообразие одного из древнейших и наиболее стратифицированных озер мира. Батиметрическая карта и карта бассейна озера Танганьика представлена на рисунке 3.

Вырубка лесов сегодня является одним из ключевых факторов, влияющих на эрозионные и седиментационные процессы. Расчистка склонов под сельское хозяйство, особенно выраженная в бассейне реки Малагараси и на холмах, окружающих прибрежные города, усиливает поверхностный сток, снижает инфильтрацию и ускоряет перенос наносов в озеро (Karamage et al., 2016) [23]. Ряд исследований демонстрирует, что увеличение твердого стока в притоках приводит к росту мутности вод озера, снижению проникновения света и деградации бентосных местообитаний, играющих ключевую роль для многочисленных эндемичных видов (Donohue & Irvine, 2004; Cohen et al., 2005) [20]. Усиление седиментационной динамики способствует также постепенному изменению литоральной зоны, что приводит к утрате скалистых субстратов, благоприятных для цихлид, являющихся одним из символов озера Танганьика.

Таблица 1. **Сравнение годового водного баланса озера Танганьика [16]**

Table 1. **Comparison of the annual water balance of Lake Tanganyika [16]**

Данные Branchu и Bergonzini (2004)		Исследование				
Осадки (км³ / год)	35,5	PEra 41.3	PChirps 29,42	PGsmap 39,31	PImerg 42,24	PMsweep 25,53
Испарение (E) (км³/год)	55,3	GLEV (2003–2018) 51.55	EEra 40,37	-	-	-
Притоки (км³ / год)	29,5	9,97 (только Рузизи + Малагараси)	-	-	-	-
Расход воды (км³/год)	9,7	2,45	-	-	-	-

Одновременно загрязнение представляет собой серьезную угрозу для качества вод. Быстрорастущие городские зоны, такие как Бужумбура, Кигома, Увира и Калемие, сбрасывают бытовые и промышленные сточные воды, часто не прошедшие очистку, непосредственно в озеро или

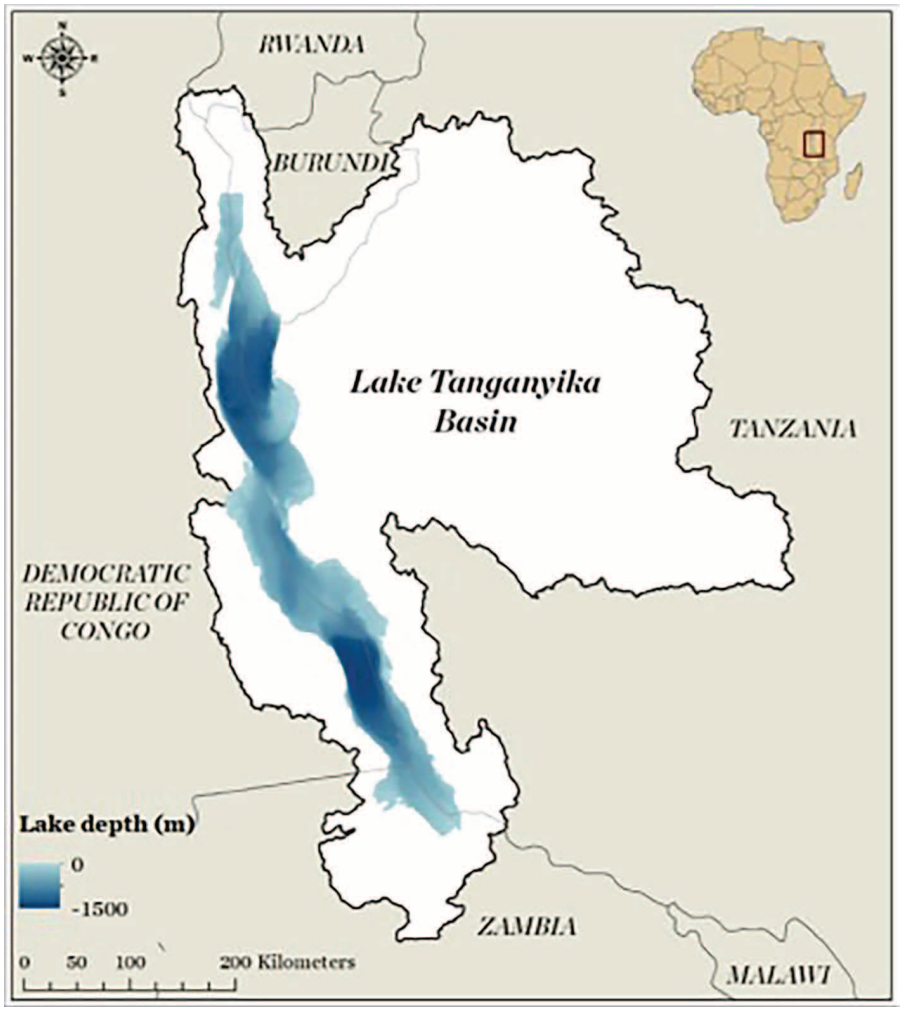

Рисунок 3.**Батиметрическая карта и карта бассейна озера Танганьика [22]**
Figure 3**. Bathymetric map and basin map of Lake Tanganyika [22]**

его притоки (Michel et al., 2003) [24]. Из-за недостаточного количества очистных сооружений или их отсутствия нагрузка питательными веществами, органическим материалом и химическими загрязнителями постоянно увеличивается. Исследования отмечают тревожный рост концентраций тяжелых металлов, патогенных микроорганизмов и новых типов загрязнителей в районах, расположенных рядом с городскими центрами (Schwefel et al., 2019) [25]. Это загрязнение способствует локальным эпизодам эвтрофикации, появлению цветения водорослей и снижению концентрации растворенного кислорода в глубинных слоях, что усугубляет естественную аноксию, характерную для глубоких вод озера.

Сельскохозяйственная деятельность и интенсивное использование химических удобрений в пригородных районах также способствуют ухудшению качества вод. Удобрения и пестициды активно смываются в водотоки в сезон дождей, особенно во время первых обильных осадков, вызывающих значительное вымывание почв. Этот процесс, хорошо задокументированный в других тропических бассейнах, также отмечается и для озера Танганьика, где он усиливает химическое и биологическое загрязнение литоральной зоны (Niyoyitungiye et al., 2019) [21].

Рыболовное давление является еще одним значительным аспектом антропогенного воздействия. Несмотря на важнейшее социально-экономическое значение рыболовства для местного населения, перелов привел к заметному сокращению некоторых ранее доминировавших видов. Уже в 2000-х годах Ogutu-Ohwayo & Balirwa (2006) сообщали о существенном снижении рыбных запасов, усугубленном применением незаконных методов лова, таких как мелкоячеистые сети, ночное освещение или нерегламентированные тралы. Эндемичные виды, биология которых тесно связана со стратифицированной структурой озера, особенно уязвимы перед антропогенными воздействиями, поскольку последние изменяют их местообитания, циклы размножения и доступность пищевых ресурсов.

Совокупные последствия антропогенных нагрузок проявляются целым рядом взаимосвязанных воздействий: изменением видового состава, снижением бентосного биоразнообразия, уменьшением уловов, ухудшением качества воды, ростом уязвимости перед природными рисками (в частности, наводнениями). Сильные наводнения в районе Гатумба в 2021 году подчеркивают необходимость интеграции антропогенных динамик в гидрологические модели, в том числе посредством оценок ΔTWS и ΔSWS, полученных из спутниковых данных GRACE и HYDROWEB, позволяющих связать процессы на суше с изменениями водных объемов озера (Biancamaria et al., 2019; Tapley et al., 2019) [7, 26].

Наконец, потенциальные проекты нефтедобычи в регионе представляют собой новый риск, учитывая чрезвычайно длительное время обновления вод (около 440 лет) и крайне хрупкое биогеохимическое равновесие озера (Bootsma & Hecky, 1993) [27]. Как показали Abila et al. (2016) [28], авария, связанная с разливом нефти в системе озера с таким ограниченным водообменом, могла бы привести к катастрофическим и потенциально необратимым последствиям.

В этих условиях устойчивое управление озером Танганьика требует интегрированного подхода, объединяющего защиту наземных экосистем бассейна, регулирование водопользования, управление городскими отходами, мониторинг рыбных ресурсов и систематическое использование современных спутниковых данных для непрерывного наблюдения водного баланса и антропогенных нагрузок.

Результаты.

Тенденция изменения общего водного запаса (TWS)

Спутниковые наблюдения GRACE и GRACE-FO фиксируют значительные изменения общего запаса воды (TWS) в бассейне озера Танганьика в период с 2003 по 2021 годы. В 2003–2006 гг. отмечается начальная тенденция к снижению, после чего наблюдается устойчивый рост TWS, коррелирующий с усилением осадков в отдельных субрегионах, в частности в бассейне Малагараси [Tapley et al., 2004; Nigatu et al., 2021] [29-30]. Такая динамика отражает совокупное влияние климатических факторов и региональной гидрологической изменчивости.

Сравнительный анализ различных комбинаций данных по осадкам и испарении/эвапотранспирации показывает, что набор *PEra_EMod* является наиболее согласованным для «закрытия» водного баланса. Данная комбинация относит около 80–85% всех притоков к осадкам и примерно 95% всех потерь к испарению и эвапотранспирации, что эффективно согласуется с независимыми данными TWS, полученными по GRACE. Это подтверждает целесообразность совместного применения реанализа ERA5 и данных MODIS (GLEV, MOD16A2) для точного восстановления основных гидрологических потоков бассейна.

Гидродинамические изменения и усиление стратификации

Трехмерное гидродинамическое моделирование озера Танганьика показывает, что повышение температуры поверхностного слоя на +3 ± 0,5 °C к 2100 году по климатическому сценарию RCP 8.5 приведет к существенному усилению термической стратификации [Tierney et al., 2010; Verburg et al.,2023] [31-32]. Более устойчивая стратификация ограничивает обмен между хорошо насыщенным кислородом эпилимнионом и аноксичным гиполимнионом, снижая вертикальное перемешивание и препятствуя подъему глубинных питательных веществ в фотическую зону.

Снижение вертикального перемешивания вызывает серьезные последствия:

- ослабление кислородного режима глубинных слоев;
- значительное уменьшение первичной продуктивности;
- перестройку трофических сетей [O'Reilly et al., 2003] [33].

Эти процессы усиливают уязвимость эндемичных видов озера, включая специализированных цихлид, зависящих от стабильного цикла поступления питательных веществ для питания и размножения. Отдельные модели прогнозируют даже частичный коллапс экосистемы при сохранении текущих тенденций [Verburg et al., 2023] [32].

Рост гидрологической изменчивости, включая экстремальные наводнения 2020-2021 годов, подтверждает уязвимость прибрежных и урбанизированных зон [Biancamaria et al., 2019] [26]. Данные ΔTWS по GRACE показывают прямую связь между увеличением водного запаса в верховьях и масштабом наводнений, наблюдавшихся в Гатумбе и на равнине Рузизи.

Заключение и рекомендации. Проведенное исследование позволило не только уточнить структуру современного водного баланса озера Танганьика, но и разработать практически значимый инструмент для снижения рисков чрезвычайных ситуаций. Количественно установлено, что подземные воды являются доминирующим компонентом общего водного запаса бассейна (57.7%), в то время как на долю поверхностных вод озера приходится 41.8%. Выявленная высокая корреляция (~91%) между изменениями общего запаса воды (TWS) и объема вод озера (SWS) с временным лагом в один месяц открывает возможность для создания системы раннего оповещения о наводнениях. Показано, что прогнозирование объема поверхностных вод в мае (месяц максимального риска) на основе данных TWS за февраль, март и апрель обеспечивает точность от 85% до 95%.

Это означает, что спутниковые данные гравиметрической миссии GRACE могут быть эффективно интегрированы в национальные системы гидрологического мониторинга для заблаговременного (за 1-3 месяца) предупреждения о катастрофических подъемах уровня воды, что позволит минимизировать социально-экономический ущерб и предотвратить гибель людей в уязвимых прибрежных зонах, подобных тем, что пострадали от разрушительных наводнений 2020–2021 годов.

Мониторинг водного баланса озера Танганьика с использованием спутниковых данных (GRACE TWS, HYDROWEB SWS, GLDAS-CLSM SMS) представляет собой ключевой инструмент для прогнозирования гидрологических изменений и их социально-экологических последствий.

Полученные результаты подчеркивают необходимость:

- усиления мер по лесовосстановлению и борьбе с эрозией для снижения наносов;
- создания защитных буферных зон на побережье;
- улучшения систем управления бытовыми и промышленными отходами в прибрежных городах;
- регулирования сельскохозяйственных практик для ограничения применения агрохимикатов;
- строгого контроля рыболовства для защиты эндемичных видов;
- интеграции спутниковых данных в национальные системы гидрологического мониторинга и раннего предупреждения;
- стимулирования междисциплинарных исследований, объединяющих гидрологию, климатологию, экологию и социально-экономические науки для разработки устойчивых адаптационных стратегий до 2050–2100 годов.

Комплекс этих мер является критически важным для сохранения уникальной экосистемы мирового значения, находящейся под угрозой из-за совмещения климатических изменений и усиливающихся антропогенных нагрузок.

Список источников, References

1. Tapley, B.D., & Reager, J.T. (2025). Nonlinearity in the trend of GRACE time series: improving understanding of global total water storage changes over two decades. Environmental Earth Sciences, 84, 384. URL: http://link.springer.com/article/10.1007/s12665-025-12389-9.

2. Verburg, P., Toussaint, F., Alonso, A., & Vanclooster, M. (2025). Leveraging 20 Years of Remote Sensing to Characterize Surface Phytoplankton Seasonality and Long-Term Trends in Lake Tanganyika [preprint]. EGUsphere. URL: http://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1326.

3. Rodell, M., et al. (2020). TELLUS_GLDAS-NOAH3.3_TWS Anomaly Monthly Dataset for GRACE/GRACE-FO Water Storage Studies. Dataset. URL: http://doi.org/10.5067/GGDAS-3NH33.

4. Beck, H.E., et al. (2017). MSWEP V2 precipitation data: Combining gauge, satellite, and meteorological model data. Earth System Science Data, 9, 483–507. URL: http://www.gloh2o.org/mswep.

5. Plisnier, P.-D., Toussaint, F., Alonso, A., & Vanclooster, M. (2023). Lake Tanganyika: Status, challenges, and opportunities for research collaborations. Journal of Great Lakes Research, 49(6), 102223. URL: http://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.07.009.

6. Landerer, F.W., Flechtner, F.M., Save, H., et al. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. Geophysical Research Letters, 47(12). URL: http://doi.org/10.1029/2020GL088306.

7. Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., et al. (2019). Contributions of-GRACE to understanding climate change. Nature Climate Change, 9, 358–369. URL: http://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2.

8. Pham-Duc, B., Sylvestre, F., Papa, F., et al. (2020). Lake water storage variations in East Africa derived from satellite observations (GRACE, altimetry, MODIS). Remote Sensing, 12(8), 1234. URL: http://doi.org/10.3390/rs12081234.

9. Biancamaria, S., Lemoine, J.-M., Ramilien, G., et al. (2019). Satellite-based hydrological indicators to monitor water resources over large river basins. Remote Sensing of Environment, 221, 386–402. URL: http://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.028.

10. http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352938524000466-gr5_lrg.jpg.

11. https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352938524000466-gr3.jpg.

12. Hu, X., Ma, R., Zhang, Y., et al. (2021). Combining GRACE, satellite altimetry and hydrological modeling for groundwater assessment in large lake basins. Journal of Hydrology, 600, 126569. URL: http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126569.

13. http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352938524000466-gr5.jpg.

14. GLEV (Global Land Evapotranspiration). Biancamaria, S., et al. (2019). Satellite-based hydrological indicators to monitor water resources over large river basins. Remote Sensing of Environment, 221, 386-402. URL: http://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.028.

15. ERA5, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). URL: http://cds.climate.copernicus.eu.

16. Branchu, P., & Bergonzini, L. (2004). Hydrological and environmental changes of Lake Tanganyika. Journal of African Earth Sciences, 39(1–2), 1–6. URL: http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.04.006.

17. Sharma, A., Wada, Y., & Reager, J.T. (2019). Global high-resolution evapotranspiration from remote sensing products (GLEV). Hydrology and Earth System Sciences, 23, 2527–2552. URL: http://doi.org/10.5194/hess-23-2527-2019.

18. Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., ... & Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(3), 381-394. URL: http://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381.

19. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. URL: http://doi.org/10.1002/qj.3803.

20. Cohen, A.S., Palacios-Fest, M.R., McGill, J., Swarzenski, P.W., Verschuren, D., Sinyinza, R., ... & Nkotagu, H. (2005). Paleolimnological investigations of anthropogenic environmental change in Lake Tanganyika: I. An introduction to the project. Journal of Paleolimnology, 34, 1–18. URL: http://doi.org/10.1007/s10933-005-2406-0.

21. Niyoyitungiye, P., Guha, S., & Wali, E. (2019). Assessment of anthropogenic pressures and water quality degradation in the Lake Tanganyika basin. Environmental Monitoring and Assessment, 191, 723. URL: http://doi.org/10.1007/s10661-019-7910-1.

22. http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0380133023001946-gr1.jpg.

23. Karamage, F., Shao, H., Chen, X., Ndayisaba, F., & Nahayo, L. (2016). Deforestation effects on soil erosion in Central Africa. Remote Sensing, 8(7), 531. URL: http://doi.org/10.3390/rs8070531.

24. Michel, A., Ntakimazi, G., & Plisnier, P.D. (2003). Pollution and eutrophication in Lake Tanganyika. Aquatic Ecosystem Health & Management, 6(3), 283-296. URL: https://doi.org/10.1080/14634980301481.

25. Schwefel, R., Gaillardet, J., & Bouchez, J. (2019). Heavy metal contamination in tropical lake systems: the case of Lake Tanganyika. Science of the Total. Environment, 660, 116-125. URL: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.432.

26. Biancamaria, S., Lettenmaier, D.P., & Pavelsky, T.M. (2019). The SWOT mission and its capabilities. Surveys in Geophysics, 40, 131–153. URL: https://doi.org/10.1007/s10712-018-9470-4

27. Bootsma, H.A., & Hecky, R.E. (1993). Conservation of the African Great Lakes: a limnological perspective. Conservation Biology, 7(3), 644-656. URL: http://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1993.07030644.x.

28. Abila, R., Kitaka, N., & Masese, F.O. (2016). Potential environmental impacts of oil exploration in East African Rift lakes. Environmental Monitoring and Assessment, 188, 565. URL: http://doi.org/10.1007/s10661-016-5570-1.

29. Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., and Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. Geophysical Research Letters, 31(9), L09607. URL: http://doi.org/10.1029/2004GL019920.

30. Nigatu, Z.M., Alemayehu, T., Soromessa, T., and Feyisa, G.L. (2021). Hydrological responses to climate variability using GRACE data in tropical basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100856. URL: http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100856.

31. Tierney, J.E., Mayes, M.T., Meyer, N., Johnson, C., and Cohen, A.S. (2010). Late-twentieth-century warming in Lake Tanganyika amplified by reduced mixing. *Nature Geoscience*, 3(6), 422-425. URL: http://doi.org/10.1038/ngeo865.

32. Verburg, P., Hecky, R.E., and Kling, H. (2023). Climate-induced stratification changes and ecological vulnerability in Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 850, 1123-1142. URL: http://doi.org/10.1007/s10750-022-05072-0.

33. O'Reilly, C.M., Alin, S.R., Plisnier, P.D., Cohen, A.S., and McKee, B.A. (2003). Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika. *Nature*, 424, 766-768. URL: https://doi.org/10.1038/nature01833.

Информация об авторах:

Вершинин Валентин Валентинович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и природопользования,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9046-827X, Scopus ID: 57190580623, Researcher ID: O-1151-2017, v.vershinin.v@mail.ru
Нтиндекуре Арлет Рейн, аспирантка кафедры геоэкологии и природопользования, Ntindekure95@mail.ru

Information about the authors:

Valentin V. Vershinin, doctor of economic sciences, professor, head of the department of geoecology and nature management,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9046-827X, Scopus ID: 57190580623, Researcher ID: O-1151-2017, v.vershinin.v@mail.ru
Ntindekure Arlette Reine, postgraduate student of the department of geoecology and nature management, Ntindekure95@mail.ru

✉ **v.vershinin.v@mail.ru**