

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.8.03

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-314-331

**Испарение воды из водохранилища 16 Тишрин в Сирии:
измерение объема и оценка экономических последствий**

Хозефа Алали¹, Алексей Васильевич Перминов²

^{1, 2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Москва, Российская Федерация

¹Hothefa.alali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3691-7230>

²alexperminov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2848-1793>

Аннотация. Цель: исследование явления испарения из водохранилища 16 Тишрин в Сирии и комплексный анализ измерения его объема с оценкой экономических последствий. **Материалы и методы.** В исследовании использованы ежедневные данные о количестве осадков CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), сведения об испарении по данным спектрорадиометра MODIS MOD16A2 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), а также данные спутника Sentinel-2 для оценки площади зеркала водохранилища с использованием алгоритма MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) за период с октября 2021 г. по сентябрь 2022 г. С помощью программы Microsoft Excel определены объем водохранилища и уровни воды в нем для каждого месяца гидрологического года. **Результаты** этого исследования предоставляют важную информацию об объеме воды, теряемой в результате испарения с поверхности водохранилища 16 Тишрин в Сирии. Общее количество потерянной на испарение воды составило 5,7 млн куб. м/год. Такой значительный объем испарения приводит к экономическим потерям, оцениваемым в 856946,25 долл. США/год. Вышеуказанное подчеркивает острую необходимость реализации стратегий по минимизации экономических последствий и оптимизации управления водными ресурсами. **Выводы.** Понимание объемов потерь и экономических последствий испарения имеет решающее значение для эффективного управления водными ресурсами. Решая эти задачи и принимая обоснованные решения на основе рассчитанного экономического ущерба, можно повысить сохранность водных ресурсов в водохранилище 16 Тишрин и низовьях р. Ал Кабир Ал Шамали.

Ключевые слова: CHIRPS, водохранилище 16 Тишрин, MOD16A2GF, Sentinel-2, испарение, потери на испарение, экономический ущерб, площадь зеркала, объем воды, MNDWI

Для цитирования: Алали Х., Перминов А. В. Испарение воды из водохранилища 16 Тишрин в Сирии: измерение объема и оценка экономических последствий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 314–331. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-314-331>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Water evaporation from the 16 Tishrin reservoir in Syria:
volume measurement and economic impact assessment**

Alali Hothefa¹, Aleksey V. Perminov²

^{1, 2}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

¹Hothefa.alali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3691-7230>

²alexperminov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2848-1793>

Abstract. Purpose: to study the phenomenon of evaporation from the 16 Tishrin reservoir in Syria and a comprehensive analysis of its volume measurement with an economic consequence assessment. **Materials and methods.** The study used CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) daily precipitation data, MODIS MOD16A2 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) evaporation data, and Sentinel-2 satellite data to estimate the area of the reservoir surface using the algorithm MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) for the period from October 2021 to September 2022. Using the Microsoft Excel program, the reservoir storage and the water levels in it were determined for each month of the hydrological year. **Results.** Results of this study provide important information about the amount of water lost by evaporation from the surface of the 16 Tishrin reservoir in Syria. The total amount of water lost to evaporation amounted to 5.7 million cubic meters/year. This significant amount of evaporation results in economic losses estimated as \$856,946.25/year. The abovesaid highlights the urgent need to implement strategies to minimize economic impacts and optimize water management. **Conclusions.** Understanding the losses and economic impact of evaporation is critical to effective water management. By solving these problems and making informed decisions based on the calculated economic damage, it is possible to increase the preservation of water resources in the 16 Tishrin reservoir and the lower reaches of the Al Kabir Al Shamali river.

Keywords: CHIRPS, 16 Tishrin reservoir, MOD16A2GF, Sentinel-2, evaporation, evaporation losses, economic damage, mirror area, water-surface area, MNDWI

For citation: Alali H., Perminov A. V. Water evaporation from the 16 Tishrin reservoir in Syria: volume measurement and economic impact assessment. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):314–331. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-314-331>.

Введение. Водохранилища играют решающую роль в жизни общества и выполняют несколько важных функций, включая хранение воды, борьбу с наводнениями, производство гидроэлектроэнергии, ирригацию и сельское хозяйство, водоснабжение и питьевую воду, отдых и туризм, поддержку экосистем. Понимание водного баланса водохранилища необходимо для обеспечения его оптимальной работы и устойчивого управления водными ресурсами. Ключевыми компонентами водного баланса водохранилища являются: приток, отток, накопление, испарение и осадки. При этом испарение с поверхности водохранилища представляет собой серьезную проблему из-за его динамического характера и влияния на водобеспеченность [1, 2].

Оценка величины испарения с поверхности водохранилища важна по нескольким причинам.

1 Управление водными ресурсами: испарение представляет собой значительную потерю воды из водохранилища. Играет важную роль в обеспечении устойчивого и эффективного использования водных ресурсов [3–5].

2 Эксплуатация водохранилища и планирование: скорость испарения помогает определить стратегию эксплуатации водохранилища. Принимая во внимание потери на испарение, организация, управляющая работой водохранилища, может оптимизировать попуски воды в нижний бьеф, гарантируя сохранение достаточного количества воды для различных целей, таких как орошение, питьевое водоснабжение, производство гидроэлектроэнергии и поддержание экосистемы реки.

3 Воздействие на окружающую среду и экологию: испарение играет важную роль в экологической динамике водохранилища. Потеря воды в результате испарения влияет на ее качество, концентрацию растворенных в ней веществ и уровень питательных веществ.

4 Экономические соображения: потери в результате испарения могут иметь экономические последствия, особенно в регионах, где существует проблема дефицита воды.

Точная оценка объема испарившейся из водохранилища воды обеспечивает эффективное использование его водных ресурсов. Однако эти потери воды часто игнорируются в планах управления речными бассейнами или при анализе затрат и выгод новых построенных плотин. Причины в том, что очень трудно оценить количество воды, теряемой на испарение, также существуют сложности получения данных о площади зеркала водной поверхности водохранилища [6].

Целью работы являлось исследование явления испарения из водохранилища 16 Тишрин в Сирии и комплексный анализ изменения его объема с оценкой экономических последствий.

Объект исследования. Плотина водохранилища 16 Тишрин считается самой важной плотиной в области Латакия и на сирийском побережье, она расположена на р. Ал Кабир Ал Шамали, в 20 км к северо-востоку от г. Латакия (рисунок 1).

Водоохранилище используется в питьевых и ирригационных целях, имеет полезный объем 130 млн м³, его общий объем составляет 210 млн м³ при норме осадков в районе объекта исследований 1000 мм/год и среднегодовом стоке р. Ал Кабир Ал Шамали 325 млн м³ [7, 8].

Материалы и методы исследований. Методы дистанционного зондирования Земли представляют собой набор современных технологий, которые используются для сбора информации об окружающей среде, земной поверхности и природных ресурсах с учетом изображений и данных, полученных с датчиков спутников, самолетов и других транспортных средств. Для исследования явления испарения воды с поверхности водохранилища 16 Тишрин были использованы следующие материалы.

1 **Набор данных CHIRPS** об осадках с высоким разрешением, разработанный Группой климатических опасностей Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Он объединяет спутниковые снимки, наблюдения наземных станций и другие климатические данные для получения комплексных и точных оценок осадков в глобальном масштабе.

Набор данных CHIRPS объединяет наблюдения с геостационарных спутников, таких как Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) Национального управления океанических и атмосферных исследований, а также данные об осадках с датчиков дождя и из других метеорологических источников. Объединяя данные различных источников информации, CHIRPS стремится преодолеть ограничения, связанные с опорой исключительно на наземные наблюдения, особенно в регионах с ограниченным или редким охватом станций (рисунок 2) [9].

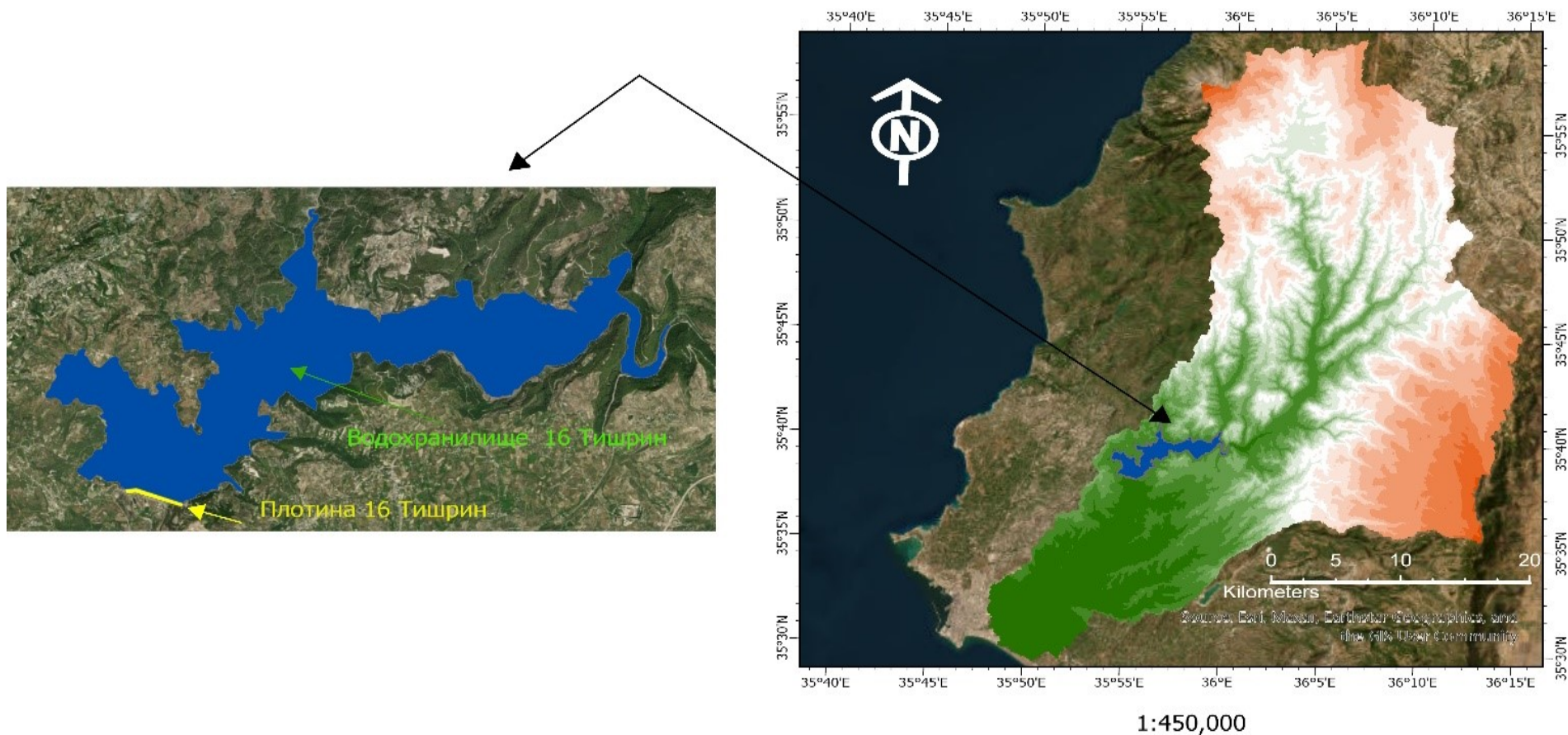


Рисунок 1 – Местонахождение водохранилища 16 Тишрин в водосборном бассейне р. Ал Кабир Ал Шамали (карта построена авторами в программе ArcGis Pro по данным цифровых моделей рельефа ASTER V3)

Figure 1 – Location of the 16 Tishrin reservoir in the catchment area of the Al Kabir Al Shamali river (the map was drawn by the authors in the ArcGis Pro program according to ASTER V3 digital terrain models)

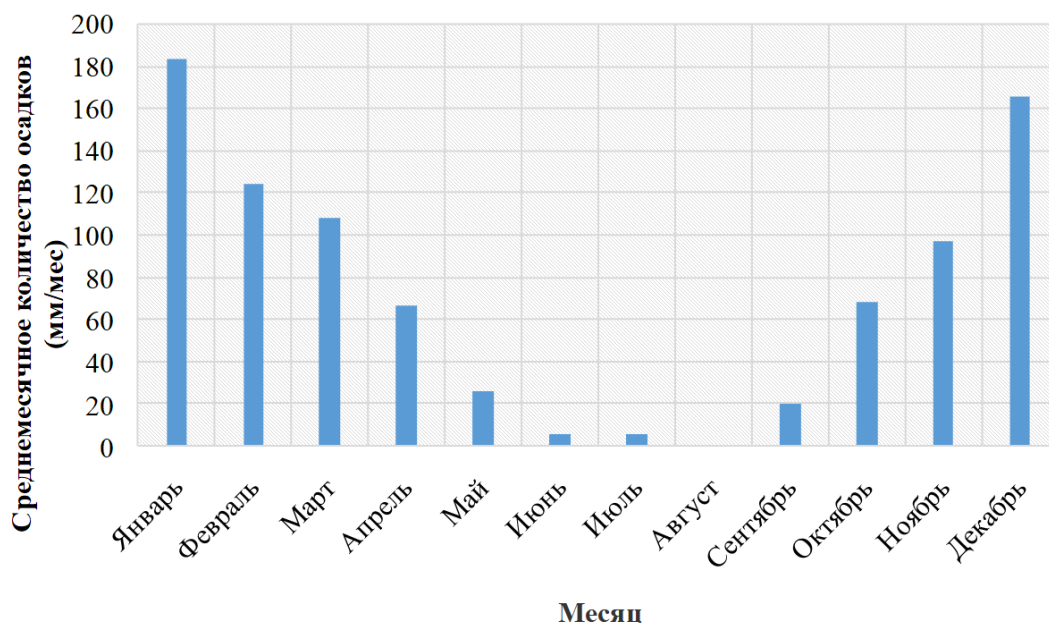


Рисунок 2 – Диаграмма среднемесячного количества осадков для района водохранилища 16 Тишрин за период с 1981 по 2023 г. (построена авторами в программе Microsoft Excel 2013 по данным CHIRPS Daily)

Figure 2 – Diagram of average monthly precipitation for the area of the 16 Tishrin reservoir for the period from 1981 to 2023 (designed by the authors in Microsoft Excel 2013 according to CHIRPS Daily)

2 Данные спектрорадиометра MODIS (продукт MOD16A2).

MOD16A2 – это продукт, который предоставляет результаты оценки эвапотранспирации (суммарного испарения) (*ET*) на основе спутниковых наблюдений. Принцип работы MOD16A2 заключается в использовании данных дистанционного зондирования для оценки количества воды, которая испаряется и переносится растительностью и другими поверхностями Земли.

Основной принцип работы продукта MOD16A2 основан на уравнении энергетического баланса, которое гласит, что энергия, поглощенная поверхностью Земли за счет поступающей солнечной радиации, должна быть уравновешена энергией, потерянной в результате различных процессов, включая испарение. MOD16A2 определяет испарение путем количественной оценки энергии, доступной для испарения и транспирации, на основе температуры поверхности Земли, индексов растительности и метеорологических данных.

Алгоритм использует уравнение Пенмана – Монтейта, хорошо зарекомендовавшее себя в качестве метода оценки потенциального испарения. Он включает характеристики растительности, свойства почвы и метеорологические условия, чтобы учесть влияние различных факторов окружающей среды на эвапотранспирацию.

MOD16A2 предоставляет оценки эвапотранспирации с пространственным разрешением 1 км и временным разрешением 8 дней. Он охватывает широкий спектр экосистем и применим как для растительных, так и для нерастительных поверхностей Земли (рисунок 3) [10].

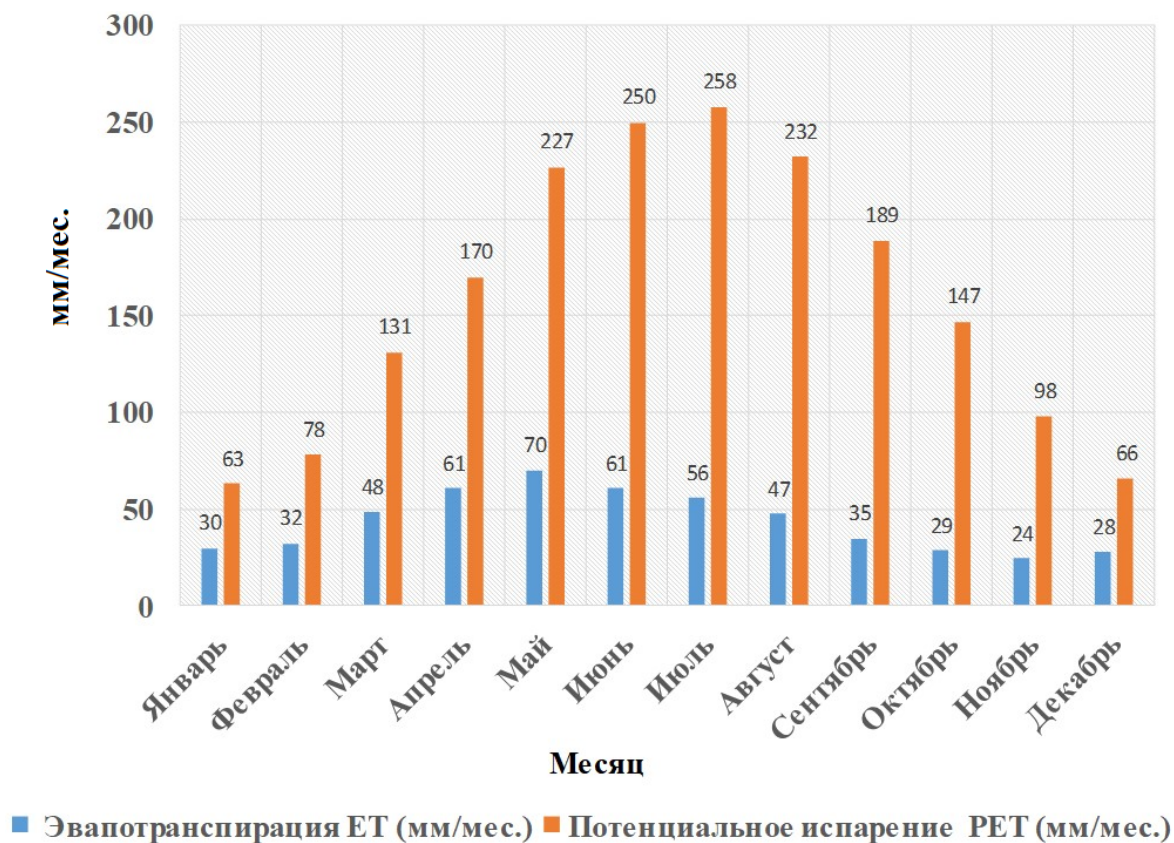


Рисунок 3 – Диаграмма среднемесячной эвапотранспирации и потенциального испарения из водохранилища 16 Тишрин за период 2000–2021 гг. (построена авторами в программе Microsoft Excel 2013 по данным MOD16A2GF_500m)

Figure 3 – Diagram of average monthly evapotranspiration and potential evaporation from the 16 Tishrin reservoir for the period 2000–2021 (designed by the authors in Microsoft Excel 2013 according to MOD16A2GF_500m)

3 Расчет чистой скорости испарения (NET Evaporation Rates): потенциальное испарение (*PET*) представляет собой максимально возможное испарение, которое могло бы произойти в идеальных условиях, предполагающих достаточное количество воды и отсутствие ограничений на наличие энергии для испарения. Это в первую очередь обусловлено климатическими факторами, такими как температура, солнечная радиация, влажность и скорость ветра.

Испарение воды с поверхности водохранилища может создать локальное скопление влажного воздуха над водой, что замедляет процесс испарения. Это связано с тем, что влажный воздух над водной поверхностью уже содержит определенное количество водяного пара, поэтому градиент насыщения между водой и воздухом уменьшается, что препятствует быстрому испарению.

Ветер может сместить этот влажный слой воздуха, особенно если его скорость достаточно высока. Это может способствовать более интенсивному испарению с поверхности воды. Ветер также может перемешивать воздушные массы, что может способствовать увеличению обмена влагой между воздухом и водой.

Тем не менее ветер, дующий с поверхности водоема, может также принести влагу в воздушный слой над водной поверхностью, особенно если вода теплая или если поверхность водоема нагревается солнечным излучением. Это может вызвать конденсацию влаги и образование облаков или тумана, что в свою очередь может препятствовать дальнейшему испарению и уменьшить его интенсивность. Поэтому маловероятно, что фактическая скорость испарения с поверхности водохранилища может достичь 100 % от потенциальной испаряемости (*PET*). Ввиду этого нужно уменьшить потенциальное испарение (*PET*), чтобы смоделировать фактическую скорость испарения.

Геологическая служба США провела исследования в водно-

болотных угодьях Эверглейдс на юге Флориды и обнаружила, что фактическое испарение с открытой водной поверхности составляет 80 % от потенциального испарения (PET). Таким образом, можно использовать эти значения благодаря схожести климатических условий [11] и определить чистую скорость испарения (мм/мес.) над рассматриваемым водохранилищем:

$$\text{Расчет чистой скорости испарения} = 0,8 \times PET - P,$$

где PET – потенциальное испарение, мм/мес.;

P – количество осадков, мм/мес.

4 Расчет месячного объема потерь воды на испарение из водохранилища. Определяем площадь зеркала водохранилища 16 Тишрин, затем используем следующую формулу:

$$V = X \times H,$$

где V – объем испарившейся воды, м³;

X – площадь зеркала водохранилища, м²;

H – высота слоя испарившейся воды, м.

Однако площадь зеркала водохранилища никогда не бывает статичной, она постоянно меняется, поскольку объем воды в водохранилище либо увеличивается, либо уменьшается.

Чтобы решить эту задачу и вычислить площадь зеркала водохранилища, было учтено 12 изображений со спутника Sentinel-2 за период с октября 2021 г. по сентябрь 2022 г. Далее был использован алгоритм выделения водной поверхности (водного зеркала) MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [12, 13]:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}},$$

где Green – зеленый канал спутника Sentinel-2;

MIR – инфракрасный канал спутника Sentinel-2.

Sentinel-2 – это спутник, разработанный Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках программы Copernicus, которая является евро-

пейской инициативой по наблюдению Земли и мониторингу окружающей среды. Цель миссии Sentinel-2 – получение оптических изображений высокого разрешения суши и прибрежных районов Земли для различного использования, включая сельское и лесное хозяйство, картирование почвенно-растительного покрова и мониторинг окружающей среды [14].

На спутнике Sentinel-2 установлен прибор для получения мультиспектральных изображений под названием MultiSpectral Instrument (MSI). MSI снимает данные в 13 спектральных диапазонах, охватывающих широкий диапазон длин волн от видимой до ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областей электромагнитного спектра. Пространственное разрешение снимков составляет от 10 до 60 м в зависимости от спектрального диапазона [14].

После получения площади зеркала водохранилища можно использовать следующее уравнение для получения объема воды y , соответствующего данной площади, м^3 :

$$y = -3.12638803734444\text{E} - 13X^6 + 1.36478159761561\text{E} - 11X^5 - \\ - 1.74819219703569\text{E} - 10X^4 + 2.85418558277530\text{E} - 09X^3 - \\ - 4.07699824086193\text{E} - 08X^2 + 1.75889439793553\text{E} + 01X - \\ - 7.04204092209065\text{E} - 07,$$

где X – площадь зеркала водохранилища, м^2 .

Далее необходимо рассчитать объем осадков, выпавших на поверхность водохранилища:

$$V(P) = \frac{\text{СРЗНАЧ}(P)}{1000} \times X \times \frac{1000000}{1000000},$$

где $V(P)$ – объем осадков, выпавших на поверхность водохранилища, м^3 ;

СРЗНАЧ(P) – среднемесячное количество осадков для водохранилища 16 Тишрин, мм.

Определим фактические потери на испарение с поверхности водохранилища по формуле:

$$V(PET) = \frac{\text{СРЗНАЧ (PET)}}{1000} \times X \times \frac{1000000}{1000000},$$

где $V(PET)$ – объем фактических потерь воды на испарение с поверхности водохранилища, м³;

СРЗНАЧ (PET) – среднемесячное потенциальное испарение, мм.

На последнем этапе вычисляем разницу между фактическими потерями на испарение и объемом выпавших осадков для каждого месяца года, результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета потерь воды на испарение из водохранилища 16 Тишрин за гидрологический год (2021–2022 гг.)

Table 1 – Calculation results of water losses due to evaporation from the 16 Tishrin reservoir for the hydrological year (2021–2022)

Месяц	Среднемесячное количество осадков (по данным CHIRPS), мм/мес.	Потенциальное испарение (по данным MODIS PET) PET, мм/мес.	Объем осадков, выпавших на поверхность водохранилища, млн м ³	Фактические потери на испарение с поверхности водохранилища, млн м ³	Разница объемов потерь на испарение и выпавших осадков, млн м ³	Объем воды в водохранилище у, млн м ³	Уровень воды в водохранилище, м	Площадь зеркала водохранилища X, км ²
Октябрь	66,49	146,81	0,5	0,9	0,4	138,9	69,5	7,9
Ноябрь	84,09	98,22	0,8	0,7	0	158,9	71,9	9,0
Декабрь	178,03	65,71	1,3	0,4	–0,9	131,8	69,0	7,5
Январь	189,36	63,12	1,5	0,4	–1,1	138,8	69,4	7,9
Февраль	129,71	78,06	1,4	0,7	–0,7	192,4	75,5	10,9
Март	95,56	131,07	0,9	1	0,1	168,2	72,9	9,6
Апрель	69,43	169,98	0,5	1	0,5	130,2	68,6	7,4
Май	24,80	226,75	0,3	1,8	1,6	177,5	73,9	10,1
Июнь	5,88	249,92	0,1	2	1,9	175,7	73,6	10,0
Июль	4,47	257,88	0	1,9	1,9	163,4	72,3	9,3
Август	0,07	231,88	0	1	1	97,3	64,8	5,5
Сентябрь	23,40	188,87	0,2	1,3	1,1	152,2	71,2	8,7
Сумма	871,29	1908,27	7,5	13,2	5,7			

5 Оценка экономических последствий потерь воды на испарение:

после оценки объема потерь воды на испарение из водохранилища рассчитаем экономический ущерб от испарения на основании следующих данных.

1 Ежедневная потребность в питьевой воде на душу населения, по данным Всемирной организации здравоохранения, составляет 50 л/(чел.·день), или 18250 л/(чел.·год) [15].

2 Допустим, что годовая потребность в оросительной воде составляет 22000 м³/(га·год). Это количество рассчитывается исходя из водопотребления культур, которое составляет 8000 м³/(га·год), а также учитывается 25 % потерь воды на транспортировку в каналах [16].

3 Допустим, что цена бытового водоснабжения 0,6 долл. США/м³ и минимальная чистая выгода от орошаемых сельскохозяйственных земель составляет 500 долл. США/(га·год), результаты оценки представлены в таблице 2 [17].

Таблица 2 – Количественная оценка экономических последствий испарения с поверхности водохранилища 16 Тишрин
Table 2 – Quantitative economic impacts of evaporation from the surface of the 16 Tishrin reservoir

Параметр	Значение	Единица измерения
1	2	3
Исходные данные		
1 Объем испарившейся воды	5,7	млн м ³ /год
	5700000	м ³ /год
	5700000000	л/год
2 Ежедневная потребность в питьевой воде на душу населения	50	л/(чел.·день)
	18250	л/(чел.·год)
3 Водопотребление культур (ET культур)	8,000	м ³ /(га·год)
Эффективность транспортировки	75 %	%
Эффективность применения орошения	50 %	%
Необходимое количество воды	21333	м ³ /(га·год)
Потребность в орошении (округленно)	22000	м ³ /(га·год)
4 Экономические факторы		
Стоимость бытового водоснабжения	0,6	долл. США/м ³
Минимальная чистая выгода от орошаемого земледелия	500	долл. США/(га·год)
Корректировка для «сценария без проекта» (без строительства самого водохранилища)	90 %	%
Расчеты		
1 Городское население, которое может быть обеспечено водой	312329	Людей
2 Площадь, которая может быть орошена	259,1	га

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2	3
3 Стоимость городской воды	3420000	долл. США/год
4 Стоимость сельскохозяйственной воды	129550	долл. США/год
5 Стоимость городской воды с корректировкой для «сценария без проекта»	3078000	долл. США/год
6 Стоимость сельскохозяйственной воды с корректировкой для «сценария без проекта»	116595	долл. США/год
Моделируемая стоимость воды, потерянной в результате испарения		
1 Потребность в бытовых водах в городах (10 %)	25 %	%
2 Потребность в сельскохозяйственной воде (90 %)	75 %	%
3 Стоимость потерянной городской воды	769500	долл. США/год
4 Стоимость потерянной сельскохозяйственной воды	87446,25	долл. США/год
5 Общая стоимость воды, потерянной в результате испарения	856946,25	долл. США/год

Результаты и их обсуждение. Испарение с поверхности водохранилища представляет собой значительную экономическую проблему. Потери воды в результате испарения сокращают доступные запасы воды для различных целей, таких как сельское хозяйство, бытовое потребление и промышленная деятельность. Такое снижение доступности воды может привести к увеличению затрат, уменьшению производительности и замедлению экономического развития в регионах, испытывающих дефицит воды.

Методы исследования позволили получить важные результаты в виде данных о водном балансе водохранилища и экономическом ущербе, вызванном испарением. Данные диаграммы на рисунке 4 показывают, что объем выпавших осадков превышает величину испарения только зимой, в другие сезоны наблюдается обратная ситуация – объемы потерь на испарение превышают объемы выпавших осадков. Летом потери достигают 4,8 млн м³ из общего количества потерянной на испарение воды 5,7 млн м³/год.

Общее количество осадков, выпадающих на поверхность водохранилища, достигает 7,5 млн м³/год, а фактические потери на испарение – 13,2 млн м³/год. Необходимо найти пути снижения этих потерь и повыше-

ния эффективности использования воды, чтобы смягчить негативные экономические последствия испарения из водохранилища.

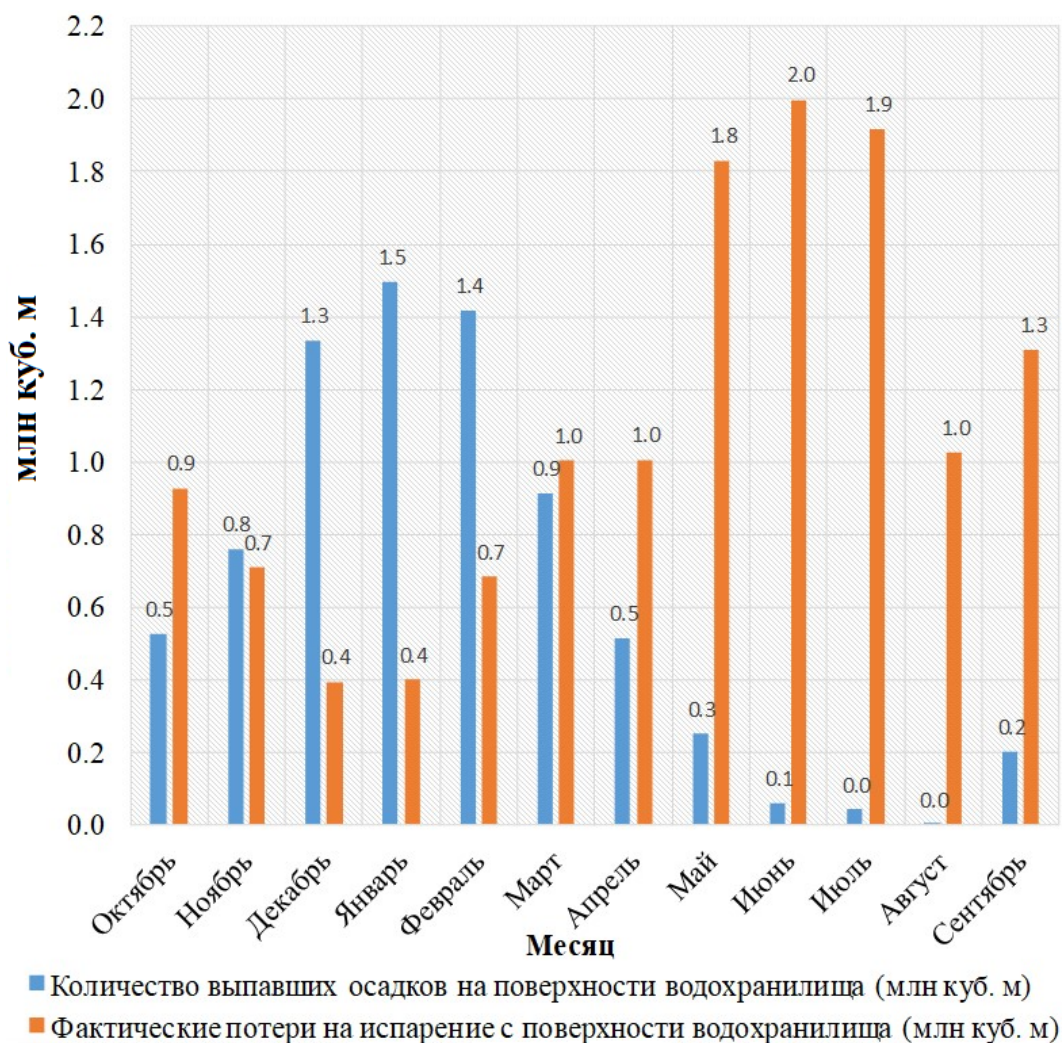


Рисунок 4 – Диаграмма среднемесячных объемов выпадения осадков и потерь воды на испарение за гидрологический период 2021–2022 гг. для водохранилища 16 Тишрин

Figure 4 – Diagram of average monthly precipitation and water losses for evaporation for the hydrological period 2021–2022 for the 16 Tishrin reservoir

Расчет экономических потерь в результате испарения из водохранилища 16 Тишрин важен для понимания стратегической значимости включения испарения в расчеты водного баланса. Например, на указанном объекте потерь было бы достаточно для обеспечения питьевых и бытовых нужд 312329 чел. и орошения 259,1 га земли, в результате общий ущерб составил 856946,25 долл. США/год, что эквивалентно 69635202,96 млн руб./год.

Выводы. Количественная оценка экономического ущерба от испарения с поверхности водохранилища 16 Тишрин в Сирии имеет решающее значение для эффективного управления его водными ресурсами. Проанализировав водный баланс водохранилища, данные об осадках и испарении, определили общее количество теряемой на испарение воды, которое составило 5,7 млн м³/год. Такой значительный объем испарения приводит к экономическим потерям, оцениваемым в 856946,25 долл. США/год. Вышеуказанное подчеркивает острую необходимость реализации стратегий по минимизации экономических последствий и оптимизации управления водными ресурсами.

Для снижения экономических потерь, связанных с испарением, мы рекомендуем рассмотреть различные подходы. К ним относятся такие меры, как использование плавающих покрытий или теневых конструкций для снижения прямого воздействия солнечных лучей на поверхность воды, применение методов экономии воды, а также изучение альтернативных вариантов хранения воды, например, в подземных резервуарах.

Точная количественная оценка экономических потерь и реализация соответствующих стратегий по их снижению позволят минимизировать негативные последствия испарения, что приведет к экономии средств и повышению устойчивости водных ресурсов. Это становится особенно важным, если учесть растущие потребности в воде и изменчивость климата.

Таким образом, понимание экономических последствий испарения, как показано в наших результатах, имеет решающее значение для эффективного управления водными ресурсами. Решая эти задачи и принимая обоснованные решения на основе рассчитанного экономического ущерба, мы сможем повысить сохранность водных ресурсов в водохранилище 16 Тишрин и низовьях р. Ал Кабир Ал Шамали.

Список источников

1. Saha S. K., Singh R. P., Misra A. K. Estimating evaporation losses from reservoirs in arid regions using remote sensing data // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 560. P. 242–255.

2. A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss / H. Zhang, S. M. Gorelick, P. V. Zimba, X. D. Zhang // *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 555. P. 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007>.
3. Climate resilient water management for sustainable agriculture / S. Chouhan, S. Kumari, R. Kumar, P. L. Chaudhary // *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. Vol. 13, iss. 7. P. 411–426. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i71894>.
4. Лопух П. С., Волчек А. А. Гидрология водохранилищ. Минск: БГУ, 2020. 41 с.
5. Лавров С. А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2019. № 1. С. 4–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.
6. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review / C. Huang, Y. Chen, S. Zhang, J. Wu // *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56, № 2. P. 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>.
7. Bobo M. Calculation of actual storage capacity and the sediments volume in the lake of 16 Tishreen dam in Lattakia by topographic methods // *Tishreen University Journal – Engineering Sciences Series*. 2019. Vol. 41, № 1. P. 25–42. (In Arabic).
8. Dayoub H., Sheikho T., Al-Ali Y. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in Al-Kabir Al-Shamali river basin, Syria // *Tishreen University Journal – Biological Sciences Series*. 2023. Vol. 45, № 2. P. 125–135. (In Arabic).
9. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes / C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell, J. Michaelsen // *Scientific Data*. 2015. 2(1). Article number: 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
10. Mu Q., Zhao M., Running S. W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. 2013. 600 p.
11. Shoemaker W. B., Sumner D. M. Alternate corrections for estimating actual wetland evapotranspiration from potential evapotranspiration // *Wetlands*. 2006. Vol. 26, № 2. P. 528–543. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[528:ACFEAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[528:ACFEAW]2.0.CO;2).
12. Assessment of surface water dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation / V. K. Gautam, P. K. Gaurav, P. Murugan, M. Annadurai // *Aquatic Procedia*. 2015. Vol. 4. P. 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>.
13. Application of water indices in surface water change detection using Landsat imagery in Nepal / T. D. Acharya, D. H. Lee, A. Subedi, H. Huang // *Sensors & Materials*. 2019. 31(5). 1429. <https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2264>.
14. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review / D. Phiri, M. Simwanda, S. Salekin, V. R. Nyirenda, Y. Murayama, M. Ranagalage // *Remote Sensing*. 2020. 12(14). 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>.
15. Neverre N., Dumas P. Projecting and valuing domestic water use at regional scale: A generic method applied to the Mediterranean at the 2060 horizon // *Water Resources and Economics*. 2015. Vol. 11. P. 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2015.06.001>.
16. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [Electronic resource] / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith; Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998. URL: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm> (date of access: 01.07.2023).
17. Al-Juaidi A. E., Kaluarachchi J. J., Mousa A. I. Hydrologic-economic model for sustainable water resources management in a coastal aquifer // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2014. 19(11). 04014020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000960](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000960).

References

1. Saha S.K., Singh R.P., Misra A.K., 2018. Estimating evaporation losses from reservoirs in arid regions using remote sensing data. *Journal of Hydrology*, vol. 560, pp. 242-255.
2. Zhang H., Gorelick S.M., Zimba P.V., Zhang X.D., 2017. A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. *Journal of Hydrology*, vol. 555, pp. 213-227, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007>.
3. Chouhan S., Kumari S., Kumar R., Chaudhary P.L., 2023. Climate resilient water management for sustainable agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 13, iss. 7, pp. 411-426, <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i71894>.
4. Lopukh P.S., Volchek A.A., 2020. *Gidrologiya vodokhranilishch* [Hydrology of Reservoirs]. Minsk, BSU, 41 p. (In Russian).
5. Lavrov S.A., 2019. *Zakonomernosti formirovaniya ispareniya s poverkhnosti sushi i vody pod vliyaniem klimaticheskikh izmeneniy* [Regularities of formation of evaporation from land surface and water under the climate change's influence]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 1, pp. 4-23, DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1. (In Russian).
6. Huang C., Chen Y., Zhang S., Wu J., 2018. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, vol. 56, no. 2, pp. 333-360, <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>.
7. Bobo M., 2019. Calculation of actual storage capacity and the sediments volume in the lake of 16 Tishreen dam in Lattakia by topographic methods. *Tishreen University Journal – Engineering Sciences Series*, vol. 41, no. 1, pp. 25-42. (In Arabic).
8. Dayoub H., Sheikho T., Al-Ali Y., 2023. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in Al-Kabir Al-Shamali river basin, Syria. *Tishreen University Journal – Biological Sciences Series*, vol. 45, no. 2, pp. 125-135. (In Arabic).
9. Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., Rowland J., Harrison L., Hoell A., Michaelsen J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), article number: 150066, <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
10. Mu Q., Zhao M., Running S.W., 2013. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. 600 p.
11. Shoemaker W.B., Sumner D.M., 2006. Alternate corrections for estimating actual wetland evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Wetlands*, vol. 26, no. 2, pp. 528-543, [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[528:ACFEAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[528:ACFEAW]2.0.CO;2).
12. Gautam V.K., Gaurav P.K., Murugan P., Annadurai M., 2015. Assessment of surface water dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation. *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 739-746, <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>.
13. Acharya T.D., Lee D.H., Subedi A., Huang H., 2019. Application of water indices in surface water change detection using Landsat imagery in Nepal. *Sensors & Materials*, 31(5), 1429, <https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2264>.
14. Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V.R., Murayama Y., Ranagalage M., 2020. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291, <https://doi.org/10.3390/rs12142291>.
15. Neverre N., Dumas P., 2015. Projecting and valuing domestic water use at regional scale: A generic method applied to the Mediterranean at the 2060 horizon. *Water Resources and Economics*, vol. 11, pp. 33-46, <https://doi.org/10.1016/j.wre.2015.06.001>.
16. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration –

Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, available: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm> [accessed 01.07.2023].

17. Al-Juaidi A.E., Kaluarachchi J.J., Mousa A.I., 2014. Hydrologic-economic model for sustainable water resources management in a coastal aquifer. Journal of Hydrologic Engineering, 19(11), 04014020, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000960](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000960).

Информация об авторах

Х. Алали – аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами;

А. В. Перминов – кандидат технических наук, и. о. заведующего кафедрой гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, доцент.

Information about the authors

H. Alali – Postgraduate student of the Chair of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management;

A. V. Perminov – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 14.08.2023; принята к публикации 16.08.2023.

The article was submitted 03.07.2023; approved after reviewing 14.08.2023; accepted for publication 16.08.2023.