



УДК 556.555

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_3_36

EDN: FQOOFM



ТИПИЗАЦИЯ ТРОФНОСТИ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХЛОРОФИЛЛА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЧОГРАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПЕРИОД 2021–2023 ГГ.

А. В. Мирзоян^{1,2}, М. М. Пятинский^{2*}, Ю. В. Сирота²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
(ФГБНУ «ВНИРО»), Москва 105187, Россия

²Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

*E-mail: pyatinskiymm@azniirkh.vniro.ru

Аннотация

Введение. Чограйское водохранилище является крупным искусственным водным объектом на юге России, имеющим промышленное рыбохозяйственное значение. **Актуальность.** Исследование пространственно-временной изменчивости основных биологических показателей данного водоема и определение статуса его трофности является важным, поскольку в настоящее время отмечается повышение его минерализации и показателей эвтрофикации в условиях частых сезонных колебаний уровня воды. **Целью** исследования стала разработка подхода к типизации трофности водоемов на основе показателей хлорофилла по данным дистанционного зондирования. **Методы.** Использованы 55 спутниковых снимков Sentinel-2 за период 2021–2023 гг., на основе которых выполнен расчет показателей индексов NDWI, NDCI и пересчет значений показателей хлорофилла-*a* и удельной биомассы фитопланктона. **Результаты.** Определены сезонная динамика развития фитопланктона в водоеме (период вегетации — с февраля по конец октября, максимум численности приходится на июль и сентябрь) и многолетняя динамика биомассы фитопланктона. Выявлены пространственные закономерности динамики развития фитопланктона в водоеме. **Заключение.** Чограйское водохранилище имеет статус мезотрофного водоема с признаками эвтрофного состояния отдельных акваторий в конце лета – начале осени. Отмечено увеличение продолжительности периода массового развития фитопланктона вплоть до конца октября.

Ключевые слова: Чограйское водохранилище, фитопланктон, хлорофилл, классификация, дистанционное зондирование, трофность

CLASSIFICATION OF THE TROPHIC CAPACITY OF WATER BODIES BASED ON CHLOROPHYLL CONTENT USING REMOTE SENSING THROUGH THE EXAMPLE OF THE CHOGRAY RESERVOIR DURING THE PERIOD 2021–2023

A. V. Mirzoyan^{1,2}, M. M. Piatinskii^{2*}, Yu. V. Sirota²

¹Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”),
Moscow 105187, Russia

²Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), Rostov-on-Don 344002, Russia

*E-mail: pyatinskiymm@azniirkh.vniro.ru

Abstract

Background. The Chogray Reservoir is a large artificial water body in the south of Russia, which is used for commercial fisheries. **Relevance.** The investigation of the spatio-temporal variability of the main biological parameters of this reservoir and identification of its trophic status is of immediate importance due to the currently observed increase in the total dissolved solids and eutrophication rate in the context of frequent seasonal fluctuations of its water level. The **aim** of this study is to develop an approach to the trophic classification of a water body based on chlorophyll content with the use of remote sensing data. **Methods.** 55 Sentinel-2 satellite images for the period 2021–2023 have been used as the primary data for this research allowing to calculate NDWI and NDCI for the future approximation of the chlorophyll-*a* and relative phytoplankton biomass values. **Results.** The seasonal dynamics of phytoplankton vegetation in the reservoir has been identified (the period of vegetation starts in February and ends in October, with the peaks of abundance in July and September), as well as the long-term dynamics of phytoplankton biomass. The spatial patterns of the phytoplankton vegetation dynamics in the reservoir have been determined. **Conclusion.** The Chogray Reservoir has the status of a mesotrophic water body with eutrophic features in some water areas in the late summer – early autumn season. An increase in the duration of phytoplankton large-scale vegetation until the end of October has been recorded.

Keywords: Chogray Reservoir, phytoplankton, chlorophyll, classification, remote sensing, trophic capacity

ВВЕДЕНИЕ

Чограйское водохранилище является искусственным водным объектом, созданным в 70-е гг. прошлого столетия для перераспределения речного стока. Водохранилище является одним из самых крупных искусственных водоемов юга России: его площадь достигает 185 км², ширина колеблется от 1 до 5 км, а максимальные глубины достигают 8,5 м, что обусловлено его конструктивными особенностями [1, 2]. В зависимости от водности впадающих в водохранилище рек (Восточный Маныч, Чограй, Рагули, Голубь) и режима работы Кумо-Манычского канала отмечаются значительные сезонные колебания уровня воды, в результате чего существенная часть мелководий водоема подвергается процессам зарастания высшей растительностью [2, 3]. В последние годы полезный объем воды в водохранилище не превышает 280 млн м³ (проектный показатель — 670 млн м³), а площадь водного зеркала составляет 13,0 тыс. га (проектная — около 19,3 тыс. га) [4].

Чограйское водохранилище, в отличие от многих других водохранилищ юга России (например, Егорлыкского, Красного, Курганенского и др.), имеет статус рыбохозяйственного водоема. В наиболее продуктивные и многоводные годы после введения водохранилища в эксплуатацию промысловые уловы рыб достигали 500 т в год [2]. В период 2000–2021 гг. показатели годового улова колебались от 120 до 210 т.

В настоящее время, по данным многолетних исследований, состояние водоема характеризуется повышением уровня минерализации и усугублением антропогенной нагрузки в условиях частых сезонных колебаний уровня воды [2]. В ходе проведения гидрологических исследований было установлено, что показатели минерализации водоема линейно связаны с уровнем его наполнения и обладают сезонной динамикой: минерализация увеличивается в период весна–осень [4]. В момент ввода водохранилища в эксплуатацию показатели минерализации составляли 1,2–1,7 г/л

у плотины и до 3 г/л в концевой (северной) маловодной части. В период 1995–2004 гг. в конце вегетационного сезона показатели минерализации достигали 2 г/л, а уже к 2008 г. их значения стали рекордными — 8,0 г/л в зоне выклинивания подпора воды. Экстремальные показатели минерализации в период 2004–2008 гг. были обусловлены реконструкцией водоема — в 2006, 2008 гг. вода была спущена до мертвого объема, что и стало причиной повышения минерализации.

В период до 2010 г., как отмечено по результатам работы авторов [2], минерализация воды на глубоководных участках Чограйского водохранилища не превышала 1,9 г/л. Однако снижение полезного объема водохранилища с 450–600 млн м³ в период 1980–1995 гг. до 100–400 млн м³ в 2000–2020 гг. привело к повышению показателей минерализации до 3,7 г/л в концевом (северном) участке водохранилища и минимальным показателям 1,7 г/л у плотинного участка в 2019–2020 гг. Таким образом, наблюдаемые в 2019–2020 гг. минимальные показатели минерализации были на уровне максимальных показателей 1970-х гг. Такие изменения среды в водоеме могут привести к снижению численности рыбных популяций или их видового разнообразия в результате изменения структурной организации биоценоза.

Несмотря на наличие в научной литературе сведений о среднегодовых или сезонных значениях остаточной удельной биомассы фитопланктона и зоопланктона, а также о других интегральных показателях водоема [2, 5–8], актуальной задачей является исследование пространственно-временной изменчивости основных биологических показателей водоема в условиях частых сезонных колебаний уровня воды. Не менее актуальным является изучение вопроса классификации трофности в контексте существенного изменения состояния водоема в современный период.

Одной из основных биологических характеристик водоема является показатель его трофности, характеризующий общую биомассу или продукцию автотрофных организмов за единицу времени [9]. Показатели трофности водоемов позволяют определить закономерности формирования условий обитания биоты, качество воды и степень загрязнения водоемов в результате антропогенного воздействия. Для решения задачи типизации водоемов по признаку трофности принято выделять олиготрофные, мезотрофные, эвтроф-

ные, поли- и гипертрофные водоемы в зависимости от биомассы фитопланктона, в т. ч. удельной, концентрации хлорофилла-*a* и других показателей [10, 11].

Целью данного исследования является поиск подхода к разработке типизации водоемов на основе показателей хлорофилла по данным дистанционного зондирования на примере Чограйского водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследований представлен на рис. 1. Акваторию водохранилища можно условно разделить на глубоководную и мелководную зоны. Такое зонирование обусловлено гидрологическим режимом и уровнем наполнения водохранилища, а также режимом работы гидротехнических сооружений.

Учитывая различия в особенностях формирования данных акваторий, в исследовании рассматривается условно «глубоководная» часть водохранилища. Мелководная часть, вероятно, характеризуется наличием высшей растительности и обильными процессами зарастания ею, что в свою очередь может привести к значительной ошибке при оценке параметров вегетации водоема.

Определение пространственно-временных показателей хлорофилла-*a* выполнено при помощи открытых спутниковых снимков Sentinel-2 за период 2021–2023 гг. Общее количество обработанной информации представлено в табл. 1. Учитывая особенности формирования гидрологического режима водоема, процедуру расчетов выполняли в несколько этапов.

На первом этапе для каждого спутникового снимка выполнялся расчет показателя нормализованного индекса водного зеркала (*NDWI*) с целью однозначного отделения акваторий водной поверхности от суши для последующего расчета показателей вегетации в эвфотическом слое глубоководной части водоема. На этом этапе устранялись помехи от облачности, помехи от изменения береговой линии и проводилось исключение пограничного экотонного биотопа «вода/суша» [12]. Вычисление полигона водного зеркала выполнено по формуле [13–15] на основе значений спектральных каналов B03 (зеленый спектр) и B08 (ближний инфракрасный спектр):

$$NDWI = (Rrs(560) - Rrs(842)) / (Rrs(560) + Rrs(842)),$$

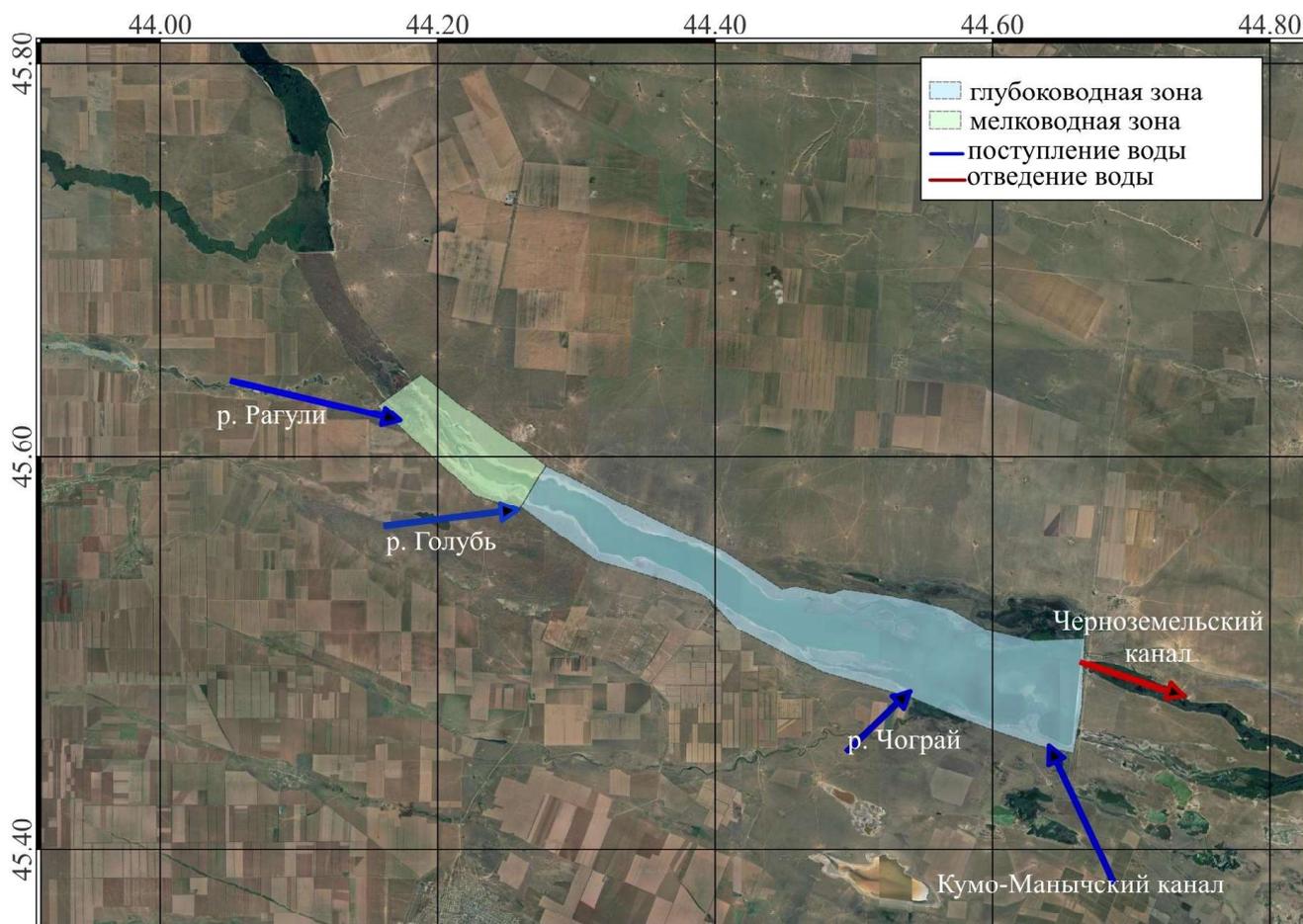


Рис. 1. Чограйское водохранилище в TrueColor по данным Sentinel-2 в 2023 г. и схема распределения воды [2]

Fig. 1. Chogray Reservoir TrueColor image by Sentinel-2 in 2023 and the diagram map of the water balance and distribution [2] (deep-water areas are indicated by light blue; shallow-water areas are indicated by cyan; blue arrows denote the water inflow, and the red arrow denotes the water outlet)

Таблица 1. Количество обработанных спутниковых снимков Sentinel-2 Чограйского водохранилища за период 2021–2023 гг.

Table 1. Number of the processed Sentinel-2 satellite images of the Chogray Reservoir for the period 2021–2023

Год/Сезон Year/Season	Количество обработанных спутниковых снимков Number of the processed satellite images				
	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn	Всего Total
2021	0	2	7	7	16
2022	1	4	8	5	18
2023	4	1	9	7	21

где $Rrs(\lambda)$ — отраженное значение спектральной яркости при длине волны λ .

На втором этапе выполнялся расчет показателя нормализованного индекса хлорофилла- a ($NDCI$) на предварительно обработанном снимке путем обрезки по маске водного зеркала, полученной в

результате расчета $NDWI$. Достаточным для классификации пространственных значений $[lat, lon]$ индекса $NDWI$ было условие [13], определяющее, является ли конкретное значение точки пространства водной поверхностью:

$$NDWI_{[lat, lon]} > 0.$$

Вычисление показателей индекса *NDCI* выполнено из значений спектральной яркости каналов В04 (красный спектр) и В05 (ближний инфракрасный спектр) в соответствии с работой [16]:

$$NDCI = (Rrs(705) - Rrs(665)) / (Rrs(705) + Rrs(665)).$$

Таким образом, в результате выполнения процедуры предварительной обработки изображения, по мнению авторов, удалось избежать неточностей, обусловленных влиянием зарастания водоема на расчетные показатели индекса хлорофилла-*a*.

На третьем этапе выполнялся пересчет относительных значений индекса *NDCI* в удельные показатели концентрации хлорофилла-*a*. Для решения такой задачи зачастую используется регрессионная связь, построенная на основе спутниковых данных и эмпирических измерений на водоеме. Однако в рамках данной работы выполнить эту процедуру в настоящее время не представлялось возможным ввиду малого количества проб и большого разброса во времени момента отбора проб относительно доступных спутниковых снимков. Тем не менее, в соответствии с работой [17], приближенный перевод показателей индекса *NDCI* в значения хлорофилла-*a* без учета региональных особенностей структурной организации сообществ фитопланктона может быть выполнен по формуле (с детерминацией $R^2=0,83$):

$$Chl(a) = 20,877 \times NDCI + 3,273.$$

Для приближенной оценки биомассы фитопланктона конвертация показателей хлорофилла-*a* в значения биомассы фитопланктона выполнена в соответствии с методикой для сходных водоемов Волжского каскада [18]:

$$B = 0,225 \times Chl(a),$$

где *B* — биомасса фитопланктона.

Использование данного уравнения обусловлено его наилучшей точностью для мезотрофных водоемов со средним содержанием хлорофилла-*a* на уровне 10 мкг/л, что условно согласуется с оценками удельной биомассы фитопланктона, выполненными ранее для Чограйского водохранилища [7, 8]. Применение степенных преобразований, как показано в работе [19], может привести к максимизации величины погрешности.

На завершительном этапе выполнялась статистическая обработка полученных результатов во временном и пространственном представлении. Для характеристики временной динамики проводился расчет среднего, минимального и максимального значений показателя хлорофилла-*a*. Для

характеристики пространственной динамики осуществлялись визуализация полученных показателей хлорофилла-*a* и построение частотных гистограмм.

Все вычисления выполнялись в среде R. Для обработки многоканальных спутниковых снимков использовались пакеты *sf*, *raster* [20]. Все входные данные, спутниковые снимки и исходные коды алгоритмов обработки представлены в открытом репозитории на площадке «СберТех» [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временная динамика показателей хлорофилла-*a*, рассчитанная на основе данных спутниковых снимков, представлена на рис. 2. Средние значения показателя хлорофилла-*a* варьировали в пределах от 1,0 до 11,1 мкг/л, минимальные значения колебались от 0,38 до 3,7 мкг/л, максимальные показатели достигали 24,1 мкг/л. Средняя концентрация хлорофилла-*a* за представленный период исследования составила 6,3 мкг/л.

Результаты расчета сезонной динамики показателей хлорофилла-*a* представлены на рис. 3. Она демонстрирует классическую кривую развития фитопланктона для данного водоема: постепенный рост показателей по мере увеличения продолжительности светового дня и температуры воды в феврале–марте, достижение максимальных показателей в августе–сентябре и постепенное их снижение в октябре–ноябре по мере завершения периода вегетации [5]. Детальное рассмотрение сезонных различий в период исследования представлено во второй половине данного раздела.

Детальный пространственный анализ показателей хлорофилла-*a* с учетом полноты имеющихся данных и наличия сезонных особенностей динамики представлен для 2023 г. на рис. 4.

Пересчитанные оценки сезонных показателей биомассы фитопланктона представлены в табл. 2. Среднегодовой показатель остаточной биомассы фитопланктона составил 1,15 мг/л, максимальные показатели отмечены в августе–сентябре (1,80–1,87 мг/л), минимальные — в ноябре (0,30 мг/л).

Рассмотрение многолетней динамики показателей хлорофилла-*a* (рис. 2) обнаруживает наличие схожих тенденций в их изменении. За рассматриваемый период значительных межгодовых отклонений от многолетней динамики не отмечалось. Наибольшие пики концентраций приходились на летне-осенние периоды каждого года.

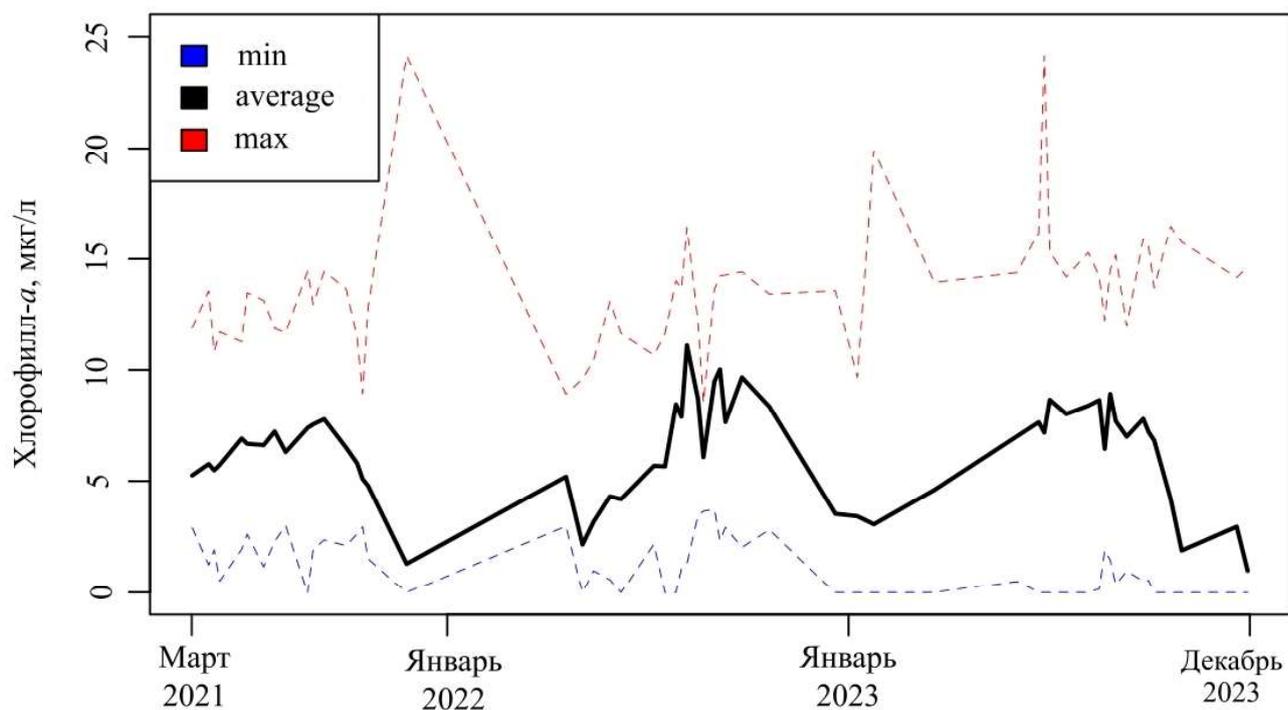


Рис. 2. Показатели концентрации хлорофилла- α в Чограйском водохранилище в период 2021–2023 гг.

Fig. 2. Chlorophyll- α concentrations in the Chogray Reservoir during the period 2021–2023

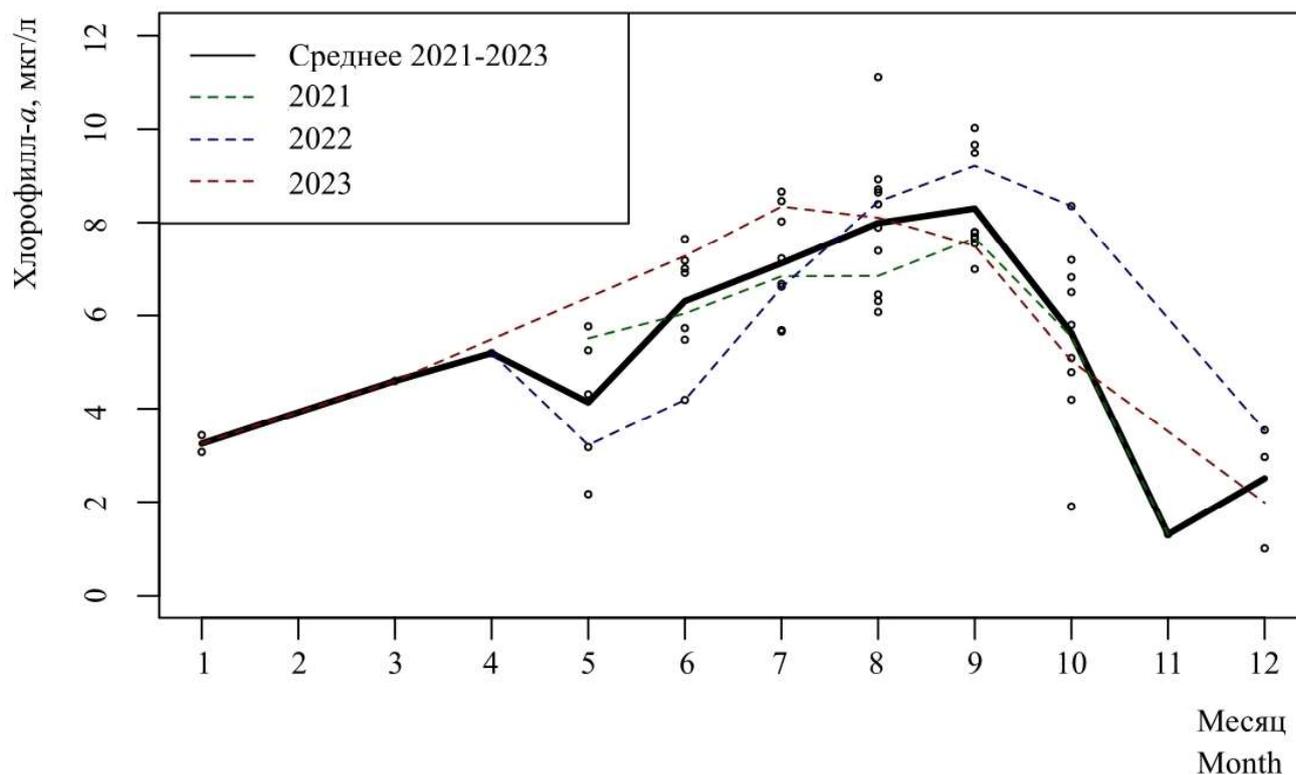


Рис. 3. Сезонная динамика показателя хлорофилла- α в Чограйском водохранилище в период 2021–2023 гг.

Fig. 3. Seasonal dynamics of chlorophyll- α in the Chogray Reservoir during the period 2021–2023

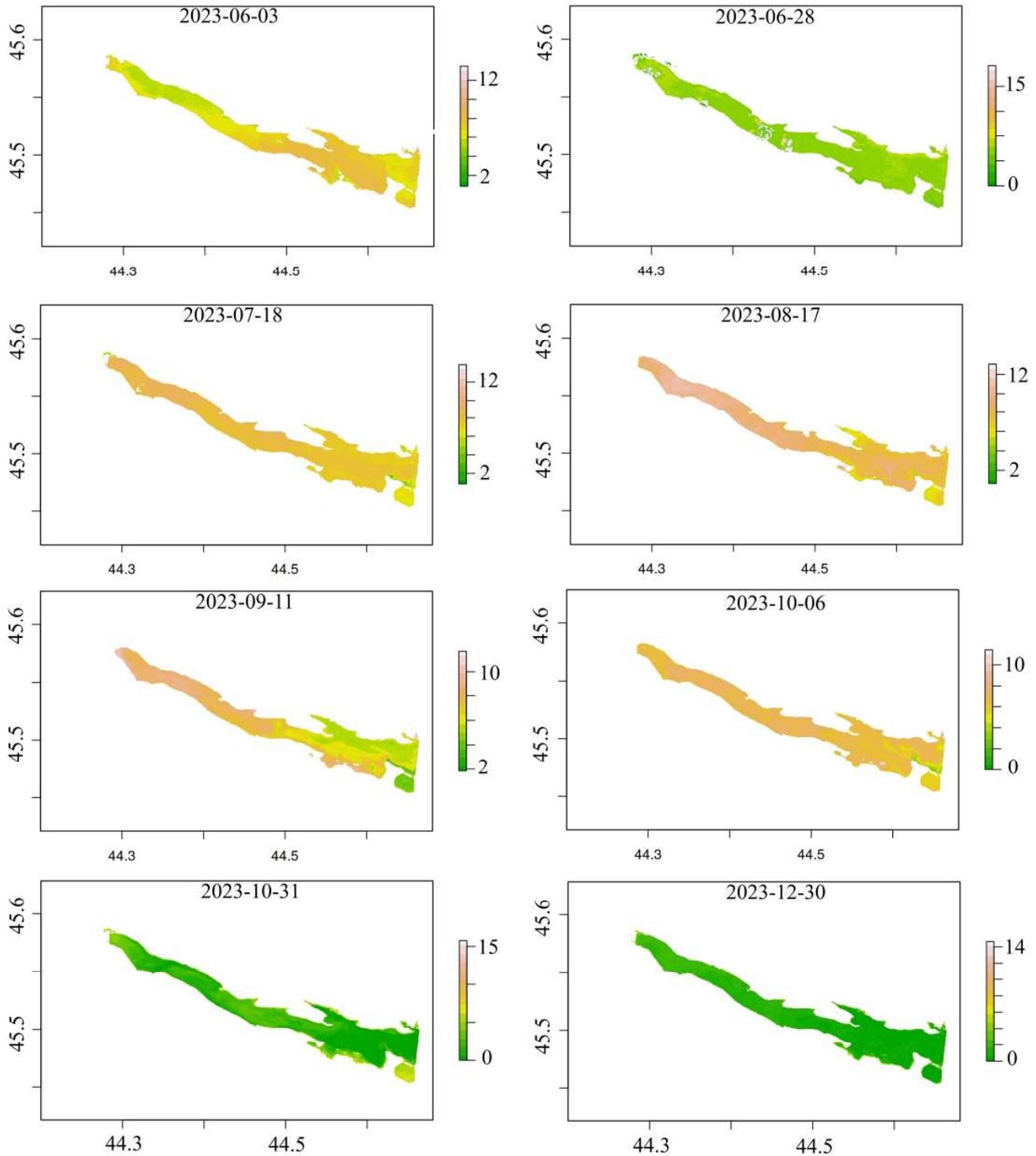


Рис. 4. Пространственно-временная динамика показателей хлорофилла-*a* в Чограйском водохранилище в 2023 г.

Fig. 4. Spatio-temporal dynamics of chlorophyll-*a* in the Chogray Reservoir in 2023

Сезонная динамика показателей хлорофилла свидетельствует о наличии особенностей формирования динамики вегетационного цикла для каждого отдельно взятого года (рис. 3). В 2022 и 2023 гг. максимальные средние (в пространственном представ-

лении) значения хлорофилла отмечены в сентябре, в то время как в 2023 г. — в июле. Вероятно, это обусловлено более ранним началом тренда развития фитопланктона в 2023 г. по причине снижения объемов речного стока и более раннего прогрева воды.

Таблица 2. Оценки остаточной удельной биомассы фитопланктона в Чограйском водохранилище в период 2021–2023 гг.

Table 2. Estimates of the relative residual phytoplankton biomass in the Chogray Reservoir for the period 2021–2023

Месяц Month	Удельная средняя биомасса фитопланктона, мг/л Mean relative biomass of phytoplankton, mg/L
Январь January	0,73
Февраль February	–
Март March	1,04
Апрель April	1,17
Май May	0,93
Июнь June	1,42
Июль July	1,60
Август August	1,80
Сентябрь September	1,87
Октябрь October	1,27
Ноябрь November	0,30
Декабрь December	0,56

Исходя из сезонной динамики, можно отметить наличие коротких сезонных «депрессий» развития фитопланктона, о которых косвенно свидетельствует уменьшение значений хлорофилла- α в мае–июне 2022 г. и августе 2021 г. (рис. 3). Схожие тенденции развития «летней депрессии» ранее отмечались для Краснодарского водохранилища и являются закономерными в динамике развития фитопланктона [22].

Пространственная динамика свидетельствует о наличии закономерностей в развитии фитопланктона (рис. 4). В весенний период развитие фитопланктона происходит умеренными темпами с наивысшими концентрациями в центральной части

водоема. В летний период в водоеме отмечаются незначительные пространственные колебания показателей фитопланктона за исключением локальных акваторий, испытывающих влияние впадающих рек и Кумо-Манычского канала. Наибольшие концентрации фитопланктона отмечаются в акваториях с меньшими глубинами (преимущественно северная часть водохранилища). В осенний период, при уменьшении речного стока, высокие концентрации фитопланктона отмечались повсеместно, за исключением периодов переброски воды через Кумо-Манычский канал, в результате чего концентрации фитопланктона снижались на непродолжительное время (см. 2023-09-11 на рис. 4).

Детальное изучение сезонной и годовой динамики показателей фитопланктона и хлорофилла- α позволило косвенно определить трофический статус Чограйского водохранилища. В настоящее время существует множество различных подходов (более 60) к определению статуса трофности водоема [23]; при использовании показателей хлорофилла- α для классификации водоема авторы определяют различные диапазоны значений параметра для разных типов водоемов. Сводная информация по некоторым из опубликованных шкал классификации представлена в табл. 3 [10, 18, 23].

Обсуждение оснований выбора какой-либо из представленных шкал классификации трофности водоемов по показателю хлорофилла- α выходит за рамки данной работы. Однако, для разграничения между мезотрофным и эвтрофным статусом в соответствии с работами авторов (табл. 3), применено правило, соответствующее шкалам [10, 23]: мезотрофный $<10 <$ эвтрофный (при концентрациях хлорофилла- α менее 10 мкг/л — мезотрофный статус, более 10 мкг/л — эвтрофный).

В соответствии с принятым допущением о шкале классификации трофности по совокупности работ [10, 18, 23] в многолетнем представлении Чограйское водохранилище в 2021–2023 гг. являлось **мезотрофным** водоемом. Тем не менее, в периоды наиболее стремительного развития фитопланктона в августе и сентябре отдельные небольшие участки водоема демонстрируют признаки **эвтрофного состояния** этих акваторий (участки с концентрациями хлорофилла- α более 10 мкг/л) (рис. 4).

Сопоставление результатов данной работы с ранее выполненными работами за период 2015–2020 гг. [2, 7, 8] позволяет обнаружить некоторые

Таблица 3. Классификация трофического типа водоема на основе показателей хлорофилла-*a* по разным литературным источникам**Table 3.** Classification of the trophic type of a water body based on chlorophyll-*a* values, according to different sources

Трофический тип Trophic type	Концентрация хлорофилла- <i>a</i> , мкг/л Chlorophyll- <i>a</i> value, µg/L		
	Попов, Мухутдинов [18] Popov, Mukhutdinov [18]	Антонова, 2004 [10], Рекомендации Р 52.24.763-2012 Antonova, 2004 [10], State Recommendations R 52.24.763-2012	Сухоруков и др., 2017* [23] Sukhorukov et al., 2017* [23]
Олиготрофный Oligotrophic	<5–10	0,1–1,0	0,1–4,0
Мезотрофный Mesotrophic	11–20	1,0–10,0	3,0–10,0
Эвтрофный Eutrophic	21–75	>10	15–57
Политрофный Polytrophic	76–150	–	–
Гипертрофный Hypertrophic	>150–250	–	35–295

Примечание: *В комплексной работе представлена собственная шкала трофности, условно согласованная с традиционной

Note: *This multidisciplinary study presents its own trophic scale nominally compliant with the conventional one

расхождения в оценках значений показателей биомассы фитопланктона. В представленных работах усредненная многолетняя биомасса фитопланктона составляла 3,52 г/м³ (при этом средняя биомасса фитопланктона в весенний период находилась на уровне 1,97 г/м³, в летний период — 1,04 г/м³, в осенний — 4,85 г/м³). Однако, в соответствии с методикой выполненных работ, отбор проб осуществлялся всего на 4 учетных станциях в год, одна из которых находилась в мелководной «концевой» (северной) части водохранилища. Такая «мозаичность» эмпирических наблюдений, вероятно, и является причиной некоторых расхождений в полученных оценках, на что косвенно указывают значимые колебания сезонных показателей и снижение показателей биомассы фитопланктона в летний период в данных публикациях. Другими причинами расхождений результатов дистанционного зондирования и эмпирических наблюдений могут являться неточность калибровки уравнения преобразования безразмерного индекса *NDCI* в показатели хлорофилла-*a* и неточность решения упрощенного уравнения преобразования показателей хлорофилла-*a* в биомассу фитопланктона, что является задачей дальнейших исследований калибровки.

В комплексной работе по изучению кормовой базы, в т. ч. Чограйского водохранилища [5], отмечены резкие колебания удельной биомассы фитопланктона в пределах от 13,56 г/м³ в 1971 г. до 0,08 г/м³ в 1974 г. по причинам истощения подвижных питательных веществ в первые годы заполнения водоема. В последующие годы отмечен устойчивый тренд снижения показателей фитопланктона в водоеме, что обусловлено истощением запаса биогенных элементов и снижением доступности растворенных минеральных веществ, что косвенно наблюдается по результатам данной работы. Закономерным отличием от работы [5] является увеличение продолжительности массового развития фитопланктона с июня–августа до периода июнь–октябрь, что, вероятно, обусловлено глобальными климатическими изменениями.

Сопоставление с результатами оценки динамики фитопланктона в Краснодарском водохранилище [22] свидетельствует о близких средних значениях показателей хлорофилла-*a* в данных водоемах и некоторых расхождениях в многолетней сезонной динамике. Для Краснодарского водохранилища отмечен период летней «депрессии» в июне, в то время как в данной работе некоторое снижение показателей хлорофилла-*a* в Чограйском

водохранилище отмечено в мае. Такая особенность может быть обусловлена более ранним прогревом воды в Чограйском водохранилище и более ранним началом периода вегетации фитопланктона.

В целях выдвижения практической рекомендации, вытекающей из исследования, следует отметить, что текущее состояние водоема, несмотря на значительное сокращение его водной площади (относительно периода 1970–1980 гг. более чем в 5 раз), все еще является удовлетворительным для обитания ихтиоценозов и сохраняет потенциал для увеличения численности отдельных видов рыб [2]. В условиях отсутствия перспектив увеличения водного объема водохранилища для предотвращения перехода трофического состояния из мезотрофного в эвтрофное может применяться подход зарыбления рыбами-мелиораторами [24]. Наличие достаточной кормовой базы в виде фитопланктона и высшей растительности может быть использовано для повышения рыбопродуктивности водохранилища и предотвращения его дальнейшей эвтрофикации за счет увеличения численности белого толстолобика и белого амура путем повышения потенциала их воспроизводства (с применением искусственного воспроизводства), что осуществлялось ранее в 1970–1980 гг. [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения комплексной работы по разработке способа интерпретации спутниковых данных следует заключить, что использование данного подхода является приемлемым для решения задачи типизации трофности водоемов на основе показателей хлорофилла.

Установлено, что в период 2021–2023 гг. условно «глубоководная» часть Чограйского водохранилища имела статус мезотрофного водоема с признаками эвтрофного состояния отдельных акваторий в конце лета – начале осени.

Отмечено увеличение продолжительности периода массового развития фитопланктона с ранее известного летнего периода вплоть до конца осени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уланова С.С. Водоемы Кумо-Маньчской впадины на территории Калмыкии: режим, экотонные системы побережий и использование. *Аридные экосистемы*. 2011. Т. 17, № 2 (47): 33–46.
2. Карнаухов Г.И., Каширин А.В., Гиталов Э.И., Сирота Ю.В. Влияние абиотических и антропогенных

факторов на формирование современного состава ихтиофауны Чограйского водохранилища. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2021. Т. 4, № 3: 61–73. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_3_61.

3. Карнаухов Г.И. Запасы рыб, состояние промысла и перспективы его развития в Чограйском водохранилище. *Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Керчь, 6 октября 2017 г.)*. Керчь: Изд-во Керченского филиала ФГБНУ «АзНИИРХ» («ЮгНИРО»), 2017: 60–65.
4. Уланова С.С. Влияние динамики гидрорежима искусственных водоемов на прилегающие территории (на примере Чограйского водохранилища). *Вестник Института комплексных исследований аридных территорий*. 2009. № 1 (18): 85–91.
5. Никитенко Е.В. Ретроспективный анализ данных по кормовой базе ихтиофауны реки Восточный Маньч. *Вестник Института комплексных исследований аридных территорий*. 2009. № 1 (18): 93–101.
6. Степаньян О.В., Старцев А.В. Современное состояние биоты водоемов Кума-Маньчской впадины: Усть-Маньчского, Веселовского, Пролетарского и Чограйского водохранилищ (обзор). *Аридные экосистемы*. 2014. Т. 20, № 2 (59): 56–69.
7. Сирота Ю.В. Динамика развития фитопланктона в Чограйском водохранилище. *Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование : матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Керчь, 19–23 сентября 2018 г.)*. Симферополь: Ариал, 2018: 287–291.
8. Сирота Ю.В. Разнообразие фитопланктона в водоемах комплексного назначения Ставропольского края. *Состояние и перспективы научно-технологического развития рыбохозяйственного комплекса : матер. Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Махачкала, 24–25 октября 2019 г.)*. Махачкала: Изд-во Дагестанского государственного аграрного университета им. М.М. Джамбулатова, 2019: 277–281.
9. Яценко-Степанова Т.Н., Немцева Н.В., Игнатенко М.Е. Основные подходы к определению трофности природных водоемов. *Бюллетень Оренбургского научного центра Уральского отделения Российской академии наук*. 2014. № 1: 1–9.
10. Антонова Р.В., Севастьянов Д.В. К вопросу о влиянии морфометрических характеристик озер и их водосборов на трофический статус водоемов. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 7. Геология. География*. 2004. Вып. 1: 83–87.
11. Китаев С.П. Типизация озерных экосистем по трофическому статусу. *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и*

- морских водах : матер. V Всерос. симпозиума с междунар. участием (г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск: Изд-во Института водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, 2012: 353–356.
12. Уланова С.С. Геоэкологический мониторинг искусственных водоемов Республики Калмыкия на базе геосистемного подхода. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2014. Т. 19, № 5: 1597–1600.
 13. Gao B.-C. NDWI—A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, issue 3: 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
 14. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, issue 4, e354: 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
 15. Zhang T., Su J., Liu C., Chen W.-H., Liu H., Liu G. Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications. *Addressing global challenges through automation & computing. Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Automation and Computing (Huddersfield, 7–8 September, 2017)*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2017: 1–6. <https://doi.org/10.23919/ICoAC.2017.8081990>.
 16. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117: 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>.
 17. Wang X., Gong Zh., Pu R. Estimation of chlorophyll *a* content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: A case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190, no. 10, e620: 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6978-7>.
 18. Попов А.Н., Мухутдинов В.Ф. Решение методологических вопросов при выборе методов реабилитации эвтрофных водоемов. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023. № 2: 101–117. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_2_7.
 19. Минеева Н.М., Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Содержание хлорофилла *a* в единице биомассы фитопланктона Волжского каскада (Россия). *Альгология*. 2014. Т. 24, № 4: 477–488.
 20. Pobesma E., Bivand R. Spatial data science: With applications in R. 1st ed. New York: Chapman and Hall / CRC Press, 2023. 314 p. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>.
 21. Обработка материалов спутниковых снимков Sentinel (с портала apps.sentinel-hub.com) для автоматизации расчета площади водного зеркала, обрезки снимка до водного зеркала и расчета показателя хлорофилла-*a* в виде индекса NDCI. URL: <https://gitverse.ru/remote-sensing/chograiskoe-chlorophyll> (дата обращения 22.06.2024).
 22. Лагута А.А., Погорелов А.В. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4: 67–84. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-4-4>.
 23. Сухоруков Б.Л., Ковалева Г.Е., Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона. *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44, № 1: 79–90. <https://doi.org/10.7868/S0321059617010199>.
 24. Горская О.И. Совершенствование методов альголизаии и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023. Т. 13, № 2: 14–23. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-02>.
 25. Никитенко Е.В., Щербина Г.Х. Ихтиофауна Чограйского водохранилища. *Вестник Института комплексных исследований аридных территорий*. 2015. № 1 (30): 33–38.

REFERENCES

1. Ulanova S.S. The reservoirs of the Kuma-Manych Depression in the territory of Kalmykia: Regimen, ecotonic systems of the shores, and use. *Arid Ecosystems*. 2011. Vol. 1, no. 2: 95–103. <https://doi.org/10.1134/S2079096111020089>.
2. Karnaukhov G.I., Kashirin A.V., Gitalov E.I., Sirota Yu.V. Vliyanie abioticheskikh i antropogennykh faktorov na formirovanie sovremennogo sostava ikhtiofauny Chograyskogo vodokhranilishcha [The influence of abiotic and anthropogenic factors on the formation of the present composition of the ichthyofauna in the Chogray Reservoir]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*. 2021. Vol. 4, no. 3: 61–73. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_3_61. (In Russian).
3. Karnaukhov G.I. Zapasy ryb, sostoyanie promysla i perspektivy ego razvitiya v Chograyskom vodokhranilishche [Fish stocks, state of fisheries and prospects for fisheries development in the Chogray Reservoir]. In: *Sovremennye rybokhozyaystvennye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona : materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 6 oktyabrya 2017 g.) [Current fishery and environmental problems of the Azov and Black Seas Region. Proceedings of*

- the 9th International Scientific and Practical Conference (Kerch, 6 October 2017)]. Kerch: Kerchenskiy filial FGBNU "AzNIIRKH" ("YugNIRO") [Kerch Branch of the FSBSI "AzNIIRKH" ("YugNIRO")] Publ., 2017: 60–65. (In Russian).
4. Ulanova S.S. Vliyaniye dinamiki gidrorezhima iskusstvennykh vodoemov na prilegayushchie territorii (na primere Chograyskogo vodokhranilishcha) [The influence of the dynamics of the hydraulic regime of artificial reservoirs on the adjacent territories (on the example of the Chogray Reservoir)]. *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territoriy* [Kalmykia Bulletin of Integrated Studies of Arid Territories]. 2009. No. 1 (18): 85–91. (In Russian).
 5. Nikitenko E.V. Retrospektivnyy analiz dannykh po kormovoy baze ikhtiofauny reki Vostochnyy Manych [Retrospective analysis of data on the feeding base of the ichthyofauna of the East Manych River]. *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territoriy* [Kalmykia Bulletin of Integrated Studies of Arid Territories]. 2009. No. 1 (18): 93–101. (In Russian).
 6. Stepanyan O.V., Startsev A.V. The modern state of biota in the Kuma-Manych Depression. Ust'-Manychskoe, Veselovskoe, Proletarskoe, and Chograiskoe Reservoirs (a review). *Arid Ecosystems*. 2014. Vol. 4, no. 2: 91–102. <https://doi.org/10.1134/S2079096114020103>.
 7. Sirota Yu.V. Dinamika razvitiya fitoplanktona v Chograyskom vodokhranilishche [Dynamics of the development of phytoplankton in the Chograian Water Reservoir]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 19–23 sentyabrya 2018 g.)* [Biological diversity: study, conservation, restoration, and rational exploitation. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Kerch, 19–23 September, 2018)]. Simferopol: Arial, 2018: 287–291. (In Russian).
 8. Sirota Yu.V. Raznoobrazie fitoplanktona v vodoemakh kompleksnogo naznacheniya Stavropol'skogo kraya [Variety of phytoplankton in reservoirs of complex purpose of Stavropol Territory]. In: *Sostoyaniye i perspektivy nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya rybokhozyaystvennogo kompleksa : materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Makhachkala, 24–25 oktyabrya 2019 g.)* [State and prospects of scientific and technological development of the fisheries industry. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference (with international participation) (Makhachkala, 24–25 October, 2019)]. Makhachkala: Dagestanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. M.M. Dzhambulatova [Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov] Publ., 2019: 277–281. (In Russian).
 9. Yatsenko-Stepanova T.N., Nemtseva N.V., Ignatenko M.E. Osnovnye podkhody k opredeleniyu trofnosti prirodnykh vodoemov [Basic approaches to identify the trophic level of natural water bodies]. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. 2014. No. 1: 1–9. (In Russian).
 10. Antonova R.V., Sevastyanov D.V. K voprosu o vliyaniy morfometricheskikh kharakteristik ozer i ikh vodosborov na troficheskiy status vodoemov [Morphometric parameters of lakes and their basins and their effect on the trophic status of reservoirs]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya* [Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography]. 2004. Issue 1: 83–87. (In Russian).
 11. Kitaev S.P. Tipizatsiya ozernykh ekosistem po troficheskomu statusu [Classification of lake ecosystems by trophic status]. In: *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh : materialy V Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem (g. Petrozavodsk, 10–14 sentyabrya 2012 g.)* [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and marine waters. Proceedings of the 5th All-Russian Symposium with international participation (Petrozavodsk, 10–14 September, 2012)]. Petrozavodsk: Institut vodnykh problem Severa Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2012: 353–356. (In Russian).
 12. Ulanova S.S. Geoekologicheskii monitoring iskusstvennykh vodoemov Respubliki Kalmykiya na baze geosistemnogo podkhoda [Geoecological monitoring of artificial reservoirs of Republic of Kalmykia on base of geosystem approach]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences]. 2014. Vol. 19, no. 5: 1597–1600. (In Russian).
 13. Gao B.-C. NDWI—A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, issue 3: 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
 14. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, issue 4, e354: 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
 15. Zhang T., Su J., Liu C., Chen W.-H., Liu H., Liu G. Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications. In: *Addressing global challenges through*

- automation & computing. *Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Automation and Computing (Huddersfield, 7–8 September, 2017)*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2017: 1–6. <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8081990>.
16. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117: 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>.
 17. Wang X., Gong Zh., Pu R. Estimation of chlorophyll *a* content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: A case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190, no. 10, e620: 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6978-7>.
 18. Popov A.N., Mukhutdinov V.F. Reshenie metodologicheskikh voprosov pri vybore metodov reabilitatsii evtrofnykh vodoemov [Solution of methodological problems in selection of methods of eutrophic water bodies' rehabilitation]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]*. 2023. No. 2: 101–117. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_2_7. (In Russian).
 19. Mineeva N.M., Korneva L.G., Solovyeva V.V. Soderzhanie khlorofilla *a* v edinitse biomassy fitoplanktona Volzhskogo kaskada (Rossiya) [Chlorophyll content per unit of phytoplankton biomass in the Volga River Reservoirs]. *Al'gologiya [Algologia]*. 2014. Vol. 24, no. 4: 477–488. (In Russian).
 20. Pobesma E., Bivand R. Spatial data science: With applications in R. 1st ed. New York: Chapman and Hall / CRC Press, 2023. 314 p. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>.
 21. Obrabotka materialov sputnikovykh snimkov Sentinel (s portala apps.sentinel-hub.com) dlya avtomatizatsii rascheta ploshchadi vodnogo zerkala, obrezki snimka do vodnogo zerkala i rascheta pokazatelya khlorofilla-*a* v vide indeksa NDCI [Processing of the Sentinel satellite images (from the web portal apps.sentinel-hub.com) for automatized calculation of the water surface area, image cropping to exclude non-water areas, and estimation of chlorophyll-*a* content as expressed by NDCI]. Available at: <https://gitverse.ru/remote-sensing/chograiskoe-chlorophyll> (accessed 22.06.2024). (In Russian).
 22. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla "a" v Krasnodarskom vodokhranilishche po dannym sputnikovykh snimkov [Spatial-temporal variability of the chlorophyll "a" concentration in the Krasnodar Reservoir according to the satellite images' data]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]*. 2021. No. 4: 67–84. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-4-4>. (In Russian).
 23. Sukhorukov B.L., Kovaleva G.E., Novikov I.V. Assessing the trophic state of water bodies by high-resolution remote spectrometry in visible band. *Water Resources*. 2017. Vol. 44, no. 1: 117–127. <https://doi.org/10.1134/S0097807817010183>.
 24. Gorskaya O.I. Sovershenstvovanie metodov al'golizatsii i biomelioratsii vodoema-okhladitelya Rostovskoy AES i priplotinnoy chasti Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Improvement of methods of algolization and biomelioration of the Rostov NPP cooling pond and the near dam part of the Tsimlyansk Reservoir]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]*. 2023. Vol. 13, no. 2: 14–23. (In Russian).
 25. Nikitenko E.V., Shcherbina G.Kh. Ikhtiofauna Chograyskogo vodokhranilishcha [Ichthyofauna of the Chogray Reservoir]. *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territoriy [Kalmykia Bulletin of Integrated Studies of Arid Territories]*. 2015. No. 1 (30): 33–38. (In Russian).

Для цитирования: Мирзоян А.В., Пятинский М.М., Сирота Ю.В. Типизация трофности водоемов на основе показателей хлорофилла по данным дистанционного зондирования на примере Чограйского водохранилища в период 2021–2023 гг. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2024. Т. 7, № 3: 36–49.

For citation: Mirzoyan A.V., Piatinskii M.M., Sirota Yu.V. Classification of the trophic capacity of water bodies based on chlorophyll content using remote sensing through the example of the Chogray Reservoir during the period 2021–2023. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2024. Vol. 7, no. 3: 36–49.

Об авторах:

Мирзоян Арсен Вячеславович, кандидат биологических наук, заместитель директора ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ФГБНУ «ВНИРО») (105187, г. Москва, Окружной проезд, 19), руководитель Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), arsenfish@vniro.ru; mirzoyanav@azniirkh.vniro.ru

Пятинский Михаил Михайлович, заместитель начальника центра цифровизации рыбохозяйственных исследований Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), ORCID 0000-0002-9915-2025, pyatinskiymm@azniirkh.vniro.ru

Сирота Юлия Викторовна, главный специалист лаборатории комплексных водоемов Отдела «Краснодарский» Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (350000, г. Краснодар, ул. Гоголя, 46), ORCID 0000-0003-2506-2147, sirotayv@azniirkh.vniro.ru

Поступила в редакцию 28.06.2024

Поступила после рецензии 18.07.2024

Принята к публикации 22.07.2024

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 28.06.2024

Revised 18.07.2024

Accepted 22.07.2024

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.