Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков

А.А. Лагута¹ , А.В. Погорелов²

alaguta@icloud.com

¹ ООО «АГМ Системы», г. Краснодар, Россия

² ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Краснодарское водохранилище в ходе эксплуатации с 1973 г. претерпело существенные изменения. В результате активного дельтоформирования рек Кубани и Белой водохранилище разделилось на два автономных водоема, его площадь уменьшилась на 35 %. Исследование нацелено на определение значимости фактора эвтрофикации в процессах преобразования Краснодарского водохранилища. **Методы.** По данным 51 спутникового снимка Sentinel-2 за 2015–2020 гг. выполнены расчеты концентрации хлорофилла «а» – показателя биомассы фитопланктона в водохранилище. Сенсор MSI позволяет рассчитать концентрацию хлорофилла «а» на основе нормализованного разностного индекса хлорофилла. Оценки хл «а» получены для общей площади 277 км² – основной чаши Краснодарского водохранилища и отчленившегося от него Тшикского водоема. Построены карты, отражающие пространственную и внутригодовую изменчивость хл «а». **Результаты.** Наиболее высокие средние концентрации хл «а» выявлены на неглубокой верхней части Краснодарского водохранилища, находящейся под влиянием стока рек Кубани и Пшиш с повышенным содержанием биогенного вещества. Локально высокие средние значения зафиксированы в областях стокового течения и на участках эстуариев левобережных притоков. В Тшикском водоеме с низкой интенсивностью водообмена связь концентрации хл «а» с гидродинамическими процессами не выражена. Выявлены особенности годового хода биомассы фитопланктона. Установлено, что трофический статус водохранилища подвержен сезонной изменчивости: весной 2/3 площади акватории соответствует эвтрофным водам, 1/3 – мезотрофным; осенью весь водоем имеет эвтрофный статус.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Краснодарское водохранилище, заиливание, спутниковые снимки, фитопланктон, индекс хлорофилла NDCI, хлорофилл «а», сезонная изменчивость, трофический статус.

© Лагута А.А., Погорелов А.В., 2021

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта МФИ-20.1/123.

Для цитирования: 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. С. 67–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.

Дата поступления 21.11.2020.

SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF THE CHLOROPHYLL «A» CONCENTRATION IN THE KRASNODAR RESERVOIR ACCORDING TO THE SATELLITE IMAGES' DATA

Andrey A. Laguta¹ , Anatoly V. Pogorelov²

alaguta@icloud.com

¹LLC «AGM Systems», Krasnodar, Russia

²Kuban State University, Krasnodar, Russia

ABSTRACT

Significance. The Krasnodar Reservoir has undergone significant transformations during its operation since 1973. As a result, of active delta formation of the Kuban and Belaya rivers, the reservoir was divided into two autonomous reservoirs, its area decreased by 35 %. The study is aimed at determining the significance of the eutrophication factor in the transformation of the Krasnodar Reservoir. **Methods.** Based on 51 Sentinel-2 satellite images for 2015–2020 the results of calculations of the concentration of chlorophyll «a» as an indicator of phytoplankton biomass in the reservoir are presented. The MSI sensor calculates the concentration of chlorophyll a (chl «a») based on the normalized chlorophyll difference index. Chl «a» estimates were obtained for a total area of 277 km²; the main bowl of the Krasnodar Reservoir and the Tshchik Reservoir, which was cut off from it. We have built maps reflecting the spatial and intra-annual variability of chl «a». **Results.** The highest average concentrations of chl «a» are characteristic of the shallow upper part of the Krasnodar Reservoir, which is influenced by the runoff of the Kuban and Pshish rivers with an increased nutrient content. Locally high average values of chl «a» were recorded in the areas of the runoff current and in the estuaries of the left-bank tributaries. In the Tshchik water body with a low intensity of water exchange, the relationship between the concentration of chl «a» and hydrodynamic processes is not evident. We have revealed features of the annual cycle of phytoplankton biomass. It has been established that the trophic status of the reservoir is subject to seasonal variability: in spring, 2/3 of the water area correspond to eutrophic waters, 1/3 to mesotrophic waters; in autumn, the entire reservoir has a eutrophic status.

Keywords: Krasnodar Reservoir, transformation factors, siltation, satellite images, phytoplankton, chlorophyll index NDCI, chlorophyll «a», cartography, spatial distribution, seasonal variability, trophic status.

Financing: We have conducted this research with financial support of the Kuban Scientific Foundation within the framework of scientific project MFI-2-1/123.

For citation: Laguta A.A., Pogorelov A.V. Spatial-temporal Variability of the Chlorophyll «a» Concentration in the Krasnodar Reservoir According to the Satellite Images' Data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021, No. 4. P. 67–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.

Received November 21, 2020.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации Краснодарского водохранилища с 1973 г. изменились его проектные характеристики (уменьшились площадь, полезный объем, средние глубины), существенно преобразовались конфигурация водоема и морфология дна. Изменение конфигурации и сокращение площади зеркала вызвано в основном формированием надводной «перемычки» с отчленением бывшего Тшицкого водохранилища (рис. 1). Исследуемые водоемы существенно различаются по площади и объему, а также по относительной площади литорали (табл. 1). Наблюдаемая трансформация водохранилища с изменениями интенсивности водообмена в автономных водоемах неизбежно влияет на состояние биотических компонентов и гидробиологический режим [1–3].

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики Краснодарского водохранилища и Тшицкого водоема [1]
Table 1. The main morphometric characteristics of the Krasnodar Reservoir and the Tshchik Reservoir [1]

Показатель	Краснодарское водохранилище	Тшицкий водоем
Объем при НПУ (32,75 м БС), млн м ³	1448,94	87,75
Площадь зеркала, км ²	229,03	46,85
Площадь, км ² /доля % мелководий до глубины 2 м	40,31/17,6	21,66/46,2

Фотосинтетические пигменты фитопланктона, в частности, хлорофилл «а» (хл «а»), служат биологическими маркерами процессов образования, миграции и трансформации органических веществ внутри водоема. Концентрация хл «а», преобладающего во всех группах водорослей, является общепринятым показателем биомассы фитопланктона. Для определения биологической продуктивности морских акваторий и оценки концентрации хлорофилла «а» эффективно применяются данные дистанционного зондирования Земли [4–12 и др.]. Широко используются эмпирические

соотношения хл «а» и спектральных характеристик излучения водной поверхности с разработкой региональных алгоритмов расчетов концентрации хл «а» [8–12].

В настоящее время практика анализа пространственно-временного распределения фитопланктона в водохранилищах представлена недостаточно. Наиболее детально результаты изучения фитопланктона в водохранилищах бассейна Волги по данным прямых измерений изложены в [13]. Заслуживают внимания экспериментальная методика и результаты исследований фитопланктона и хлорофилла «а» по данным спутниковых сним-

ков в Новосибирском [14] и Горьковском [15] водохранилищах. Сведения о численности, сезонной и многолетней динамике фитопланктона в реках и водоемах на юге России представлены преимущественно исследованиями рыбохозяйственной направленности [16–18].

Исследования временной и пространственной изменчивости фитопланктона в Краснодарском водохранилище – крупнейшем на Северном Кавказе искусственном водоеме – ранее не проводились. Дистанционная оценка хл «а» позволяет судить о динамике фитопланктонного сообщества в Краснодарском водохранилище – водоеме с очевидными признаками деградации экосистемы [1, 3]. Динамика фитопланктона вызывает интерес именно в связи с реакцией биоты на трансформацию водохранилища.

Фитопланктон – не единственный фактор, влияющий на оптические свойства внутренних вод. Прибрежные воды, озера и воды континентального шельфа по своим оптическим свойствам относятся к водам II типа [19], где взвешенное неорганическое вещество, желтое вещество (растворенное органическое вещество, представленное гумусовыми кислотами) и фитопланктон вносят значительный вклад в оптические характеристики воды.

В данной работе поставлена задача по спутниковым снимкам оценить распределение и временную изменчивость хл «а» в Краснодарском водохранилище и Тщикском водоеме на общей площади около 277 км². Подобная оценка предполагает построение полей хл «а» за период 2015–2020 гг. с последующим анализом сезонной изменчивости и пространственных закономерностей распределения хл «а», а также определение трофического статуса водоемов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенного исследования использованы материалы дистанционного зондирования Земли спутниками Sentinel-2¹. Оптические сенсоры MSI, установленные на Sentinel-2, – перспективный инструмент изучения внутренних пресноводных экосистем [20]. Сенсор MSI выполняет съемку в 13 каналах – от голубого до коротковолнового инфракрасного, что обеспечивает надежную коррекцию атмосферы на основе изображений даже в очень мутных водах [21]. Выбранный для анализа период (с сентября 2015 г. по март 2020 г.) и использованные снимки определены поставленной в исследовании задачей.

¹ Официальный сайт Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства. Режим доступа: <https://code.nasa.gov/> (дата обращения: 01.05.2020).

Среди существующих программных продуктов, предназначенных для обработки изображений Sentinel-2, предпочтение отдано ACOLITE. Модуль ACOLITE разработан для водных приложений снимков высокого разрешения Landsat (5/7/8) и Sentinel-2 (A/B) [21, 22] и предусматривает выбор алгоритмов относительной и абсолютной оценки содержания взвешенного вещества по спектральной яркости изображений. При этом алгоритмы применимы и для мутных прибрежных и внутренних вод. Для расчетов хл «а» применена двухканальная модель, использующая изображения в красном (665 нм) и ближнем инфракрасном (705 нм) диапазонах. Высокое пространственное разрешение снимков Sentinel-2 является преимуществом в сравнении с другими, представленными в свободном доступе спутниковыми снимками. Нормализованный разностный индекс хлорофилла *NDCI* определяли по отношению [23]:

$$NDCI = \frac{Rrs(705) - Rrs(665)}{Rrs(705) + Rrs(665)}, \quad (1)$$

где $Rrs(\lambda)$ – значение коэффициента спектральной яркости на длине волны λ .

Физическая сущность индекса – отношение разности коэффициентов спектральной яркости на пиках поглощения (705 нм) и отражения (665 нм) хл «а» к сумме этих показателей. Оценка концентрации хл «а» (мг/м³) из индекса выполнена по эмпирической формуле [23]. Особенности и преимущества выбранного алгоритма расчета концентрации хлорофилла для внутренних вод в сравнении с другими методами [8, 9, 11, 12] рассмотрены в [10]. Сравнительный анализ показал, что *NDCI* имеет наименьшую относительную среднеквадратическую погрешность расчетов. Построение полей концентрации хл «а» осуществлялось в программе ArcGIS (Esri) с разрешением 20 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На развитие фитопланктона в Краснодарском водохранилище, кроме небольших глубин водоема, оказывают влияние относительно длительный период вегетации и высокая температура воды [17, 18]. В целом в составе альгофлоры в водохранилище весной доминируют диатомовые водоросли, летом и осенью – синезеленые. Согласно [18], горизонтальное распределение фитопланктона в водохранилище неравномерно: наиболее продуктивный по микрофлоре участок – левобережная зона между устьями рек Псекупс и Пишиш.

Фрагмент результатов расчета концентрации хл «а» представлен в табл. 2.

Таблица 2. Показатели концентрации хл «а» (мг/м^3) в Краснодарском водохранилище и Тшикском водоеме по данным спутниковых снимков Sentinel-2

Table 2. Chl «а» concentration indices (mg/m^3) in the Krasnodar Reservoir and the Tshchik Reservoir according to the Sentinel-2 satellite images

Дата	Тшикский водоем			Краснодарское водохранилище		
	хл «а» _{ср}	хл «а» _{min}	хл «а» _{max}	хл «а» _{ср}	хл «а» _{min}	хл «а» _{max}
19.09.2015	15,1	7,5	78,1	14,1	5,2	74,9
29.09.2015	10,3	6,0	39,1	10,7	5,3	41,2
27.03.2016	11,4	6,9	34,3	—*		
15.07.2016	7,9	4,5	94,1	9,9	4,5	106,0
24.08.2016	7,3	4,8	67,4	—		
03.09.2016	10,1	5,4	65,1	9,8	4,5	111,3
03.10.2016	10,9	4,5	92,4	10,2	4,5	89,0
01.05.2017	7,9	4,8	78,5	9,5	4,5	71,0
30.06.2017	6,1	4,5	78,3	—		
09.08.2017	10,9	5,6	22,5	—		
19.08.2017	14,0	7,8	33,2	10,9	5,5	25,7
18.09.2017	—			9,1	4,5	42,8
08.10.2017	—			9,4	4,5	41,8
02.03.2018	—			8,9	4,5	50,4
01.04.2018	11,7	6,4	29,3	—		
06.04.2018	10,8	7,4	33,0	9,4	4,5	61,1
11.04.2018	9,6	6,2	30,2	9,4	4,9	73,8
16.04.2018	9,5	5,7	30,2	—		
26.04.2018	9,7	5,4	27,0	9,2	4,5	69,0
01.05.2018	—			8,1	4,5	62,9
10.06.2018	—			6,9	4,5	97,8
15.06.2018	5,9	4,5	72,0	—		

Продолжение таблицы 2.

Table 2.

Дата	Тщикский водоем			Краснодарское водохранилище		
	хл «а» _{ср}	хл «а» _{min}	хл «а» _{max}	хл «а» _{ср}	хл «а» _{min}	хл «а» _{max}
10.07.2018	4,5	6,0	38,0	7,4	4,5	77,5
25.07.2018	7,5	4,6	41,3	–		
04.08.2018	–			8,4	4,5	94,8
14.08.2018	8,9	5,1	49,9	10,2	4,5	106,1
24.08.2018	12,7	6,0	36,2	11,2	6,0	31,5
29.08.2018	10,4	5,8	44,3	–		
03.09.2018	–			10,4	5,5	37,1
13.09.2018	11,1	4,6	39,4	11,0	4,8	76,9
18.09.2018	12,3	7,2	57,7	11,8	4,9	105,6
28.09.2018	10,8	5,4	57,8	–		
08.10.2018	12,0	5,5	51,9	10,0	4,5	74,1
20.02.2019	14,4	6,3	46,7	9,9	4,5	108,3
07.03.2019	13,6	5,3	42,2	10,0	4,6	76,8
29.08.2019	13,4	5,2	96,7	13,5	7,8	46,5
03.09.2019	–			11,1	4,6	62,6
13.10.2019	9,3	4,5	88,4	11,2	4,5	67,3
16.03.2020	14,7	6,0	53,3	–		

Примечание: * – данные отсутствуют из-за неудовлетворительного качества спутникового снимка.

Проанализируем проявления сезонности и пространственное распределение концентрации хл «а» в исследуемых водоемах, воспользовавшись показателями средней по акватории концентрации хл «а» на дату съемки в пределах зоны постоянного подпора.

Краснодарское водохранилище. Особенность Краснодарского водохранилища – высокие объемы ежегодной сработки, приводящие к внутригодовым колебаниям площади (в два и более раза) и объема (в шесть и более раз), а также соответствующей интенсивности обменных процессов.

Внутригодовые изменения концентрации хл «а» показаны на рис. 2. Судя по сглаженной кривой, по мере прогрева воды и развития диатомового комплекса фитопланктона отмечается рост концентрации органического вещества – до 10 мг/м³. В июне наблюдается короткая летняя депрессия (фаза «чистой воды») с минимальной биомассой органического вещества, после чего с дальнейшим прогревом воды идет рост теплолюбивой летней альгофлоры. Периоду июль – сентябрь соответствует второй пик развития фитопланктона – около 11 мг/м³ на линии тренда. Следует отметить большую вариативность концентрации хл «а» в разные годы в августе – ноябре.

При анализе полученных величин хл «а» следует учитывать дополнительные факторы сезонной изменчивости спектральных характеристик поверхности воды – взвешенные наносы и вторичное взмучивание илистых фракций. Наибольшие объемы взвешенных наносов у р. Кубани наблюдаются в период ее половодья, а у левобережных притоков, вследствие паводкового режима, обычно осенью и зимой [24]. Взмучивание илистых фракций под воздействием ветрового волнения при ежегодной сработке и наполнении водохранилища отмечается на осушаемых и за-

тапливаемых участках в зоне переменного подпора. Совместное влияние этих факторов обуславливает высокие значения мутности воды в осенне-зимний период.

Анализ пространственного распределения хл «а» с построением карт средних за сезон значений выполнен для весны и осени. Сложность построения карт для лета вызвана большой изменчивостью уровня воды. Весной уровни близки к нормальному подпорному уровню (НПУ = 32,75 м). Как следует из (рис. 3), относительно неглубокой северо-восточной части водоема в каждый из сезонов свойственны повышенные средние значения хл «а». В верхней части водохранилища очевидно влияние вод речного стока (Кубань, Пишиш) с повышенной концентрацией биогенных веществ. Кроме того, высокие концентрации хл «а» свойственны областям стокового течения и участкам эстуариев левобережных притоков. В устье р. Марты весной средняя величина хл «а» достигает 35,3 мг/м³ (рис. 3а).

Пространственная изменчивость хл «а» в Краснодарском водохранилище в конкретные даты заметно отличается от распределения средних показателей. О фактическом распределении хл «а» по данным снимка 26.04.2018 г. дает представление рис. 4. Значения хл «а» изменяются в диапазоне 4,5...68,4 мг/м³ при среднем для акватории 9,3 мг/м³, при этом среднее квадратическое отклонение составляет 3,3 мг/м³, а коэффициент асимметрии – 2,2. В структуре пространственного распределения хл «а» отчетливо маркируются как локальные русловые струи в эстуариях, так и течения, отражающие общую циркуляцию водных масс на дату съемки. В Тщикском водоеме с ослабленной циркуляцией и преобладающими глубинами 1,6–1,7 м изменчивость хл «а» менее выражена: при диапазоне значений 5,6...33,9 мг/м³ средняя величина равна 9,7 мг/м³, среднее квадратическое отклонение – 2,2 мг/м³, коэффициент асимметрии – 0,6.

Осенью развитие водорослей в Краснодарском водохранилище происходит на фоне межени, переходящей в фазу постепенного наполнения водоема со средними уровнями около 27,0 м. Несмотря на очевидные различия в контурах водоемов весной и осенью, распределения средних величин хл «а» в общем подобны. На подавляющей части акватории средние значения колеблются в пределах 15...20 мг/м³. Наибольшие средние концентрации (25 мг/м³ и более) отмечены в северо-восточной части водохранилища.

Тщикский водоем. В отличие от Краснодарского водохранилища автономный Тщикский водоем не подвержен сезонной сработке. Ежегодное сокращение доступной для анализа площади водной поверхности происходит из-за зарастания литорали водоема рогульником плавающим (*Trapa natans*), отсутствующим в Краснодарском водохранилище. Изменения

средней концентрации хл «а» в акватории Тшикского водоема имеют выраженный сезонный характер (рис. 5). Весенний пик, соответствующий цветению диатомовых водорослей, со средними для акватории значениями до $14,7 \text{ мг/м}^3$ наблюдается с конца февраля до середины марта. Максимальные концентрации в этот период достигают $46,4 \text{ мг/м}^3$. После весеннего пика концентрация хл «а» монотонно снижается до $6\text{--}8 \text{ мг/м}^3$ в июне-июле, в недолгий период летней депрессии. Далее рост средних значений концентрации хлорофилла «а» продолжается до поздней осени, достигая своего пика ($16\text{--}18 \text{ мг/м}^3$) в ноябре. Максимальные из измеренных значения (88 мг/м^3) соответствуют осеннему периоду.

Распределение средних значений концентрации хл «а» находится в зависимости от глубин. Так, весной в районе литорали наблюдаются повышенные значения – более 10–15 мг/м³, в центральной части водоема с глубинами более 2 м около 7–9 мг/м³ (рис. 3а). Осенью литораль осушается, распределение концентрации хл «а» становится более однородным (рис. 3б): характерный диапазон среднесезонных величин составляет 10–15 мг/м³. Отмечаются локальные очаги цветения с максимальными показателями хл «а» до 20 мг/м³.

Состояние вод Тщикского водоема характеризуется отчетливыми сезонными фазами, при этом средние концентрации хл «а» весеннего и летне-осеннего максимумов выше, чем в Краснодарском водохранилище, а в период летней депрессии – ниже (рис. 2, рис. 5). Связь распределения хл «а» с гидродинамическими процессами в Тщикском водоеме не выражена.

Трофический статус водоемов – интегральная характеристика, определяемая рядом взаимосвязанных процессов. К универсальным индикаторам уровня трофности относят величину первичной продукции как меру интенсивности новообразования органического вещества в водоеме, в т. ч. концентрацию хл «а». Часто трофический статус водоема определяют через диапазон концентрации хл «а». Определим трофический статус анали-

Рис. 5. Сезонные изменения средней концентрации хл «а» в Тщикском водоеме: линией обозначен тренд среднемесячной концентрации хл «а» за период 2015–2020 гг.

Fig. 5. Seasonal changes in the average concentration of chl «a» in the Tshchik Reservoir. Line – the trend of the average monthly concentration of chl «a» for the period 2015–2020.

зируемых водоемов, воспользовавшись шкалой хл «а» для озер умеренной зоны [25]: 0,1–1,0 мкг/л – олиготрофный, 1,0–10 мкг/л – мезотрофный, более 10 мкг/л – эвтрофный.

Оценка трофического статуса водоема выполнялась по данным средних многолетних значений концентрации хл «а». Весной часть акватории Краснодарского водохранилища на общей площади 94 км² соответствует мезотрофному статусу, остальные 145 км² – эвтрофные воды (рис. 6а). Отдельно отметим наличие в эстуарии р. Марты локальных гипертрофных участков. В осенний период весь водоем относится к классу эвтрофных. Акватория Тщикского водоема однородна по трофическому статусу (эвтрофные воды) как в весенний период, так и осенью.

Выявленные посредством оценки концентрации хл «а» показатели эвтрофирования характеризуют поступление в воду органических веществ, которые, в свою очередь, в сочетании с отложениями минеральных частиц аллохтонного происхождения отражают участие биогенной составляющей в заилении Краснодарского водохранилища.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые по данным спутниковых снимков Sentinel-2 за 2015–2020 гг. показаны закономерности пространственно-временного распределения хл «а» в Краснодарском водохранилище. Расчеты концентрации хл «а» на основе нормализованного разностного индекса хлорофилла *NDCI* выполнены с помощью модуля ACOLITE. В результате построены карты средней концентрации хл «а» в весенний и осенний сезоны. Установлено, что наиболее высокие средние значения хл «а» свойственны относительно неглубокой верхней части Краснодарского водохранилища с повышенным влиянием на концентрацию биогенного вещества стока рек Кубани и Пшиш а также областям стокового течения и участкам эстуариев левобережных притоков. Внутригодовой ход хл «а» хорошо выражен. С января наблюдается рост концентрации органического вещества; в июне – летняя депрессия или фаза «чистой воды» с минимальной биомассой органического вещества; вто-

рой период высокой концентрации хл «а» отмечается в августе-сентябре. Трофический статус водохранилища подвержен сезонной изменчивости: весной большая часть Краснодарского водохранилища соответствует эвтрофному статусу, в осенний период весь водоем относится к классу эвтрофных.

Проведенные исследования расширяют представления об особенностях и трендах многолетней трансформации Краснодарского водохранилища и закладывают предпосылки для прогнозных оценок преобразований водоема с учетом биогенной компоненты заиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съёмок // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. № 4 (47). С. 54–66.
2. Лагута А.А., Погорелов А.В. Трансформация Краснодарского водохранилища (1941–2018 гг.) // Известия высших учебных учреждений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 3. С. 45–54.
3. Погорелов А.В., Лагута А.А. Краснодарское водохранилище: состояние и трансформация за период эксплуатации // Региональные географические исследования / под общей ред. А.В. Погорелова. Краснодар, 2019. С. 34–42.
4. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В. и др. Оценки концентрации хлорофилла «а» и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 563–566.
5. Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла-а в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: автореф. дис. канд. геогр. наук. Мурманский морской биол. ин-т КНЦ РАН. 2011. 125 с.
6. Буканова Т.В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: автореф дис.... канд. геогр. наук. Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 2014. 142 с.
7. Сапрыгин В. В., Бердников С. В., Кулыгин В.В., Дашкевич А.В., Местецкий Л.М. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS // Океанология. 2018. Т. 3. С. 751–762.
8. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges. Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4. P. 4–8.
9. Gitelson A.A., Gao B.C., Li R.R., Berdnikov S.V. Saprygin V.V. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean – the Azov Sea case study. Environmental Research Letters. 2011. Vol. 6. No 2, 6 p.
10. Augusto-Silva P. B., Ogashawara I., Barbosa C., Carvalho L., Jorge D., Fornari C.I., Stech J.L. Analysis of MERIS Reflectance Algorithms for Estimating Chlorophyll-a Concentration in a Brazilian Reservoir. Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Pp. 11689–11707.
11. Huang C., Zou J., Li Y., Yang H., Shi K., Li J., Wang Y., Chena X., Zheng F. Assessment of NIR-red algorithms for observation of chlorophyll-a in highly turbid inland waters in China. ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing. 2014. Vol. 93. Pp. 29–39.

12. Zhang Y., Ma R., Duan H., Loisel S., Xu J. A spectral decomposition algorithm for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Taihu, China. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. Pp. 5090–5106.
13. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / под ред. А.И. Копылова. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
14. Ковалевская Н.М., Кириллов В.В. Анализ пространственного распределения и сезонной динамики фитопланктона с использованием спутниковых данных // Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / под ред. О.Ф. Васильева. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2014. С. 125–131.
15. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. On Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2019. 11, 1215. Pp. 1-29.
16. Аксенова Е.И., Труфанова З.А. Фитопланктон Дона и Кубани в условиях меняющегося режима // Труды ВНИРО. 1974. Т. 1. С. 59–66.
17. Москул Г.А. Рыбохозяйственное освоение Краснодарского водохранилища. СПб: ГосНИОРХ, 1994. 121 с.
18. Каширин А.В., Сирота Ю.В. Потенциал повышения биопродуктивности Краснодарского водохранилища за счет резервов кормовой базы // Труды АзНИИРХ. Биоресурсные исследования. Ростов-на-Дону, 2017. С. 75–81.
19. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22. No. 4. Pp. 709–722.
20. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* 2012. No 120. Pp. 25–36.
21. Vanhellemont Q., Ruddick K. ACOLITE For Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI imagery. Submitted for the proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium held in Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016, ESA Special Publication SP-740.
22. Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment* 225. Pp. 175–192.
23. 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. No. 117. Pp. 394–406.
24. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ / под ред. Куприянова В.В. Л.: ГМИ. 1973. 448 с.
25. Антонова Р.В., Севастьянов Д.В. К вопросу о влиянии морфометрических характеристик озер и их водосборов на трофический статус водоемов // Вестник СПбГУ. 2004. Сер. 7. Вып. 1. С. 83–87.

REFERENCES

1. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Osobennosti zaileniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha. Opyt otsenki po dannym batimetricheskikh syomok [Features of siltation of the Krasnodar reservoir. Evaluation experience from bathymetric survey data]. *Geograficheskii vestnik* = Geographical bulletin. 2018. No. 4 (47). Pp. 54–66 (in Russ).
2. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Transformatsiya Krasnodarskogo vodokhranilishcha (1941–2018 gg.) [Transformation of the Krasnodar reservoir (1941–2018)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh uchrezhdeniy. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki*. [News of higher education institutions. Northern Caucasus Region] 2019. No. 3. Pp. 45–54 (in Russ).

3. Pogorelov A.V., Laguta A.A. Krasnodarskoe vodokhranilishche: sostoyanie i transformatsiya za period ekspluatatsiyi [Krasnodar reservoir: state and transformation over the period of operation]. *Regionalnye geograficheskie issledovaniya. Sbornik nauchnykh trudov*. [Regional geographic studies. Collection of academic works] Krasnodar, 2019. Pp. 34–42 (in Russ).
4. Matishov G.G., Povazhnyi V.V., Berdnikov S.V. i dr. Otsenki kontsentratsiyi khlorofilla «a» i pervichnoy produktitsiyi v Azovskom more s ispol'zovaniem sputnikovykh dannykh [Estimates of chlorophyll «a» concentration and primary production in the Sea of Azov using satellite data]. 2010. Vol. 432. No. 4. Pp. 563–566 (in Russ).
5. Saprygin V.V. Izucheniye raspredeleniya khlorofilla-a v Azovskom more po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa i rezul'tatam sudovykh izmereniy [Study of the distribution of chlorophyll-a in the Sea of Azov based on data from remote sensing of the Earth from space and the results of ship measurements]: dis. kand. geograf. nauk. Murm. morskoy biol. in-t KNC RAN. 2011. 125 p. (in Russ).
6. Bukanova T.V. Tendentsiy evtrofirovaniya yugo-vostochnoy chasti Baltiyskogo morya po sputnikovym dannym [Trends in eutrophication of the southeastern Baltic Sea based on satellite data]: Dis. ... kand. geograf. nauk. In-t okeanologii im. P.P. Shirshova RAN. 2014. 142 p. (in Russ).
7. Saprygin V. V., Berdnikov S. V., Kulygin V.V., Dashkevich L.V., Mesteckiy L.M. Prostranstvennoye raspredeleniye i sezonnaya dinamika kontsentratsiyi khlorofilla «a» v Azovskom more po dannym sputnikovykh snimkov spektrometra MERIS [Spatial distribution and seasonal dynamics of chlorophyll «a» concentration in the Sea of Azov according to satellite images of the MERIS spectrometer]. *Okeanologiya*. [Oceanology]. 2018. Vol. 3. Pp. 751–762 (in Russ).
8. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyi V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges. *Environmental Research Letters*. 2009. Vol. 4. No. 4, 8 pp.
9. Gitelson A. A., Gao B. C., Li R.R., Berdnikov S.V. Saprygin V.V. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean – the Azov Sea case study. *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6. No. 2. (6 pp.).
10. Augusto-Silva P. B., Ogashawara I., Barbosa C., Carvalho L., Jorge D., Fornari C.I., Stech J.L. Analysis of MERIS Reflectance Algorithms for Estimating Chlorophyll-a Concentration in a Brazilian Reservoir. *Remote Sensing*. 2014. 6. Pp. 11689–11707.
11. Huang C., Zou J., Li Y., Yang H., Shi K., Li J., Wang Y., Chena X., Zheng F. Assessment of NIR-red algorithms for observation of chlorophyll-a in highly turbid inland waters in China. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*. 2014. 93. Pp. 29–39.
12. Zhang Y., Ma R., Duan H., Loiselle S., Xu J. A spectral decomposition algorithm for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Taihu, China. *Remote Sensing*. 2014. 6. Pp. 5090–5106.
13. Korneva L.G. Fitoplankton vodokhranilishch basseyna Volgi [Phytoplankton of reservoirs in the Volga basin]. Kostroma: Kostromskoy pechatniy dom, 2015. 284 p. (in Russ.).
14. Kovalevskaya N.M., Kirillov V.V. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya i sezonnoy dinamiki fitoplanktona s ispol'zovaniem sputnikovykh dannykh [Analysis of the spatial distribution and seasonal dynamics of phytoplankton using satellite data]. *Mnogoletnyaya dinamika vodno-ekologicheskogo rezhima Novosibirskogo vodokhranilishcha* [Many-year dynamics of aquatic environmental regime]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. Pp. 125–131. (in Russ).
15. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. On Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2019. 11. 1215. Pp. 1–29 (in Russ).

16. Aksenova E.I., Trufanova Z.A. Fitoplankton Dona i Kubani v usloviyakh menyayushchego-sya rezhima [Phytoplankton of the Don and Kuban in a changing regime]. *Trudy VNIRO*. 1974. Vol. 1. Pp. 59–66 (in Russ).
17. Moskul G.A. Rybokhozyaystvennoye osvoenie Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Fishes development of the Krasnodar reservoir]. SPb: GosNIOIRH, 1994. 121 p. (in Russ).
18. Kashirin A.V., Sirota YU.V. Potentsial povysheniya bioproduktivnosti Krasnodarskogo vodokhranilishcha za schet rezervov kormovoy bazy [Potential for increasing the bioproduktivty of the Krasnodar reservoir due to the reserves of the forage base]. *Trudy AzNIIRH. Bioresursnye issledovaniya* [Works of AzNIIRH Researches of biological resources]. Rostov-na-Donu. 2017. Pp. 75–81 (in Russ).
19. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22. No. 4. Pp. 709–722.
20. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* 2012, 120. Pp. 25–36.
21. Vanhellemont Q., Ruddick K. ACOLITE For Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI imagery. Submitted for the proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium held in Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016, ESA Special Publication SP-740.
22. Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225. Pp. 175–192.
23. 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*, 117 (2012), Pp. 394–406.
24. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. Vol. 08. Severniy Kavkaz. [Northern Caucasus] L.: GMI. 1973. 448 p.
25. Antonova R.V., Sevast'yanov D.V. K voprosu o vliyaniyi morfometricheskikh kharakteristik ozer i ikh vodosborov na troficheskiy status vodoyeomov [On the question of the influence of the morphometric characteristics of lakes and their catchments on the trophic status of water bodies]. *Vestnik SPbGU* [Herald of the St. Petersburg University]. 2004. Ser. 7. Vyp. 1. Pp. 83–87.

Сведения об авторах:

Лагута Андрей Александрович, ведущий инженер, ООО «АГМ Системы», Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Фрунзе, 22/1; ORCID: 0000-0001-6587-0224; ResearcherID: Z-1338-2018; Scopus Author ID: 57211746312; e-mail: alaguta@icloud.com

Погорелов Анатолий Валерьевич, д-р геогр. наук, заведующий кафедрой геоинформатики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149; ORCID: 0000-0002-5239-2785; Scopus Author ID: 55536906800; ResearcherID: N-2133-2017; e-mail: pogorelov_av@bk.ru

About the authors:

Andrey A. Laguta, Leading Engineer, AGM Systems LLC, ul. Frunze, 22/1, Krasnodar, 350063, Russia; ORCID: 0000-0001-6587-0224; ResearcherID: Z-1338-2018; Scopus Author ID: 57211746312; e-mail: alaguta@icloud.com

Anatoly V. Pogorelov, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Head of the Department of Geo/informatics, Kuban State University, ul. Stavropolskaya, 149, Krasnodar, 350040, Russia; ORCID: 0000-0002-5239-2785; Scopus Author ID: 55536906800; ResearcherID: N-2133-2017; e-mail: pogorelov_av@bk.ru