ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY AND CONSERVANCY

УДК 574.5(476)574.583

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАТОРИНО И ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПИГМЕНТНЫЕ ИНДЕКСЫ

А. А. ЖУКОВА¹⁾, О. С. СМОЛЬСКАЯ¹⁾, Е. А. ВИШНЕВЕЦКАЯ¹⁾, Ю. КАРОСИЕНЕ²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Центр исследований природы, ул. Академии, 2, LT-08412, г. Вильнюс, Литва

Исследования на оз. Баторино были направлены на изучение количественных и качественных характеристик автотрофного компонента донных отложений, а также поиск их связи с данными спектрального анализа пигментного состава. Содержание суммарного хлорофилла *a* (без поправки на присутствие феопигментов) было относительно невысоким – $12,7 \pm 10,2$ мкг/г сырой массы донных отложений. Содержание каротиноидов в среднем составило $10,24 \pm 4,89$ мкг/г сырой массы донных грунтов. Показано, что для характеристики структурных показателей донных отложений могут применяться пигментные индексы E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} , отражающие долговременные тренды в развитии продуцентов в экосистеме, в первую очередь фитопланктона. В ходе предварительного анализа проб были рассчитаны вспомогательные пигментные индексы контроля чистоты экстракта и четкости прописанного спектра: E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{412}/E_{720} , E_{430}/E_{530} , E_{664}/E_{530} , E_{412}/E_{664} .

Образец цитирования:

Жукова АА, Смольская ОС, Вишневецкая ЕА, Каросиене Ю. Содержание растительных пигментов в донных отложениях озера Баторино и их спектральные пигментные индексы. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2021;2:84–96.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2021-2-84-96>

For citation:

Zhukava HA, Smolskaya VS, Vishnevetskaya EA, Karosienė J. The content of plant pigments in bottom sediments of Batorino Lake and their spectral pigment indices. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2021;2:84–96. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2021-2-84-96>

Авторы:

Анна Анатольевна Жукова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета.
Ольга Сергеевна Смольская – кандидат биологических наук; доцент кафедры общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета.
Екатерина Александровна Вишневецкая – студентка биологического факультета. Научный руководитель – А. А. Жукова.
Юрате Каросиене – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории альгологии и экологии микроорганизмов Института ботаники.

Authors:

Hanna A. Zhukava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.
anna_eco@tut.by
Volha S. Smolskaya, PhD (biology); associate professor at the department of general ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.
sylimova_1991@mail.ru
Ekaterina A. Vishnevetskaya, student at the faculty of biology.
kv lenta2001@gmail.com
Jūratė Karosienė, PhD (biology); senior researcher at the laboratory of algology and microbial ecology, Institute of botany.

Выявлена тесная обратная связь индекса E_{430}/E_{664} и количества хлорофилла a на разных горизонтах колонок донных отложений ($r = -0,7$), а также обратная связь средней силы между индексом E_{430}/E_{412} и долей феопигментов ($r = -0,56$).

Ключевые слова: оз. Баторино; донные отложения; пигментные индексы; хлорофилл; феопигменты; каротиноиды.

THE CONTENT OF PLANT PIGMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF BATORINO LAKE AND THEIR SPECTRAL PIGMENT INDICES

H. A. ZHUKAVA^a, V. S. SMOLSKAYA^a, E. A. VISHNEVETSKAYA^a, J. KAROSIENĖ^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bNature Research Centre, 2 Akademijos Street, Vilnius LT-08412, Lithuania

Corresponding author: V. S. Smolskaya (syylimova_1991@mail.ru)

Studies on the Batorino Lake were aimed at assessing the quantitative and qualitative characteristics of the autotrophic component of bottom sediments, as well as searching for their relationships with the data of spectral analysis of the pigment composition. The content of total chlorophyll a (without correction for the presence of phaeopigments) was relatively low – $12.7 \pm 10.2 \mu\text{g/g}$ wet weight of bottom sediments. The content of carotenoids averaged $10.24 \pm 4.89 \mu\text{g/g}$ wet weight of bottom sediments. It has been shown that pigment indices: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} , characterise the structural indicators of bottom sediments and reflect the long-term trends in the development of primary producers in water ecosystems, primarily phytoplankton. During the preliminary analysis, auxiliary pigment indices for controlling the purity of the extract and the clarity of the prescribed spectrum were calculated: E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{412}/E_{720} , E_{430}/E_{530} , E_{664}/E_{530} , E_{412}/E_{664} . A close inverse relationship was revealed between E_{430}/E_{664} index and the amount of chlorophyll a at different depths of bottom sediments ($r = -0.7$), as well as an average correlation between the E_{430}/E_{412} index and the proportion of phaeopigments ($r = -0.56$).

Keywords: Batorino Lake; bottom sediments; pigment indices; chlorophyll; phaeopigments; carotenoids.

Введение

Временные и пространственные изменения в содержании хлорофилла дают представление о продукционно-деструкционных процессах в водной экосистеме, а также ее устойчивости и способности к самоочищению. Хлорофилл – неотъемлемый элемент процессов синтеза органического вещества, отражающий интенсивность функционирования автотрофного блока в водоемах, поэтому пигментные характеристики донных отложений могут служить индикаторами интегральных изменений, происходящих в водных экосистемах [1; 2].

Концентрация хлорофилла и продуктов его распада в донных отложениях в эвфотной зоне определяется функционированием комплекса микробентических водорослей и процессами седиментации хлорофиллсодержащей взвеси из водной толщи. При отмирании клеток водорослей наиболее быстрая деградация пигментов происходит, когда они подвергаются одновременному действию высокой интенсивности излучения, температуры и кислорода, т. е. находятся в состоянии, характерном для эпилимниона водоемов. Кроме того, важной характеристикой является скорость осаждения органического биогенного материала, на которую оказывают влияние многие факторы, например питание планктонных беспозвоночных и скорость осаждения клеток. Все эти особенности необходимо учитывать при оценке пигментного состава донных осадков и изучении спектров их поглощения [3].

Развивающийся в толще водоема фитопланктон образует на дне осадок, содержание пигментов в котором прямо пропорционально размеру формирующей его водорослевой культуры и остается относительно постоянным в течение длительного периода. Содержание пигментов в отдельных слоях донных отложений также может быть показателем продуктивности водоема на протяжении долгого времени.

Фотосинтетические пигменты претерпевают химические изменения и в конечном итоге окисляются до бесцветных соединений. Эти изменения контролируются в водоеме различными физическими, химическими и биотическими факторами. Содержание пигментов в осадочном слое будет зависеть от условий, преобладавших в водоеме, когда образовался осадок¹.

¹Reuss N. Sediment pigments as biomarkers of environmental change : PhD thesis. Roskilde : Natl. Environ. Res. Inst., 2005. 33 p.

В литературе встречается информация, что захоронение осадка последующими слоями донного грунта приводит к замедлению разрушения пигментов [4; 5]. Отсутствие света, низкие температуры и недостаток кислорода являются основными факторами, способствующими сохранению пигментов в отложениях. Также на содержание пигментов в живых популяциях водорослей оказывают влияние факторы окружающей среды.

Пигментный состав взвешенного в воде вещества и донных отложений в водоемах – интегральный показатель, отражающий как современное состояние водоема, так и широкий спектр различных воздействий на водные экосистемы (эвтрофирование, ацидификация, климатические изменения, практика землепользования и т. д.) [2].

Растительные пигменты – природные индикаторы, которые мигрируют в составе органического вещества в экосистеме. По изменению содержания отдельных пигментов судят не только о сукцессиях альгоценозов и факторах их формирования, но и об эволюции экосистем разного типа [3; 6]. По содержанию седиментационных пигментов в толще грунтов можно восстановить картину долговременных изменений продуктивности фитопланктона в зависимости от антропогенных и климатических факторов [2].

Пигментные индексы для индикации состояния водных экосистем на сегодняшний день применяются достаточно редко, и в литературе содержится очень мало подобных сведений и методических рекомендаций, что усложняет возможность получить достоверные значения и провести их детальный анализ. Однако некоторые наработки позволяют использовать особенности спектра поглощения пигментов для оценки важных показателей развития сообществ продуцентов в водоемах. В частности, в коротковолновой области спектра поглощения установлено отличие синезеленых водорослей (цианобактерий) от других групп и на основе этого разработан способ оценки качества воды по пигментному индексу E_{450}/E_{480} [2]. Показано, что индекс дает неплохие результаты и показывает тесную и значимую связь со структурными характеристиками фитопланктона, в том числе при применении на водоемах и водотоках Беларуси [7; 8].

В рамках настоящего исследования было прослежено изменение физико-химических параметров, содержания хлорофилла *a* и продуктов его распада, а также других пигментных показателей в донных отложениях оз. Баторино.

Баторино – полимиктический водоем с очень высокой степенью водообмена, являющийся начальным звеном в цепи трех связанных между собой протоками Нарочанских озер. Площадь зеркала составляет 6,25 км², длина – 3,5 км, средняя ширина – 1,7 км, средняя глубина – 2,4 м, длина береговой линии – 15 км, объем воды – 18,7 млн м³, площадь водосбора – 92,5 км², время полного водообмена – 1 год, мелководье песчано-илистое. Озеро является водоприемником мелиоративных систем. Трофический статус водоема – эвтрофный [9].

Материалы и методы исследования

Сбор материала проводили в середине мая 2020 г. Для отбора колонок донных отложений использовали дночерпатель Uwitec Coret (Австрия). Всего в оз. Баторино было отобрано 38 проб на 4 станциях, расположенных по трансекте на глубинах от 1,0 до 4,5 м. Колонки донных отложений (около 30 см) разделяли с шагом 5 см на 5–6 горизонтов, что позволило исследовать характер изменения показателей донных отложений не только по глубинам отбора проб, но и в вертикальном распределении.

Для экстракции пигментов из навесок донных отложений применяли 90 % ацетон² [10; 11]. Собранные образцы грунта перемешивали до однородной массы, из которой отбирали навеску для анализа содержания хлорофилла *a* (суммарного, без поправки на присутствие в смеси других пигментов) и продуктов его разложения [12], а также каротиноидов [13]. Оставшуюся часть пробы использовали для определения плотности и влажности донных отложений. В зависимости от типа грунта исходная влажная масса исследованной навески колебалась от 3,0 до 4,5 г. Навеску грунта отмеряли на электронных весах SPU 202 (США), помещали в пробирки и заливали раствором ацетона, тщательно перемешивали и оставляли на несколько часов для экстракции в темном прохладном месте. Далее пробирки центрифугировали дважды по 15 мин при 5000 об/мин с использованием центрифуги Sigma 1-6 (Германия), полученный экстракт осторожно переносили в стеклянные пробирки, измерения на спектрофотометре Cary 50 (США) проводили в 2-сантиметровых кварцевых кюветах.

Для определения содержания хлорофилла *a* и феопигментов в общем экстракте применяли спектрофотометрический метод³ (приложение *ADL Shell*) [12]. Одновременно с определением концентрации

² Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* : ГОСТ 17.1.04.02.90. Введ. 01.01.1990. М., 2009.

³ Там же.

хлорофилла и его дериватов было рассчитано содержание каротиноидов по стандартной формуле [14]. Также в донных отложениях общепринятыми методами определяли плотность осадка естественной влажности (в граммах на кубический сантиметр) и относительную влажность – отношение удаляемой при сушке воды к единице массы осадка естественной влажности (в процентах) [15].

При обработке количественных данных использовали статистические методы с применением персонального компьютера и программных пакетов *Microsoft Excel* и *Statistica Trial 13*. В таблицах и по тексту приведены рассчитанные средние значения со стандартным отклонением ($\pm SD$). Для изучения взаимозависимости исследованных параметров проводили корреляционный анализ (r) по Пирсону, связь считали статистически значимой при $p \leq 0,05$ [16].

Результаты и их обсуждение

Изучение базовых физико-химических свойств донных отложений оз. Баторино показало, что на мелководных участках на исследованных станциях донные грунты представлены заиленным песком и илами.

Основные данные по содержанию растительных пигментов в донных отложениях и их распределение по глубинам отбора проб в оз. Баторино, а также анализ данных по относительной влажности и плотности седиментов приведены в табл. 1.

В образцах донных отложений оз. Баторино суммарное содержание хлорофилла a и продуктов его распада в среднем составило $12,7 \pm 10,2$ мкг/г сырой массы донных грунтов при колебаниях от 2,5 до 33,5 мкг/г, содержание каротиноидов – $10,24 \pm 4,89$ мкг/г сырой массы донных отложений при колебаниях от 0,56 до 23,07 мкг/г. Доля феопигментов в суммарном пуле была высокой во всех пробах, хотя на мелководных станциях не достигала 50 %. В целом данный показатель для донных отложений озера изменялся от 39 до практически 100 %, составив в среднем $72,4 \pm 19,6$ %.

Таблица 1

Физико-химические свойства донных отложений
оз. Баторино и содержание в них растительных пигментов

Table 1

The physicochemical properties of the bottom sediments
of Batorino Lake and the content of plant pigments in them

Глубина станции, м	Слой колонки, см	Плотность, г/см ³	Относительная влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла, мкг/г ($C_{\text{хл}}$)	Доля феопигментов в суммарном хлорофилле, %	Содержание каротиноидов, мкг/г ($C_{\text{к}}$)	$C_{\text{к}}/C_{\text{хл}}$
1,0	0–5	1,31	64,13	6,45	–	4,76	0,74
	0–5			6,98	42,6	4,93	0,71
	5–10	1,59	36,40	18,11	40,3	12,42	0,69
	5–10			18,34	38,5	12,06	0,66
2,0	0–5	1,15	95,45	26,57	49,4	17,09	0,64
	0–5			24,83	53,2	13,91	0,56
	5–10	1,16	94,59	30,39	47,0	23,07	0,76
	5–10			27,40	54,9	16,74	0,61
	10–15	1,12	95,07	28,80	48,8	15,81	0,55
	10–15			26,25	64,5	11,35	0,43
	15–20	1,19	94,03	33,53	47,8	16,63	0,50
	15–20			26,82	64,3	15,71	0,59
	20–25	1,13	93,85	21,72	68,9	11,65	0,54
	20–25			28,78	90,8	17,15	0,60
	25–30	1,23	93,07	21,53	77,7	17,79	0,83
	25–30			15,79	70,8	11,92	0,75

Окончание табл. 1
Ending table 1

Глубина станции, м	Слой колонки, см	Плотность, г/см ³	Относительная влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла, мкг/г (C _{хл})	Доля феопигментов в суммарном хлорофилле, %	Содержание каротиноидов, мкг/г (C _к)	C _к /C _{хл}
3,0	0–5	1,09	95,83	7,23	69,8	6,84	0,95
	0–5			4,72	≈100,0	5,13	1,09
	5–10	1,17	95,02	2,68	86,0	3,04	1,13
	5–10			4,45	66,9	6,21	1,39
	10–15	1,18	92,66	4,67	84,6	8,10	1,74
	10–15			4,49	93,2	7,39	1,64
	15–20	1,04	93,10	4,31	≈100,0	10,32	2,39
	15–20			3,28	96,4	7,56	2,31
	20–25	1,02	94,75	3,93	≈100,0	8,43	2,14
	20–25			3,45	95,9	7,27	2,11
4,5	0–5	1,01	94,61	9,23	69,9	8,41	0,91
	0–5			9,03	58,5	8,89	0,98
	5–10	1,20	93,43	10,09	55,0	14,03	1,39
	5–10			9,33	68,6	10,08	1,08
	10–15	1,09	91,93	3,75	67,7	5,56	1,48
	10–15			5,13	57,7	0,56	0,11
	15–20	1,01	89,83	11,93	77,9	12,28	1,03
	15–20			6,42	70,6	10,36	1,61
	20–30	1,03	82,50	3,30	87,2	7,65	2,32
	20–30			2,57	94,2	5,42	2,11
	30–40	1,18	76,07	2,93	97,8	6,93	2,36
	30–40			2,47	94,1	5,85	2,37

Относительная влажность донных отложений колебалась в широких пределах – от 36,4 до 95,8 %, значения плотности донных грунтов показали небольшой размах колебаний – от 1,01 до 1,59 г/см³. В среднем для исследованных станций озера эти параметры составили $87,7 \pm 14,8$ % и $1,15 \pm 0,14$ г/см³ соответственно.

Пигментный состав донных отложений дает интегральную характеристику состояния водных экосистем в период, предшествующий исследованию. Для оз. Баторино были рассчитаны пигментные индексы состояния первичных продуцентов (табл. 2 и 3) [7; 17; 18]. В табл. 2 приведены общие показатели для оз. Баторино, в табл. 3 – значения пигментных индексов для каждой станции отбора проб.

Таблица 2

**Вариабельность пигментных индексов состояния
первичных продуцентов в донных отложениях оз. Баторино**

Table 2

**The variability of pigment indices of the state
of primary producers in bottom sediments of Batorino Lake**

Показатели	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	E_{430}/E_{412}
Среднее значение	1,33	3,75	2,65	2,59	0,97
Медиана	1,32	3,35	2,17	2,13	0,96
Стандартное отклонение	0,12	1,14	1,31	1,28	0,06

Окончание табл. 2
Ending table 2

Показатели	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	E_{430}/E_{412}
25–75-й проценти	1,22–1,42	2,81–4,62	1,63–3,73	1,60–3,64	0,94–1,01
Минимум – максимум	1,17–1,55	2,32–6,32	1,09–5,56	1,06–5,40	0,86–1,10
Коэффициент вариации, %	9	30	49	49	6

Таблица 3

**Пигментные индексы состояния первичных продуцентов
в донных отложениях по станциям отбора проб**

Table 3

**The pigment indices of the state of primary producers
in bottom sediments by sampling stations**

Глубина станции, м	Слой колонки, см	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	E_{430}/E_{412}
1,0	0–5	1,43	3,26	1,90	1,88	1,02
	0–5	1,45	3,18	1,83	1,80	1,03
	5–10	1,41	2,80	1,62	1,60	1,04
	5–10	1,42	2,81	1,64	1,62	1,05
2,0	0–5	1,51	3,11	1,63	1,60	1,10
	0–5	1,46	2,65	1,42	1,40	1,04
	5–10	1,50	3,54	1,85	1,81	1,06
	5–10	1,55	3,14	1,55	1,52	1,05
	10–15	1,51	2,80	1,38	1,34	1,01
	10–15	1,50	2,32	1,09	1,06	0,92
	15–20	1,53	2,67	1,27	1,23	1,03
	15–20	1,40	2,58	1,42	1,38	0,90
	20–25	1,41	2,47	1,32	1,28	0,87
	20–25	1,37	2,62	1,48	1,44	0,87
	25–30	1,29	2,96	1,93	1,89	0,87
	25–30	1,30	2,80	1,78	1,73	0,86
3,0	0–5	1,36	3,53	2,25	2,19	0,94
	0–5	1,25	2,98	2,17	2,13	0,96
	5–10	1,41	4,15	2,55	2,47	0,96
	5–10	1,32	3,25	2,17	2,12	0,95
	10–15	1,22	4,90	3,94	3,85	0,95
	10–15	1,24	4,56	3,48	3,40	0,93
	15–20	1,17	5,59	4,81	4,72	0,95
	15–20	1,17	6,32	5,56	5,40	0,97
	20–25	1,22	5,36	4,34	4,25	0,90
	20–25	1,19	6,16	5,29	5,19	0,95

Окончание табл. 3
Ending table 3

Глубина станции, м	Слой колонки, см	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	E_{430}/E_{412}
4,5	0–5	1,33	3,02	1,96	1,92	0,95
	0–5	1,34	3,13	2,01	1,97	0,94
	5–10	1,24	3,51	2,65	2,59	1,01
	5–10	1,28	3,60	2,56	2,50	0,98
	10–15	1,26	4,73	3,67	3,57	1,00
	10–15	1,32	3,52	2,43	2,37	1,01
	15–20	1,33	3,45	2,28	2,22	0,92
	15–20	1,21	3,91	3,14	3,06	1,01
	20–30	1,18	4,58	3,97	3,92	0,96
	20–30	1,18	5,21	4,48	4,39	0,94
	30–40	1,18	5,66	4,91	4,80	0,96
	30–40	1,18	5,69	4,95	4,87	0,97

Для исследованных образцов донных отложений значение индекса E_{450}/E_{480} практически везде было больше 1,2 (1,17–1,55), что свидетельствует о доминировании пигментов зеленых и диатомовых водорослей. Средние и медианные значения индекса E_{450}/E_{480} оказались очень близкими (1,33 и 1,32 соответственно) в общей выборке. Коэффициент вариации данного индекса для оз. Баторино был небольшим (9 %).

В исследованных образцах донных отложений озера индекс E_{430}/E_{664} изменялся от 2,3 до 6,3, что характерно для нормально функционирующего фитопланктона. Коэффициент вариации был больше по сравнению с предыдущим индексом и составил около 30 %.

Индекс E_{480}/E_{664} отражает баланс хлорофилла и каротиноидов в сообществе планктонных продуцентов водной экосистемы. В неблагоприятных условиях соотношение меняется в пользу каротиноидов. В наших образцах отмечены невысокие значения индекса, а коэффициент вариации достигал 50 %. Значения индекса E_{430}/E_{664} на всех исследованных станциях были в 1,5–2,0 раза выше, чем значения индекса E_{480}/E_{664} . Полученные величины и соотношения пигментных индексов хорошо сопоставимы с данными, полученными нами в 2018 г. для литоральных станций оз. Баторино [19].

В табл. 3 величины индексов E_{480}/E_{664} и E_{480}/E_{665} практически идентичны, поэтому для дальнейших исследований целесообразно оставить только один из них.

Для контроля чистоты экстракта пигментов и правильности прописывания спектра светопоглощения были рассчитаны дополнительные индексы, представленные в табл. 4 и 5 [17; 18].

Таблица 4

Вариабельность индексов чистоты экстракта пигментов в донных отложениях оз. Баторино

Table 4

The variability of the indices of the purity of pigment extract in the bottom sediments of Batorino Lake

Показатели	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{412}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}	E_{412}/E_{664}
Среднее значение	22,29	73,23	75,54	8,76	7,82	2,36	3,89
Медиана	18,41	70,55	70,40	8,96	7,68	2,17	3,41
Стандартное отклонение	16,81	44,75	46,58	4,37	2,18	1,12	1,23
25–75-й проценти	6,81–35,80	35,54–104,87	37,15–106,70	5,48–10,78	5,85–9,77	1,23–3,41	2,95–4,81
Минимум – максимум	3,19–76,90	10,19–189,70	10,60–217,50	2,33–19,60	4,38–12,17	0,96–4,47	2,53–6,53
Коэффициент вариации, %	75	61	62	50	28	47	32

Таблица 5

Пигментные индексы контроля чистоты
экстракта донных отложений оз. Баторино

Table 5

The pigment indices for monitoring the purity
of the bottom sediment extract from Batorino Lake

Глубина станции, м	Слой колонки, см	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{412}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}	E_{412}/E_{664}
1,0	0–5	47,00	153,00	150,17	14,83	10,31	3,17	3,20
	0–5	38,56	122,56	119,11	12,22	10,03	3,15	3,09
	5–10	40,20	112,53	107,80	12,00	9,38	3,35	2,68
	5–10	44,54	125,31	119,77	12,46	10,06	3,57	2,69
2,0	0–5	37,61	117,00	106,11	9,61	12,17	3,91	2,82
	0–5	35,10	93,00	89,00	8,75	10,63	4,01	2,54
	5–10	21,53	76,30	71,81	6,77	11,28	3,18	3,33
	5–10	30,81	96,77	91,73	8,58	11,28	3,59	2,98
	10–15	15,85	44,32	43,77	5,08	8,72	3,12	2,76
	10–15	46,11	107,16	116,47	10,32	10,39	4,47	2,53
	15–20	37,92	101,08	98,27	9,19	11,00	4,13	2,59
	15–20	35,20	90,88	100,72	9,72	9,35	3,62	2,86
	20–25	76,90	189,70	217,50	19,60	9,68	3,92	2,83
	20–25	37,85	99,12	113,69	10,35	9,58	3,66	3,00
	25–30	28,16	83,40	95,64	9,92	8,41	2,84	3,40
	25–30	26,16	73,16	85,12	9,16	7,99	2,86	3,25
3,0	0–5	15,29	53,94	57,18	6,94	7,77	2,20	3,74
	0–5	3,42	10,19	10,60	2,33	4,38	1,47	3,10
	5–10	10,40	43,20	45,20	6,33	6,82	1,64	4,35
	5–10	4,32	14,05	14,77	2,80	5,02	1,54	3,42
	10–15	12,76	62,59	66,00	9,88	6,33	1,29	5,17
	10–15	8,15	37,19	40,19	6,62	5,62	1,23	4,93
	15–20*	6,93	38,71	40,79	7,11	5,45	0,97	5,89
	15–20*	10,38	65,62	67,85	10,77	6,09	0,96	6,53
	20–25	13,36	71,64	79,27	10,82	6,62	1,24	5,93
	20–25	21,60	133,00	140,40	19,00	7,00	1,14	6,50
4,5	0–5	6,15	18,58	19,63	3,17	5,87	1,94	3,19
	0–5	9,43	29,52	31,43	4,43	6,67	2,13	3,33
	5–10	4,54	15,91	15,78	3,12	5,10	1,46	3,48
	5–10	28,89	104,11	106,33	12,78	8,15	2,26	3,68
	10–15	30,00	142,00	141,40	18,20	7,80	1,65	4,71
	10–15	19,73	69,45	69,00	9,27	7,49	2,13	3,50
	15–20	17,08	58,88	64,25	7,75	7,60	2,20	3,76
	15–20	3,73	14,57	14,38	3,19	4,57	1,17	3,86
	20–30	3,19	14,62	15,23	2,77	5,28	1,15	4,77
	20–30	6,27	32,67	34,60	5,53	5,90	1,13	5,52
	30–40	6,45	36,50	38,00	6,30	5,79	1,02	5,89
	30–40	5,36	30,50	31,55	5,32	5,74	1,01	5,88

*Малоприменяемые для дальнейшего анализа и расчета пигментных индексов образцы.

Для индексов контроля чистоты экстракта отмечается более высокий коэффициент вариации, достигающий 75 % (E_{664}/E_{720}). Согласно полученным данным индекс E_{530}/E_{720} в среднем составил 8,8 при колебаниях в диапазоне 2–20.

Значения индексов E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} должны быть больше единицы и меньше величин индексов E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} соответственно. Проанализировав спектры донных отложений, можно сделать следующее заключение: максимальное светопоглощение отмечено на длине волны 412 нм, на что указывает и индекс E_{412}/E_{720} , значения которого несколько больше в сравнении с индексом E_{430}/E_{720} . Это подтверждает данные о высоком содержании в донных отложениях феопигментов, имеющих в сравнении с хлорофиллом максимум поглощения, сдвинутый в более коротковолновую область синей части спектра.

Анализ приведенных в табл. 4 и 5 индексов доказывает достоверность нижних пороговых значений, позволяющих отбраковывать плохо прописанные спектры по критериям контроля чистоты экстракта. Так, для донных отложений предложены следующие нижние пороговые пределы пригодности пробы для анализа: индекс $E_{664}/E_{720} - 2$; E_{430}/E_{720} и $E_{412}/E_{720} - 5$; $E_{530}/E_{720} - 1$; $E_{430}/E_{530} - 3$; $E_{664}/E_{530} - 1,2$; $E_{412}/E_{664} - 2$ [7; 8; 17; 18]. Верхний порог не должен превышать 100 (что бывает характерно для экстрактов проб, полученных из планктона). В донных отложениях верхняя граница возрастает, что прослеживается по данным, приведенным в табл. 5.

После детального анализа спектров поглощения экстрактов пигментов донных отложений оз. Баторино некоторые образцы (отмечены звездочкой в табл. 5) оказались малопригодными для дальнейшего анализа и расчета пигментных индексов (например, там, где значение индекса E_{664}/E_{530} оказалось меньше единицы).

Таким образом, в результате проведенной работы были проанализированы спектры поглощения в диапазоне длин волн 350–800 нм для колонок донных отложений оз. Баторино, отобранных на глубинах 1,0–4,5 м.

В целях выявления связи между рассчитанными индексами и глубиной залегания слоя в колонках донных отложений был проведен корреляционный анализ. Связь между индексами состояния первичных продуцентов E_{450}/E_{480} и E_{430}/E_{412} и глубиной залегания слоя донных отложений не прослеживалась. Связь отмечена между индексами E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} и глубиной сбора проб, что указывает на синхронность изменения пигментного состава производных хлорофилла по глубинам. Согласно полученным данным (см. табл. 3) до глубины 2 м (и горизонта 10–15 см в колонках) в донных осадках прослеживается четкая тенденция к более низким значениям вышеуказанных индексов, далее с увеличением глубины слоя наблюдается рост их значений.

Отношение общих каротиноидов к хлорофиллу a (C_k/C_{chl}) может служить показателем физиологического состояния клеток фитопланктона [20]. Каротиноиды – более стабильный компонент пигментной системы, чем хлорофилл, поэтому при старении популяции фитопланктона и неблагоприятных воздействиях факторов среды, которые способствуют деструкции хлорофилла, величина отношения C_k/C_{chl} возрастает. Содержание каротиноидов и их отношение к хлорофиллу также могут быть следствием изменения фитопланктона или его адаптации к качественному составу света. При разных условиях отношение C_k/C_{chl} колеблется в широких пределах. Однако среднее его значение для отдельных видов водорослей пресноводного фитопланктона варьирует слабо (0,28–0,40) [20]. Согласно нашим данным, полученным при обработке донных отложений оз. Баторино, отношение C_k/C_{chl} изменялось в пределах 0,11–2,39 при среднем значении $1,18 \pm 0,67$ (см. табл. 1). Высокие величины C_k/C_{chl} (больше единицы) объясняются тем, что в бескислородных условиях с увеличением глубины залегания слоя донных отложений каротиноиды разрушаются медленнее, чем хлорофилл и его производные [21].

В качестве показателя пигментного разнообразия планктонного сообщества был рассчитан индекс E_{430}/E_{664} (см. табл. 2 и 3), который, в отличие от C_k/C_{chl} , отражает количественное соотношение между суммой общих каротиноидов и хлорофилла a и собственно хлорофиллом a . Для нормально функционирующего фитопланктона этот индекс равен 1,25–4,00 [20]. По нашим наблюдениям, характер изменения данного пигментного индекса в донных отложениях оз. Баторино хорошо коррелировал с динамикой отношения C_k/C_{chl} (рис. 1). Значения E_{430}/E_{664} варьировали в границах 2–6 (см. табл. 2 и 3). Наибольшие величины пигментного индекса объясняются присутствием значительного количества растительного детрита, так как пик оптической плотности экстрактов из детритных пигментов слабее выражен на длине волны 664 нм. Обратную связь между индексом E_{430}/E_{664} и количеством хлорофилла a на разных глубинах донных отложений также удалось установить (рис. 2). Коэффициент корреляции r , равный $-0,7$ ($n = 38$), подтверждает сильную отрицательную связь.

Таким образом, изучение пигментных индексов и отношения C_k/C_{chl} вносит полезный вклад в разработку оптимальных показателей экспресс-оценки эффективности функционирования фитопланктона и оценки его видового состава в экосистеме водоема.

Рис. 1. Соотношение между концентрациями общих каротиноидов и хлорофилла a (C_k/C_{chl}) и пигментный индекс E_{430}/E_{664} для донных отложений оз. Баторино на разных глубинах

Fig. 1. The ratio between the concentrations of total carotenoids and chlorophyll a (C_k/C_{chl}) and the pigment index E_{430}/E_{664} for bottom sediments of Batorino Lake at different depths

Рис. 2. Соотношение между пигментным индексом E_{430}/E_{664} и содержанием хлорофилла a для донных отложений оз. Баторино

Fig. 2. The ratio between the pigment index E_{430}/E_{664} and the chlorophyll a content for bottom sediments of Batorino Lake

Рис. 3. Связь индекса E_{430}/E_{412} с долей феопигментов в донных отложениях оз. Баторино

Fig. 3. The relationship between the E_{430}/E_{412} index and the proportion of pheopigments in the bottom sediments of Batorino Lake

Значения индекса E_{430}/E_{412} , полученные для донных отложений оз. Баторино, колебались от 0,82 до 1,10, свидетельствуя, что в большей части проб хлорофилл находился в основном в деградированном состоянии (см. табл. 2 и 3). На рис. 3 показана связь между значением индекса E_{430}/E_{412} и долей феопигментов. Коэффициент корреляции r равен $-0,56$ ($n = 38$).

Примечательно, что, как и ранее показано в наших работах [7; 17; 18], медианная доля феопигментов в пробе соответствует значению индекса, равному 1, что можно использовать для экспресс-анализа степени деградации хлорофилла в пробе (если $E_{430}/E_{412} < 1$, то доля феопигментов составляет менее 50 %).

Заключение

В исследованных пробах донных отложений оз. Баторино суммарное содержание хлорофилла *a* и продуктов его распада за период исследования в среднем составило $12,7 \pm 10,2$ мкг/г сырой массы донных грунтов, содержание каротиноидов – $10,24 \pm 4,89$ мкг/г сырой массы донных отложений. Доля феопигментов в суммарном пуле была высокой во всех пробах, хотя на мелководных станциях не достигала 50 %, составив в среднем для донных отложений озера $72,4 \pm 19,6$ %. Относительная влажность и значения плотности донных грунтов в среднем составили $87,7 \pm 14,8$ % и $1,15 \pm 0,14$ г/см³ соответственно. Отношение $C_k/C_{хл}$ изменялось в пределах 0,11–2,39 при среднем значении $1,18 \pm 0,67$.

Таким образом, была проведена работа по расчету пигментных индексов для донных отложений оз. Баторино и оценке их значимости. Анализ пигментных индексов, отражающих физиологическое состояние фитопланктона, показал, что более информативными для работы с донными отложениями являются следующие индексы: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} . Предложены дополнительные индексы контроля чистоты экстракта, которые могут быть использованы в качестве критериев качества исследуемых проб и их пригодности для детального анализа спектров поглощения.

Библиографические ссылки

1. Cyr H. How does the vertical distribution of chlorophyll vary in littoral sediments of small lakes? *Freshwater Biology*. 1998; 40(1):25–40. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1998.00319.x.
2. Сигарева ЛЕ. *Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов*. Москва: КМК; 2012. 224 с.
3. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary pigments. In: Smol JP, Birks HJB, Last WM, Bradley RS, Alverson K, editors. *Tracking environmental change using lake sediments. Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Dordrecht: Springer; 2002. p. 295–325. (Developments in paleoenvironmental research; volume 3). DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
4. Buchaca T, Catalan J. Factors influencing the variability of pigments in the surface sediments of mountain lakes. *Freshwater Biology*. 2007;52(7):1365–1379. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01774.x.
5. Villanueva J, Hastings DW. A century-scale record of the preservation of chlorophyll and its transformation products in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000;64(13):2281–2294. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00428-7.
6. Paerl HW, Valdes LM, Pinckney JL, Piehler MF, Dyble J, Moisaner PH. Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication. *BioScience*. 2003;53(10):953–964. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0953:PPAIOE]2.0.CO;2.

7. Смольская ОС, Жукова АА, Адамович БВ. Спектральные характеристики автотрофной компоненты взвешенного вещества в озерах Национального парка «Нарочанский». *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2019;63(3):325–330.
8. Михеева ТМ, Смольская ОС, Савич ИВ, Жукова АА. Связь спектральных характеристик пигментного состава и структурных показателей фитопланктона р. Свислочь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;4:42–51.
9. Аронов АГ, Аронова ТИ, Власов БП, Ежова ОС, Жукова ТВ, Ковалевская РЗ и др. *Водные ресурсы Национального парка «Нарочанский»*. Люштык ВС, Жукова ТВ, редакторы. Минск: Рифтур Принт; 2012. 128 с.
10. Ritchie RJ. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *d* and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 2008;46(1):115–126. DOI: 10.1007/s11099-008-0019-7.
11. Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2014;4(9):63–69.
12. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*. 1967;12(2):343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
13. Strickland JDH, Parsons TR. *A practical handbook of seawater analysis*. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada; 1972. 310 p.
14. Винберг ГГ. *Первичная продукция водоемов*. Минск: Издательство АН БССР; 1960. 330 с.
15. Жукова АА. Продукционно-деструкционные показатели микрофитобентоса оз. Нарочь. В: Рухленко ИА, редактор. *Татищевские чтения: актуальные проблемы экологии и окружающей среды. Материалы 7-й Международной научно-практической конференции; 15–18 апреля 2010 г.; Тольятти, Россия*. Тольятти: Волжский университет им. В. Н. Татищева; 2010. с. 50–57.
16. Мастицкий СЭ. *Методическое пособие по использованию программы Statistica при обработке данных биологических исследований*. Минск: Институт рыбного хозяйства; 2009. 76 с.
17. Смольская ОС, Жукова АА. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;1:113–123.
18. Смольская ОС, Жукова АА, Люля АС. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мястро. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018;2:65–77.
19. Смольская ОС, Жукова АА. Содержание растительных пигментов в донных отложениях озер Нарочь, Мястро и Баторино. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:18–25.
20. Бульон ВВ. *Первичная продукция планктона внутренних водоемов*. Ленинград: Наука; 1983. 150 с.
21. Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwater Biology*. 1985;15(1):53–75. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1985.tb00696.x.

References

1. Cyr H. How does the vertical distribution of chlorophyll vary in littoral sediments of small lakes? *Freshwater Biology*. 1998;40(1):25–40. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1998.00319.x.
2. Sigareva LE. *Khlorofill v donnykh otlozheniyakh volzhskikh vodoyemov* [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga reservoirs]. Moscow: KMK; 2012. 224 p. Russian.
3. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary pigments. In: Smol JP, Birks HJB, Last WM, Bradley RS, Alverson K, editors. *Tracking environmental change using lake sediments. Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Dordrecht: Springer; 2002. p. 295–325. (Developments in paleoenvironmental research; volume 3). DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
4. Buchaca T, Catalan J. Factors influencing the variability of pigments in the surface sediments of mountain lakes. *Freshwater Biology*. 2007;52(7):1365–1379. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01774.x.
5. Villanueva J, Hastings DW. A century-scale record of the preservation of chlorophyll and its transformation products in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000;64(13):2281–2294. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00428-7.
6. Paerl HW, Valdes LM, Pinckney JL, Piehler MF, Dyble J, Moisaner PH. Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication. *BioScience*. 2003;53(10):953–964. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0953:PPAIOE]2.0.CO;2.
7. Smolskaya OS, Zhukova AA, Adamovich BV. [Spectral characteristics of the autotrophic component of suspended matter in the lakes of the National Park «Narochansky»]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi*. 2019;63(3):325–330. Russian.
8. Mikheeva TM, Smolskaya VS, Savich IV, Zhukava HA. Coupling of spectral characteristics of pigmental composition and structural indicators of phytoplankton in Svisloch River. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2018;4:42–51. Russian.
9. Aronov AG, Aronova TI, Vlasov BP, Ezhova OS, Zhukova TV, Kovalevskaya RZ, et al. *Vodnye resursy Natsional'nogo parka «Narochanskii»* [Water resources of the National Park «Narochansky»]. Минск: Rifting Print; 2012. 128 p. Russian.
10. Ritchie RJ. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *d* and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 2008;46(1):115–126. DOI: 10.1007/s11099-008-0019-7.
11. Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2014;4(9):63–69.
12. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*. 1967;12(2):343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
13. Strickland JDH, Parsons TR. *A practical handbook of seawater analysis*. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada; 1972. 310 p.
14. Vinberg GG. *Pervichnaya produktsiya vodoemov* [Primary production of reservoirs]. Минск: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1960. 330 p. Russian.
15. Zhukova AA. [Production and destruction indicators of microphytobenthos of Naroch Lake]. In: Rukhlenko IA, editor. *Tatishchevskie chteniya: aktual'nye problemy ekologii i okruzhayushchei sredy. Materialy 7-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 15–18 aprelya 2010 g.; Tol'yatti, Rossiya* [Tatishchev readings: actual problems of ecology and the environment. Materials of the 7th International scientific and practical conference; 2010 April 15–18; Togliatti, Russia]. Togliatti: Volzhsky University named after Tatishchev; 2010. p. 50–57. Russian.

16. Mastitskii SE. *Metodicheskoe posobie po ispol'zovaniyu programmy Statistica pri obrabotke dannykh biologicheskikh issledovaniy* [Methodological manual on the use of the *Statistica* program in the processing of biological research data]. Minsk: Institut rybnogo khozyaistva; 2009. 76 p. Russian.
17. Smolskaya OS, Zhukava HA. Spectral pigment indices of phytoplankton in different water objects of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2018;1:113–123. Russian.
18. Smolskaya OS, Zhukava HA, Lyulya AS. Analysis of pigment, physical and chemical characteristics of bottom sediments in lakes Naroch and Myastro. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2018;2:65–77. Russian.
19. Smolskaya VS, Zhukava HA. The contents of plant pigments in bottom sediments of lakes Naroch, Myastro and Batorino. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:18–25. Russian.
20. Bul'on VV. *Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoemov* [Primary production of plankton of inland water bodies]. Leningrad: Nauka; 1983. 150 p. Russian.
21. Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwater Biology*. 1985;15(1):53–75. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1985.tb00696.x.

Получена 04.04.2021 / принята 12.05.2021.
Received 04.04.2021 / accepted 12.05.2021.