

Оригинальная статья

УДК 574.586.583

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-210-221>

ПИГМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬГОЦЕНОЗОВ МАЛЫХ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Е. В. Станиславская ✉, А. Л. Афанасьева

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,

Институт озерадения РАН

Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

Поступила в редакцию 30.03.2024 г., после доработки 30.10.2024 г., принята 12.11.2024 г., опубликована 24.07.2025 г.

Аннотация. Приведены данные по пространственной динамике содержания хлорофиллов *a*, *b* и *c*, каротиноидов и пигментных индексов фитопланктона и перифитона малых рек северо-западного побережья Ладожского озера. Содержание хлорофилла *a* в фитопланктоне рек изменялось от 1.8 до 49.8 мг/м³, в перифитоне – от 8.5 до 262 мкг/г субстр., что соответствует мезотрофному, слабо эвтрофному, а на отдельных участках рек эвтрофному статусу. Концентрация хлорофилла *a* в фитопланктоне рек Авлога и Вьюн снижалась к устью, в р. Морье она увеличивалась вниз по течению, в р. Сосновке распределялась достаточно равномерно. Содержание хлорофилла *a* в обрастаниях рек Авлога и Сосновка возрастало вниз по течению, в реках Морье и Вьюн снижалось. В сумме хлорофиллов в обоих альгоценозах преобладал хлорофилл *a* (56 – 96%). Соотношения дополнительных пигментов (хлорофиллы *b* и *c*) указывали на доминирование зеленых, диатомовых и эвгленовых водорослей в исследованных сообществах. Сопоставление пигментов, каротиноидов, их соотношений и анализ пигментных индексов выявили благоприятные условия для функциональной активности обоих сообществ, что позволило отнести исследованные реки к разряду слабо загрязненных. Для фитопланктона выявлена достоверная связь пигментных характеристик со структурными показателями.

Ключевые слова: малые реки, фитопланктон, перифитон, хлорофиллы *a*, *b* и *c*, каротиноиды, пигментные индексы, трофический статус

Соблюдение этических норм. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Станиславская Е. В., Афанасьева А. Л. Пигментные характеристики альгоценозов малых рек северо-западного побережья Ладожского озера // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 210 – 221. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-210-221>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория гидробиологии Института озерадения РАН (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН).

ORCID и e-mail адреса: Станиславская Елена Владимировна: <https://orcid.org/0000-0002-2897-7636>, stanlen@mail.ru; Афанасьева Анна Леонидовна: <https://orcid.org/0000-0001-7282-1383>, afal359@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Являясь основой любой гидрографической сети, малые реки играют важную роль в формировании экологического состояния более крупных водных систем, оставаясь наименее изученными. Они, как правило, являются наиболее чувствительными к любым проявлениям различного рода хозяйственной деятельности на водосборах (Komulainen, 2004; Krylova et al., 2021). Под влиянием антропогенных нагрузок происходят значительные перестройки всех режимов рек, что приводит к изменению качества их вод. Важной составной частью автотрофного звена экосистем малых рек являются водоросли планктона и перифитона. Их структура и функционирование определяют, как трофический статус водотоков, так и их экологическое состояние (Trifonova, 1990; Mosisch et al., 1999; Belyaeva, 2005; Meteleva, 2017; Belyaeva, Aristova, 2020). Исследования показали, что наиболее важными функциональными параметрами, определяющими физиологическое состояние и активность водорослей, являются фотосинтетические пигменты и их различные соотношения (Mineeva, 2004; Sigareva, Lyashenko, 2004; Cano et al., 2008; Chai et al., 2016; Stanislavskaya, 2016; Belyaeva, 2017; Yavorskaya, 2017; Gorokhova, 2018).

Целью работы было изучение динамики содержания фотосинтетических пигментов фитопланктона и перифитона, определение трофического статуса малых рек, а также анализ связи пигментных характеристик альгоценозов с их основными структурными показателями.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Фитопланктон и перифитон четырех малых рек северо-западного побережья Ладожского озера изучали в июле 2019 – 2021 гг. Исследования проводили на 3-4 станциях рек Авлога, Морье, Вьюн и Сосновка (рис. 1). Реки Авлога и Морье непосредственно впадают в Ладожское озеро, р. Сосновка – в оз. Суходольское, р. Вьюн – в р. Бурную, имеющую сток в Ладожское озеро (см. рис. 1). Водосборные бассейны исследованных рек относятся к Балтийскому бассейновому округу и находятся в юго-восточной части Карельского перешейка. Реки значительно различаются как по морфологическим, так и по гидрологическим характеристикам (табл. 1). Для водосборов рек характерна достаточно высокая освоенность и значительная заболоченность. Основными источниками антропогенного воздействия на водосборах являются торфоразработки, полигоны твердых бытовых отходов, сельскохозяйственные фермы, посёлки и большое количество садоводств. Р. Вьюн испытывает максимальную антропогенную нагрузку в нижнем течении, реки Морье, Авлога и Сосновка – в верхнем и среднем течении.

Все исследованные реки имеют относительно низкую минерализацию воды ($\Sigma_{\text{ион}}$): 34 – 130 мг/л. Минимальная минерализация характерна для рек Вьюн и Морье, максимальная – для р. Авлога. Максимальная цветность (220 град. по платино-кобальтовой шкале) зафиксирована в среднем и нижнем течении р. Морье, где водосбор сильно заболочен. Цветность воды других рек изменялась от 20 до 60 град. Значения водородного показателя варьировали от 6.5 до 7.7, определяя нейтральную реакцию среды. Наибольшие величины pH отмечались в реках Сосновка и Авлога, минимальные – в р. Морье. По содержанию основных биогенных

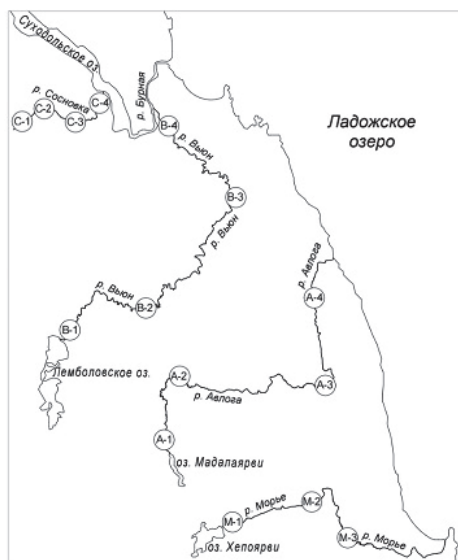


Рис. 1. Карта-схема района исследований и расположение станций отбора проб (по: <https://yandex.ru/maps/>)

Fig. 1. A schematic map of the study area and sampling stations (from: <https://yandex.ru/maps/>)

Содержание хлорофиллов и каротиноидов определяли стандартным спектрофотометрическим методом в смешанном 90% ацетоновом экстракте и рассчитывали по формулам Джеффри и Хамфри и Парсонса и Стрикленда (Parsons, Strickland, 1963; Jeffrey, Humphrey, 1975).

Таблица 1. Гидрологические и морфологические характеристики исследованных рек
Table 1. Hydrological and morphological characteristics of the studied rivers

Река / River	S водосбора, км ² / Catchment area, km ²	Длина, км / Length, km	Ширина, м / Width, m	Глубина, м / Deep, m	Скорость течения, м/с Current speed, m/s
Авлога / Avloga	375	54	4–10	0.4–0.6	0.01–0.07
Море / Mor'ye	478	43	10–16	1.2–2.3	0.03–0.05
Вьюн / V'yun	544	44	10–15	0.7–1.5	0.3–3.0
Сосновка / Sosnovka	130	15	2.5–6.0	0.7–2.0	0.4–0.6

Всего было отобрано по 15 проб фитопланктона и 15 проб перифитона и столько же на содержание фотосинтетических пигментов.

При использовании описательной статистики применяли среднюю арифметическую, стандартное отклонение и размах варьирования (*min* – *max*). Связь между пигментными и структурными характеристиками рек оценивали методом корреляционного анализа (корреляционный анализ, коэффициент корреляции Пирсона, *r*). Статистические различия признавали значимыми при $p < 0.05$. Статистическая

элементов реки имеют мезотрофный, слабо эвтрофный и эвтрофный трофический статус.

Реки отличались слабым развитием высшей водной растительности, что связано с морфологическим строением берегов (крутые склоны), высокими скоростями течения на отдельных участках рек и затенением их русел деревьями и кустарниками.

Количественные пробы фитопланктона отбирали с поверхности, фиксировали раствором Люголя, концентрировали осадочным способом и просчитывали в камере Нажотта объёмом 0.05 мл (Trifonova, 1990). Пробы перифитона собирали с высших водных растений: хвоща (*Equisetum fluviatile* L.), ежеголовника (*Sparganium emersum* Rehm.) и стрелолиста (*Sagittaria sagittifolia* L.), преобладающих в реках. Сбор и обработка образцов осуществлялась по методике, применяемой в Институте озерадения РАН (Stanislavskaya, Trifonova, 1984).

обработка выполнена в пакетах программ Excel 10.0 (Microsoft Corp., USA) и Statistica 6.1 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание фотосинтетических пигментов в обоих альгоценозах исследованных рек изменялось в широких пределах (табл. 2, 3). Пигментный состав, как фитопланктона, так и перифитона, был сходен, в нём преобладал хлорофилл *a*, что характерно для большинства водоёмов и водотоков умеренной зоны (Trifonova, 1990; Cano et al., 2008; Lindström et al., 2004; Gorokhova, Zinchenko, 2018; Mineeva, Metelyeva, 2019; Yavorskaya, Klimin, 2019).

Таблица 2. Содержание пигментов в фитопланктоне рек в июле 2019 – 2021 гг., мг/м³

Table 2. Pigment content in river phytoplankton in July 2019–2021, mg/m³

Станции / Stations	Хл <i>a</i> / Chl <i>a</i>	Хл <i>b</i> / Chl <i>b</i>	Хл <i>c</i> / Chl <i>c</i>	Каротиноиды / Carotenoids	К/Хл <i>a</i> / Car/Chl <i>a</i>
A-1	43.2±4.0	1.2±0.3	0.1±0.2	40.3±3.2	0.93
A-2	5.5±2.5	0.1±0.02	0.5±0.15	3.1±1.1	0.56
A-3	2.7±1.5	0.3±0.01	0.6±0.1	2.0±0.05	0.74
A-4	2.1±2.3	0.2±0.03	4.1±0.03	1.5±0.3	0.4
M-1	5.3±1.2	0.2±0.01	0.9±0.04	3.7±1.7	0.69
M-2	2.1±0.5	0.2±0.1	0.1±0.02	0.9±0.3	0.4
M-3	10.3±2.2	1.7±0.5	1.8±0.6	4.7±1.2	0.45
B-1	49.8±3.8	0.2±0.05	2.8±0.6	31.3±4.6	0.62
B-2	6.4±2.1	1.5±0.3	0.8±0.2	7.6±3.2	1.2
B-3	6.3±1.6	0.8±0.2	0.9±0.3	5.0±0.22	0.79
B-4	6.9±2.6	1.2±0.15	1.5±0.5	3.4±1.1	0.49
C-1	1.8±0.6	0.7±0.2	0.9±0.4	1.9±0.4	1.1
C-2	3.2±1.8	1.0±0.31	0.1±0.03	7.7±2.3	2.4
C-3	2.9±0.6	0.2±0.02	1±0.01	2.5±1.3	0.86
C-4	2.7±1.2	0.8±0.02	1.8±0.01	2.3±0.3	0.82

Примечание. А-1 – А-4 – станции на р. Авлоге, М-1 – М-3 – станции на р. Морье, В-1 – В-4 – станции на р. Вьюн, С-1 – С-4 – станции на р. Сосновке.

Note: А-1–А-4 – stations on r. Avloga, М-1–М-3 – stations on r. Mor'ye, В-1–В-4 – stations on r. V'yun, С-1–С-4 – stations on r. Sosnovka.

В фитопланктоне рек концентрация хлорофилла *a* варьировала от 1.8 до 49.8 мг/м³ и составляла 56 – 90% суммы хлорофиллов (см. табл. 2). Максимальной она была на станциях в истоках рек Авлога (ст. А-1) и Вьюн (В-1), вытекающих из эвтрофных озёр. Минимальные величины отмечались в р. Сосновке, что связано с высокой мутностью и большой скоростью течения в ней. Содержание хлорофилла *a* по станциям в реках различалось. В реках Авлога и Вьюн оно значительно снижалось к устью, в р. Морье увеличивалось вниз по течению. В р. Сосновке содержание хлорофилла *a* было минимальным в истоке и равномерно распределялось вниз по течению (см. табл. 2).

Известно, что различные отделы водорослей различаются по составу фотосинтетических пигментов. Для зелёных и эвгленовых водорослей наряду с хлорофиллом *a* характерно наличие хлорофилла *b*. Динофитовые, золотистые, диатомо-

вые и желтозелёные водоросли в дополнение к основному пигменту содержат хлорофилл *c* (Britton, 1986; Mineeva, 2004; Sidelev, Babanazarova, 2008; Meteleva, 2017). В фитопланктоне рек дополнительные зелёные пигменты (хлорофиллы *b* и *c*), составляли 0.2 – 32% и 3.0 – 35% суммы хлорофиллов соответственно. Максимальные концентрации хлорофилла *b* были отмечены в нижнем течении р. Морьи (ст. М-3) при значительном развитии рафидофитовой водоросли *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing (рис. 2, см. табл. 2). Наибольшее содержание хлорофилла *c* отмечалось на станциях рек Авлога (А-4) и Вьюн (В-1), где в планктоне основную роль играли диатомовые водоросли (см. рис. 2). Изменение содержания каротиноидов по станциям соответствует динамике хлорофилла *a*. Наибольшие концентрации каротиноидов отмечались на тех же станциях в истоках рек Авлога и Вьюн, где содержание хлорофилла *a* было максимальным (см. табл. 2). Минимальное содержание жёлтых пигментов обнаружено во всех реках на тех станциях, где концентрации хлорофилла *a* были низкими.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции фотосинтетических пигментов и пигментных индексов со структурными характеристиками фитопланктона рек

Table 3. Correlation coefficients of the photosynthetic pigments and pigment indices with the structural characteristics of river phytoplankton

Показатель / Parametr	$B_{\text{диат.}} / B_{\text{Bacillar.}}$	$B_{\text{зелён.}} / B_{\text{Chloroph.}}$	$B_{\text{цианоб.}} / B_{\text{Cyanobac.}}$	$B_{\text{эвгл.}} / B_{\text{Euglenoph.}}$	$B_{\text{крипт.}} / B_{\text{Cryptoph.}}$	$B_{\text{диноф.}} / B_{\text{Dinoph.}}$	$B_{\text{золот.}} / B_{\text{Chrysoph.}}$	$B_{\text{общ.}} / B_{\text{Total}}$
Хлорофилл <i>a</i> / Chlorophyll <i>a</i>	0.60	0.89	0.87	0.76	0.63	0.82	0.17	0.81
Хлорофилл <i>b</i> / Chlorophyll <i>b</i>	-0.19	-0.32	-0.16	-0.20	-0.19	-0.15	-0.03	-0.22
Хлорофилл <i>c</i> / Chlorophyll <i>c</i>	-0.12	0.17	0.34	0.04	-0.07	0.11	-0.02	0.03
Хлорофилл общ. / Chlorophyll total	0.51	0.81	0.83	0.68	0.55	0.75	0.15	0.72
Хлорофилл <i>a</i> , % / Chlorophyll <i>a</i> , %	0.48	0.64	0.44	0.65	0.49	0.46	0.21	0.56
Хлорофилл <i>b</i> , % / Chlorophyll <i>b</i> , %	-0.40	-0.61	-0.42	-0.56*	-0.40	-0.42	-0.24	-0.50
Хлорофилл <i>c</i> , % / Chlorophyll <i>c</i> , %	-0.48	-0.58	-0.38	-0.61	-0.46	-0.41	-0.15	-0.54
Каротиноиды (К) / Carotenoids (Car)	0.66	0.80	0.79	0.74	0.69	0.84	-0.21	0.82
К/Хл <i>a</i> / Car/Chl <i>a</i>	-0.16	-0.27	-0.20	-0.26	-0.16	-0.15	-0.16	-0.22
ПИ E ₄₃₀ /E ₆₆₅ / PI E ₄₃₀ /E ₆₆₅	-0.22	-0.29	-0.16	-0.20	-0.23	-0.21	-0.28	-0.25
ПИ E ₄₈₀ /E ₆₆₄ / PI E ₄₈₀ /E ₆₆₄	-0.17	-0.27	-0.22	-0.27	-0.16	-0.16	-0.07	-0.23

Примечание. $B_{\text{диат.}}$ – биомасса диатомовых водорослей, $B_{\text{зелён.}}$ – биомасса зеленых водорослей, $B_{\text{цианоб.}}$ – биомасса цианобактерий, $B_{\text{эвгл.}}$ – биомасса эвгленовых водорослей, $B_{\text{крипт.}}$ – биомасса криптофитовых водорослей, $B_{\text{динофит.}}$ – биомасса динофитовых водорослей, $B_{\text{золот.}}$ – биомасса золотистых водорослей, $B_{\text{общ.}}$ – общая биомасса фитопланктона, ПИ – пигментный индекс. Жирным шрифтом отмечены значимые корреляции ($p < 0.05$) ($n = 15$).

Note. $B_{\text{Bacillar.}}$ is the biomass of Bacillariophyta, $B_{\text{Chloroph.}}$ the biomass of Chlorophyta, $B_{\text{Cyanobac.}}$ the biomass of Cyanobacteria, $B_{\text{Euglenoph.}}$ the biomass of Euglenophyta, $B_{\text{Cryptoph.}}$ the biomass of Cryptophyta, $B_{\text{Dinoph.}}$ the biomass of Dinophyta, $B_{\text{Chrysoph.}}$ the biomass of Chrysophyta, B_{Total} is the total biomass, PI – Pigment Index. Significant correlations ($p < 0.05$) are indicated in bold ($n = 15$).

Соотношение между содержанием хлорофилла *a* и каротиноидами (К/Хл *a*) отражает физиологическое состояние водорослей и обеспеченность биогенными элементами (Mineeva, 2004; Sigareva, Lyashenko, 2004; Belaya, Khristoforova, 2011; Yavorskaya, Klimin, 2019). Как правило, низкие значения этого соотношения (<1)

свидетельствуют о благополучном состоянии водорослей и наличии благоприятных условий для их развития. Соотношения > 1 указывают на снижение физиологической активности водорослей и ухудшение экологического состояния водного объекта. В исследованных реках соотношения К/Хл *a* в планктоне в целом были низкими (< 1), что может быть признаком удовлетворительного состояния водорослей (см. табл. 2). Исключение составляли станции на реках Сосновка (С-1 и С-2) и Вьюн (В-2), где этот показатель выше 1, что может свидетельствовать о нарушении нормального развития фитопланктона и присутствии сдерживающих факторов, скорее всего антропогенных (станции расположены в пределах поселков).

Разнообразие состава доминирующих групп водорослей фитопланктона на протяжении рек отражалось на их количественном развитии. Биомасса фитопланктона в реках изменялась от 0.15 до 27.6 г/м³, но в целом была относительно невысокой (см. рис. 2, табл. 2). Выделялись станции на реках Авлога (А-1) и Вьюн (В-1), где были зафиксированы максимальные значения биомассы планктона, содержания хлорофилла *a* и каротиноидов (см. рис. 2, табл. 2).

По содержанию хлорофилла *a* и уровню биомассы фитопланктона все исследованные реки можно отнести к разряду мезотрофных и слабо эвтрофных, а на отдельных станциях – эвтрофных (Trifonova, 1990; Mineeva, 2004; Burkova, 2012; Adamovich, Zhukova, 2014).

Статистический анализ выявил высокие значимые коэффициенты корреляции между пигментными характеристиками фитопланктона с общей биомассой и биомассой различных отделов водорослей. Наиболее высокие коэффициенты отмечаются между хлорофиллом *a*, общим хлорофиллом (Хл *a* + Хл *b* + Хл *c*) и биомассой зелёных водорослей и цианобактерий (см. табл. 3). Кроме того, выявлена положительная связь биомассы отделов водорослей с содержанием каротиноидов. Однако значимых корреляций соотношения К/Хл *a* и пигментных индексов (ПИ

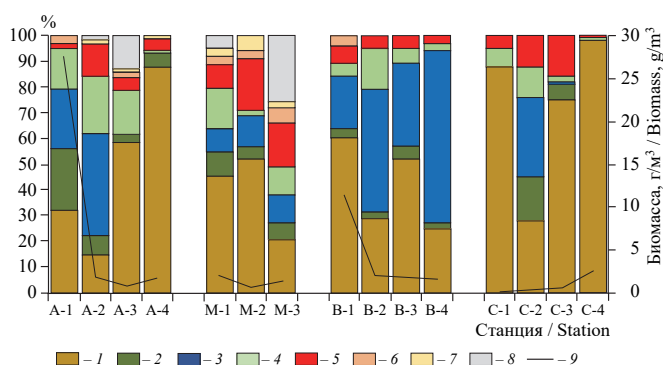


Рис. 2. Процентное соотношение отделов водорослей и общая биомасса в фитопланктоне рек в июле 2019 – 2021 гг.: 1 – диатомовые водоросли, 2 – зеленые водоросли, 3 – цианобактерии, 4 – эвгленовые водоросли, 5 – криптофитовые водоросли, 6 – динофитовые водоросли, 7 – золотистые водоросли, 8 – рафидофитовые водоросли, 9 – общая биомасса фитопланктона; А-1 – А-4 – станции на р. Авлоге, М-1 – М-3 – станции на р. Морье, В-1 – В-4 – станции на р. Вьюн, С-1 – С-4 – станции на р. Сосновке

Fig. 2. Percentage of the algae phylums and total biomass in river phytoplankton in July, 2019–2021: 1 – Bacillariophyta, 2 – Chlorophyta, 3 – Cyanobacteria, 4 – Euglenophyta, 5 – Cryptophyta, 6 – Dinophyta, 7 – Chrysophyta, 8 – Rhaphidophyta, 9 – total biomass; А-1–А-4 – stations on r. Avloga, М-1–М-3 – stations on r. Mor'ye, В-1–В-4 – stations on r. V'yun, С-1–С-4 – stations on r. Sosnovka

E₄₃₀/E₆₆₅, ПИ E₄₈₀/E₆₆₄) со структурными элементами фитопланктонного сообщества выявлено не было.

Так же, как и в фитопланктоне, в перифитоне исследованных рек наблюдалось неравномерное распределение содержания фотосинтетических пигментов по станциям (табл. 4). В целом концентрация хлорофилла *a* варьировала от 8.5 до 262 мкг/г субстр. и определяла 69 – 95% общей суммы пигментов. Максимальное содержание хлорофилла *a* отмечалось в перифитоне р. Сосновка, в других реках оно было ниже и могло меняться на порядок по станциям. В отличие от фитопланктона, в обрастаниях рек Авлога и Сосновка содержание хлорофилла *a* увеличивалось вниз по течению, в реках Морье и Вьюн – снижалось (см. табл. 4).

Таблица 4. Содержание пигментов в перифитоне рек в июле 2019 – 2021 гг., мкг/г субстр.
Table 4. Pigment content in the river periphyton in July 2019–2021, µg/g substr.

Станции / Stations	Хл <i>a</i> / Chl <i>a</i>	Хл <i>b</i> / Chl <i>b</i>	Хл <i>c</i> / Chl <i>c</i>	Каротиноиды / Carotenoids	К/Хл <i>a</i> / Car/Chl <i>a</i>
A-1	71.7±6.5	3.0±1.3	5.0±0.3	55.5±5.3	0.77
A-2	33±2.5	4.0±1.1	6.0±0.4	25.0±3.2	0.75
A-3	140±6.9	8.0±1.5	11.0±0.5	67.0±6.2	0.47
A-4	150±7.1	12.0±1.6	25.0±0.6	76.0±5.6	0.50
M-1	231±10.5	15.6±2.3	9.8±0.6	168.0±10.6	0.72
M-2	16.1±2.6	6.0±0.5	1.2±0.1	10.0±2.3	0.62
M-3	157.1±6.8	5.7±0.6	8.0±0.3	100.0±9.6	0.63
B-1	227±7.1	15.2±3.1	21.7±0.5	147.0±11.3	0.64
B-2	15.2±3.6	1.0±0.4	0.63±0.1	11.0±2.6	0.72
B-3	17.6±4.2	2.0±0.7	0.63±0.3	12.0±2.2	0.68
B-4	8.5±1.5	2.0±0.5	0.36±0.1	6.5±1.6	0.76
C-1	15.1±3.4	2.3±0.9	2.8±0.2	8.4±1.3	0.55
C-2	186.0±6.4	8.1±1.3	0.82±0.3	120.0±8.6	0.64
C-3	262.0±10.9	11.0±2.1	14.6±0.4	164.0±2.6	0.62
C-4	222.0±2.6	7.0±1.3	35.6±0.5	113.0±3.2	0.50

Примечание. Условные обозначения см. табл. 2.

Note. Designations as in Table 2.

Дополнительные зелёные пигменты составляли 4 – 25% (хлорофилл *b*) и 3 – 14% (хлорофилл *c*), т. е. их содержание было ниже, чем в фитопланктоне. Возможно, это определялось менее разнообразным таксономическим составом обрастаний (рис. 3). Содержание каротиноидов в перифитоне также изменялось соответственно концентрациям хлорофилла *a* и было максимальным на тех же станциях. Соотношения К/Хл *a* в целом были низкими (<1), что отражало высокую фотосинтетическую активность водорослей перифитона (см. табл. 4).

Биомасса перифитона изменялась в широких пределах: от 2.9 до 219.5 мг/г субстр., но в среднем развитие перифитона во всех реках было на одном уровне. Биомассу перифитона определяли в основном диатомовые, а также зеленые и эвгленовые водоросли. В нижнем течении р. Вьюн в перифитоне развивались прикрепленные цианобактерии (см. рис. 3).

Проведенный корреляционный анализ данных по перифитону рек выявил отсутствие связи между его пигментными и структурными характеристиками

ПИГМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬГОЦЕНОЗОВ МАЛЫХ РЕК

(табл. 5). Отмечается слабая достоверная связь хлорофилла с и его процентного содержания с биомассой диатомовых водорослей, а также пигментного индекса E_{480} / E_{664} с биомассой цианобактерий.

В отечественных шкалах оценки трофического уровня по содержанию фотосинтетических пигментов и биомассы перифитона (Oksiyuk et al., 1994; Shcherbak, Semenyuk, 2011; Sirotsky, 2014) количественные характеристики рассчитаны на мкг/м^2 субстр., тогда как наши данные измеряются в мкг/г субстр., что не позволяет использовать их для определения трофического статуса.

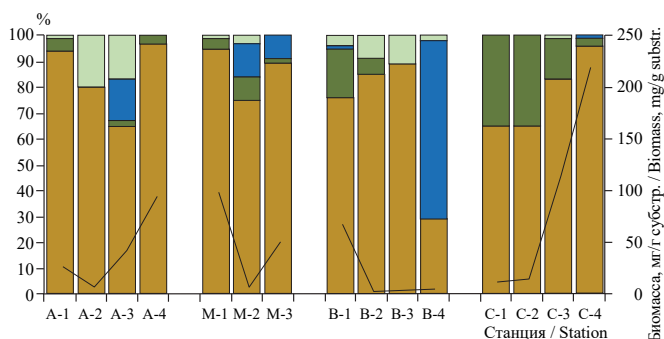


Рис. 3. Процентное соотношение отделов водорослей и общая биомасса в перифитоне рек в июле 2019 – 2021 гг. Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 3. Percentage of the algae phylums and total biomass in river periphyton in July, 2019–2021. Designations as in Fig. 2

Таблица 5. Коэффициенты корреляции фотосинтетических пигментов и пигментных индексов со структурными характеристиками перифитона рек

Table 5. Correlation coefficients of the photosynthetic pigments and pigment indices with the structural characteristics of river periphyton

Показатель / Parametr	$B_{\text{диат.}} / B_{\text{bacillar.}}$	$B_{\text{зелён.}} / B_{\text{chloroph.}}$	$B_{\text{цианоб.}} / B_{\text{cyanobac.}}$	$B_{\text{эвгл.}} / B_{\text{euglenoph.}}$	$B_{\text{общ.}} / B_{\text{total}}$
Хлорофилл <i>a</i> / Chlorophyll <i>a</i>	0.20	0.16	-0.06	0.13	0.22
Хлорофилл <i>b</i> / Chlorophyll <i>b</i>	0.01	0.11	-0.02	0.05	0.01
Хлорофилл <i>c</i> / Chlorophyll <i>c</i>	0.38	-0.01	-0.02	0.09	0.33
Хлорофилл общ./ Chlorophyll total	0.21	0.15	-0.05	0.13	0.22
Хлорофилл <i>a</i> % / Chlorophyll <i>a</i> %	0.02	0.21	0.01	0.17	0.15
Хлорофилл <i>b</i> % / Chlorophyll <i>b</i> %	-0.31	-0.12	-0.12	-0.17	-0.36
Хлорофилл <i>c</i> % / Chlorophyll <i>c</i> %	0.38	-0.22	0.16	-0.08	0.23
Каротиноиды / Carotenoids	0.19	0.22	-0.04	0.12	0.20
К/Хл <i>a</i> / Car/Chl <i>a</i>	-0.09	0.01	-0.12	-0.15	-0.21
ПИ E_{430}/E_{664} / PI E_{430}/E_{664}	0.04	0.05	0.04	0.16	0.03
ПИ E_{480}/E_{664} / PI E_{480}/E_{664}	-0.2	0.24	0.34	0.25	-0.16

Примечание. Условные обозначения см. табл. 3.

Note. Designations as in Table 3.

Для характеристики физиологического состояния альгоценозов также используют пигментные индексы. В исследованных реках значения пигментного индекса E_{480}/E_{664} в фитопланктоне изменялись от 0.1 до 2.9, в перифитоне – от 0.4 до 0.8. Величины пигментного индекса E_{430}/E_{665} изменялись от 1.5 до 5.6 в фитопланктоне и от 1.7 до 2.3 в перифитоне. Высокие значения этих индексов указывают на воз-

действие неблагоприятных факторов среды и ухудшение физиологического состояния водорослей. Наиболее высокие величины этих индексов были отмечены на станциях рек Сосновки и Вьюн. В реках Авлога и Морье их величины были ниже и изменялись в пределах, характеризующих нормальную жизнедеятельность водорослей в обоих альгоценозах. Следует отметить, что наблюдалось сходство динамики индексов, рассчитанных для фитопланктона и перифитона, что свидетельствует о том, что они достаточно хорошо отражают увеличение или снижение фотосинтетической активности водорослей.

Величины двух пигментных индексов, рассчитанных для альгоценозов исследованных рек, сопоставимы с величинами, приводимыми для водоёмов и водотоков различных регионов (Mineeva, 2004; Sigareva, Lyashenko, 2004; Belaya, Khristoforova, 2011; Yavorskaya, 2017; Mineeva, Metelyeva, 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для фитопланктона и перифитона исследованных рек характерна пространственная динамика фотосинтетических пигментов и пигментных индексов, которая в большой степени определяется локальными условиями рек, в том числе и антропогенными факторами.

В целом содержание фотосинтетических пигментов в двух альгоценозах малых рек северо-западного побережья Ладожского озера изменялось в достаточно широких пределах. В фитопланктоне рек концентрация хлорофилла *a* изменялась от 1.8 до 49.8 мг/м³, в перифитоне – от 8.5 до 262 мкг/г субстр. Динамика содержания хлорофилла *a* и каротиноидов фитопланктона и перифитона соответствует динамике их биомассы. Выявлена положительная корреляционная связь между общей биомассой фитопланктона и биомассой разных отделов водорослей с содержанием хлорофилла *a* и каротиноидами ($r = 0.6 - 0.89$, $p < 0.05$; $r = 0.66 - 0.84$, $p < 0.05$ соответственно). Связи общей биомассы и биомассы основных таксономических отделов перифитона с содержанием фотосинтетических пигментов выявлено не было.

По содержанию хлорофилла *a* в фитопланктоне все реки можно отнести к разряду мезотрофных и слабо эвтрофных, а в истоках рек Авлоги и Вьюн – эвтрофных. Соотношения фотосинтетических пигментов и пигментных индексов в альгоценозах свидетельствуют о том, что водоросли находятся в достаточно благоприятных условиях, при которых идут процессы фотосинтеза и соответственно самоочищения. Исключение составляют станции в верхнем течении рек Сосновка и Вьюн, где процессы жизнедеятельности водорослей угнетены под воздействием антропогенных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Adamovich B. V., Zhukova A. A. Relationship between chlorophyll *a* content and some phytoplankton characteristics in fish ponds and adjacent watercourses. *Hydrobiological Journal*, 2014, vol. 50, iss. 5, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i5.30>

Belaya S. A., Khristoforova N. K. Photosynthetic periphyton pigments in the rivers of Sikhote-Alinsky biosphere reserve. *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 2011, iss. 5, pp. 53–60 (in Russian).

Belyaeva P. G. The structure of phytoepiphyton and its functional role in the river Sylve (Kama basin). *Tyumen State University Herald*, 2005, no. 5, pp. 31–37 (in Russian).

Belyaeva P. G. Photosynthetic pigments of phytoepiphyton in the Sylva river (Middle Ural). *Inland Water Biology*, 2017, vol. 10, iss. 1, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1134/S1995082917010035>

Belyaeva P. G., Aristova R. A. Ecological status of the Chusovaya River by its epilithon and hydrochemical indices (near the Chusovoy town). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2020, no. 3, pp. 259–270 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-3-259-270>

Britton G. *The Biochemistry of Natural Pigments*. Moscow, Mir, 1986. 422 p. (in Russian).

Burkova T. N. Characteristics of phytoplankton in the river Samara region with different levels of human impact. *Izvestia Penzenskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta imeni V. G. Belinskogo. Natural Sciences*, 2012, no. 29, pp. 140–143 (in Russian).

Cano M. G., Casco M. A., Solari L. C., MacDonagh M. E., Gabbellone N. A., Claps M. C. Implications of rapid changes in chlorophyll-*a* of plankton, epipelon and epiphyton in Pampean shallow: An interpretation in terms of a conceptual model. *Hydrobiology*, 2008, vol. 614, iss. 1, pp. 33–45. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9534-6>

Chai C., Jiang T., Cen J., Ge W., Lu S. Phytoplankton pigments and functional community structure in relation to environmental factors in Pearl River Estuary. *Oceanologia*, 2016, vol. 58, iss. 3, pp. 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.03.001>

Gorokhova O. G. Biomass of phytoplankton and content of chlorophyll-*a* in the rivers of the Kuibyshevskoe, Saratovskoe and Volgogradskoe reservoirs. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 5-3, pp. 358–363 (in Russian).

Gorokhova O. G., Zinchenko T. D. Phytoplankton of the plain river Usa (the Kuibyshev reservoir basin). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2018, no. 4, pp. 391–403 (in Russian).

Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, Bd. 167, S. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)

Komulainen S. F. *Ecology of Attached Algal Communities in Small Rivers of East Fennoscandia*. Petrozavodsk, Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2004. 182 p. (in Russian).

Krylova E. G., Tikhonov A. V., Garin E. V. Floristic diversity in the small rivers with different morphology in the zone affected by backwater of a lowland reservoir. *Ecosystem Transformation*, 2021, vol. 4, no. 2, pp. 28–40. <https://doi.org/10.23859/estr-210126>

Lindström E. A., Johansen S. W., Saloranta T. Periphyton in running waters – long-term studies of natural variation. *Hydrobiology*, 2004, vol. 521, iss. 1–3, pp. 63–86. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000026351.68927.ee>

Metel'eva N. Yu. Pigment characteristics of summer epiphyton in reservoirs of the Upper Volga. *Water: Chemistry and Ecology*, 2017, no. 3, pp. 34–39 (in Russian).

Mineeva N. M. *Plant Pigments in the Water of the Volga River Reservoirs*. Moscow, Nauka, 2004. 156 p. (in Russian).

Mineeva N. M., Metel'eva N. Y. Comparative characteristics of phytoplankton and epiphyton productivity in the Upper Volga reservoirs. *Inland Water Biology*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 37–44. <https://doi.org/10.1134/S1995082919050146>

Mosisch T. D., Bunn S. E., Davies P. M., Marshall C. J. Effects of shade and nutrient manipulation on periphyton growth in a subtropical stream. *Aquatic Botany*, 1999, vol. 64, iss. 2, pp. 167–177. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00014-5)

Oksiyuk O. P., Zimbalevskaya L. N., Protasov A. A. Assessment of the state of water bodies in Ukraine according to hydrobiological indicators. Benthos, periphyton and zoophytes. *Hydrobiological Journal*, 1994, vol. 30, no. 4, pp. 31–35 (in Russian).

Parsons T. R., Strickland J. D. H. Discussion on spectrophotometric determination of marine-plant pigments with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. *Journal of Marine Research*, 1963, vol. 21, iss. 3, pp. 155–168.

Shcherbak V. I., Semenyuk N. E. The use of phytomicroperiphyton to assess the ecological status of anthropogenically altered aquatic ecosystems. *Hydrobiological Journal*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 27–42 (in Russian).

Sidelev S. I., Babanazarova O. V. The link analysis of the pigmentary and structural characteristics of the high-eutrophic lake phytoplankton. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2008, vol. 1, no. 2, pp. 162–177 (in Russian).

Sigareva L. E., Lyashenko O. A. Significance of pigment characteristics of phytoplankton in water quality estimating. *Water Resources*, 2004, vol. 31, no. 4, pp. 437–442. <https://doi.org/10.1023/B:WARE.0000035684.01741.c8>

Sirotsky S. E. Photosynthetic pigments in the watercourses periphyton of the basins of Zeya and Bureya rivers. *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 2014, iss. 6, pp. 619–628 (in Russian).

Stanislavskaya E. V. Pigment characteristics of periphyton at lake-river systems in urbanized territories. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 2-2, pp. 502–506 (in Russian).

Stanislavskaya E. V., Trifonova I. S. Production characteristics of plant periphyton. In: *Osobennosti formirovaniia kachestva vody v raznotipnykh ozerakh Karel'skogo peresheika* [Features of the Formation of Water Quality in Different Types of Lakes on the Karelian Isthmus]. Leningrad, Nauka, 1984, pp. 192–206 (in Russian).

Trifonova I. S. *Ekologiya i suktsessiya ozernogo fitoplanktona* [Ecology and Succession of Lake Phytoplankton]. Leningrad, Nauka, 1990. 184 p. (in Russian).

Yavorskaya N. M. Content of photosynthetic pigments in periphyton algae of the Amurskaya channel (Khabarovsk territory). *Regional Problems*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 5–10 (in Russian).

Yavorskaya N. M., Klimin M. A. Content of photosynthetic pigments in the algae periphyton of small rivers in the Khekhcirskiy wildlife sanctuary (Khabarovsk territory). *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 2019, iss. 8, pp. 190–197 (in Russian). <http://doi.org/10.25221/levanidov.08.20>

Pigment characteristics of algocenoses in small rivers of the northwestern coast of Lake Ladoga

E. V. Stanislavskaya ✉, A. L. Afanas'eva

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanova St., St. Petersburg 196105, Russia*

Received: March 30, 2024 / revised: October 30, 2024 / accepted: November 12, 2024 / published: July 24, 2025

Abstract. Data on the spatial dynamics of the content of chlorophylls *a*, *b* and *c*, carotenoids and pigment indices of phytoplankton and periphyton in small rivers (tributaries of the western coast of Lake Ladoga) are presented. The chlorophyll *a* content of river phytoplankton varied from 1.8 to 49.8 mg/m³, in periphyton – from 8.5 to 262 µg/g of substrate, that corresponded to a mesotrophic status, and in some river parts – to a eutrophic status. The chlorophyll *a* content of phytoplankton decreased towards the river mouth in the Avloga and Vyun rivers, in the Morye river it increased downstream, and in the Sosnovka river it was distributed relatively evenly. The chlorophyll *a* content of periphyton increased downstream in the Avloga and Sosnovka rivers, while in the Morye and Vyun rivers it decreased. In the total of chlorophyll pigments in both algocenoses, chlorophyll *a* prevailed, its fraction being 56–96%. The ratios of additional pigments (chlorophyll *b* and *c*) indicated the predominance of green algae, diatoms, and euglenoid algae in the studied communities. In general, comparison of pigments and carotenoids has revealed favorable conditions for the functional activity of both phytoplankton and periphyton communities, that allows classifying the studied rivers as slightly polluted.

Keywords: small rivers, phytoplankton, periphyton, chlorophylls *a*, *b*, *c*, carotenoids, pigment indices, trophic status

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Stanislavskaya E. V., Afanas'eva A. L. Pigment characteristics of algocenoses in small rivers of the northwestern coast of Lake Ladoga. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 2, pp. 210–221 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-210-221>

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Hydrobiology of Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (I. Limnology RAS-SPC RAS), Russia.

ORCID and e-mail addresses: Elena V. Stanislavskaya: <https://orcid.org/0000-0002-2897-7636>, stanlen@mail.ru;
Anna L. Afanas'eva: <https://orcid.org/0000-0001-7282-1383>, afal359@mail.ru.