

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.555.6:581.132.1

ХЛОРОФИЛЛ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ТРОФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛАГУНЫ БУССЕ (о. САХАЛИН)

© 2024 г. Т. Г. Коренева^{а, *}, Л. Е. Сигарева^б, И. В. Сырбу^а

^аСахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства
и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия

^бИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

*e-mail: t.koreneva@sakhniro.ru

Поступила в редакцию 16.09.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принята к публикации 01.12.2023 г.

Получены новые сопряженные данные о содержании хлорофилла *a* (Хл *a*) и его производных (феопигментов — Ф) в воде и донных отложениях лагуны Буссе (о. Сахалин). Хл *a* + Ф в воде представлен преимущественно активной формой ($61.4 \pm 1.1\%$), в донных отложениях — продуктом его деградации ($84.7 \pm 2.5\%$). Выявлена связь пигментов в воде и донных отложениях между собой, а также с абиотическими условиями первичного продуцирования. Впервые показано для уникального водоема, характеризующегося зарастанием водной растительностью, илонакоплением и регулярной гибелью гидробионтов, сходство среднегодовой скорости осадконакопления в лагуне с соотношением пигментов пелагиали и бентали. Установлено превалирующее влияние биотического фактора на формирование трофических условий в период сезонного минимума развития фитопланктона. По среднему содержанию Хл *a* + Ф в воде (4.1 ± 0.8 мкг/дм³) и донных отложениях (13.5 ± 4.0 мкг/г с.о.), лагуна Буссе — мезотрофный водоем. Трофическое состояние бентали за период 2013–2021 гг. сохраняется, оставаясь олиготрофным в мелководном прибрежье и мезотрофным в центральной части лагуны.

Ключевые слова: лагуна Буссе, хлорофилл, феопигменты, вода, донные отложения, трофическое состояние

DOI: 10.31857/S0320965224050045, EDN: XSMDFW

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность водной экосистемы — основной показатель, отражающий особенности функционирования биологических сообществ в различных условиях среды. Целостное представление о формировании и трансформации ОВ в водоеме дает комплексное изучение пелагиали и бентали. Взаимодействие биотопов отражает, наряду с другими характеристиками, информация о фотосинтетических пигментах, которые относятся к маркерам ОВ, синтезированного фитопланктоном, фитобентосом и другими растительными сообществами и микроорганизмами. Концентрацию Хл *a* — основного пигмента фитопланктона, количественно связанного с продуктивностью водорослей, используют для изучения трофического статуса водных экосистем (Винберг, 1960;

Carlson, 1977; Китаев, 2007). Интегральным показателем продукционно-деструкционных процессов в водоеме служит содержание пигментов в ДО, позволяющее проследить эволюцию его продуктивности (Сигарева, 2012; Linghan, 2023). Несмотря на высокую информативность, связь между пигментами ДО и первичной продукцией, в том числе Хл *a* в воде, изучена недостаточно. Особый интерес в этом аспекте представляют высокопродуктивные экосистемы, находящиеся в терминальной стадии развития (Reavie et al., 2017; Guimaraes-Bermejo et al., 2018). Для лагуны Буссе — перспективного для марикультуры водоема о. Сахалин, характерны регулярная гибель водных организмов и заиление (Калганова, 1993; Тепаева, Калганова, 2012), что относится к признакам олиготрофно-эвтрофной сукцессии экосистемы. В этой связи для своевременного выявления трансформации продуктивности водоема необходима комплексная оценка его состояния.

Сокращения: ДО — донные отложения, ОВ — органическое вещество, с.о. — сухой осадок, Ф — феопигменты, Хл *a* — хлорофилл *a*.

При хорошей изученности фитопланктона лагуны (Кантаков и др., 2007; Ефанов, Тепаева, 2014; Мотылькова, Коновалова, 2021 и др.), данные о пигментах в ДО единичны (Коренева и др., 2021), а в воде отсутствуют.

Цель работы — оценить содержание Хл *a* и продуктов его деградации в воде и ДО лагуны Буссе в связи с условиями формирования продуктивности для получения целостного представления о состоянии его экосистемы на современном этапе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лагуна Буссе — морской водоем (Хлебович, 1989), среднего размера (Бровко и др., 2002). Имеет статус природного парка. Занимает площадь ~43 км², преобладают глубины 2–5 м, площадь водосборного бассейна 700 км² (Задкова и др., 1975). Это полузакрытый водоем, соединенный с зал. Анива (Охотское море) проходом Суслова (Бровко и др., 2002). Гидрохимические условия зависят от водообмена с зал. Анива, приливно-отливных течений и циркуляции вод, поверхностного стока (Шпилько, Шевченко, 2018). Грунтовый комплекс представлен песком (43%), алевроито-пелитом (31%), галечником и гравием (26%) (Ефанов и др., 2013). Пески доминируют в прибрежье, илы — в центре лагуны (Коренева и др., 2021). Первичное продуцирование определяют диатомовые и динофитовые водоросли (Мо-

тылькова, Коновалова, 2021). В последние годы в составе доминантного комплекса отмечен вид динофлагелляты — *Prorocentrum micans* (Ehrenberg) (Ефанов, Тепаева, 2014; Мотылькова, Коновалова, 2021), подавляющий рост других водорослей (Гольдин, 2013). Данный вид вызывает “цветение” воды (Матишов, Фуштей, 2003) и замор гидробионтов, связанный с гипоксией (Faust et al., 1999). Основной продуцент среди макрофитов — красная морская водоросль анфельция тобучинская *Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis* (Kanno et Matsubara) Skriptsova et Zhigadlova, запасы которой за 1916–2012 гг. сократились в 3.8 раз (Евсеева, 2016). На анфельции в виде эпифитов произрастают бурые и ламинариевые водоросли. Прибойная полоса занята отмершей водной растительностью, побережье — морскими травами, устья рек — рдестами и зостерой (Задкова и др., 1975). Лагуна является местом обитания и воспроизводства уникальных видов гидробионтов — гребешка, трепанга, краба и др.

Материал собран 12 и 13 июля 2021 г. на 24 станциях разнотипных районов лагуны Буссе — прибрежных (0.5–1.2 м) и центральном (3.6–5.6 м) (рис. 1, табл. 1). Пробы отбирали в подповерхностном (0.5 м) слое воды тefлоновым пробиротборником ПЭ-1420 (объем 2 дм³) и в верхнем (0–5 см) слое ДО дночерпателем Ван–Вина (площадь захвата 0.025 м²). На всех станциях измеряли температуру воды (Т, °С), соленость (S, ‰),

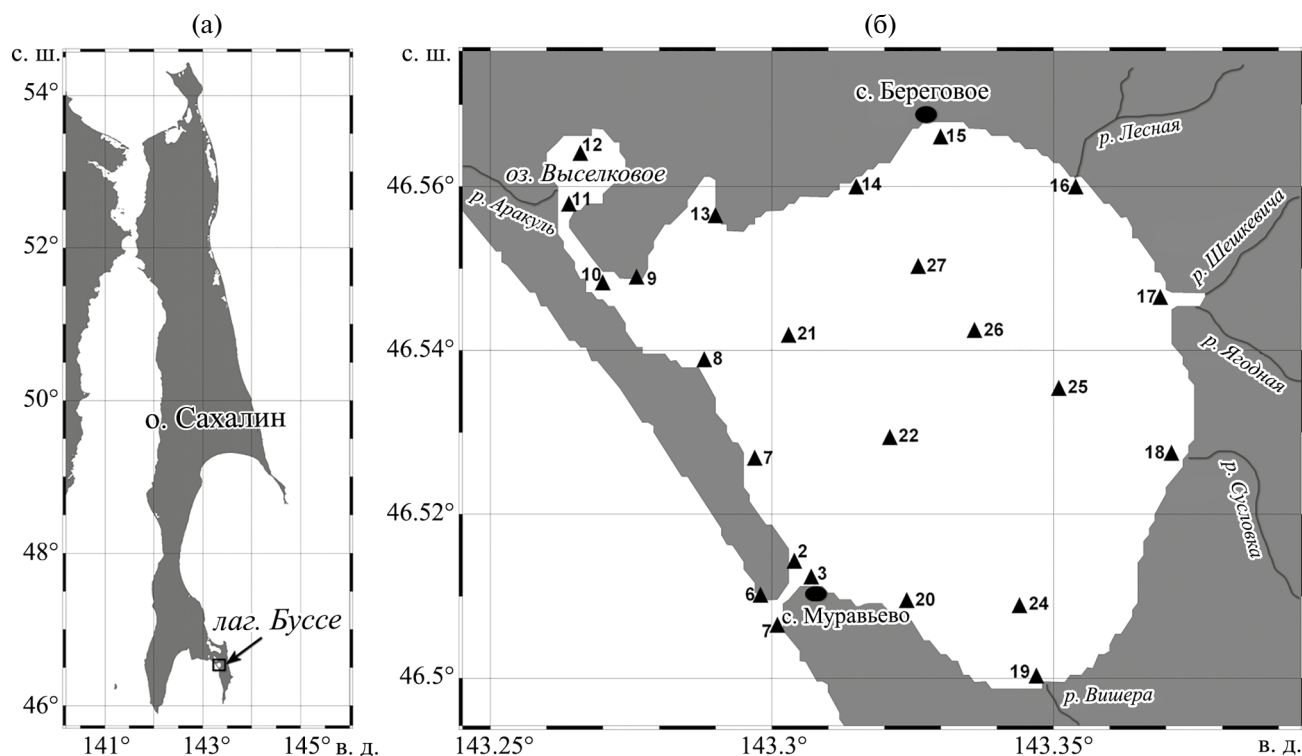


Рис. 1. Схема расположения станций в лагуне Буссе в 2021 г.

Таблица 1. Некоторые характеристики изученных районов в лагуне Буссе

№ района	Район	Станции	Глубина, м	Влажность ДО, %	ОВ в ДО, %	Фракция ДО <0.1 мм, %
I	Проход Суслова	2, 3	0.5–0.7	19.9 ± 0.3	0.68 ± 0.14	1.2 ± 0.2
II	Зал. Анива	4, 6	0.5–0.7	20.1 ± 0.4	0.79 ± 0.16	2.1 ± 0.3
III	Западное побережье	7–10	0.8–1.0	28.8 ± 0.4	1.6 ± 0.3	5.8 ± 0.7
IV	оз. Выселковое	11, 12	0.8–1.2	37.4 ± 0.6	2.2 ± 0.4	5.9 ± 0.7
V	Северное побережье	13–15	0.7–1.0	44.8 ± 0.8	2.6 ± 0.5	41.3 ± 6.4
VI	Восточное побережье	16, 17	0.7–1.0	29.5 ± 0.6	1.7 ± 0.4	20.3 ± 7.5
VII	Южное побережье	18–20	0.7–1.0	35.2 ± 1.0	1.9 ± 0.4	25.4 ± 6.4
VIII	Центральный район	21, 22, 24–27	3.6–5.6	51.9 ± 6.0	4.0 ± 0.7	58.8 ± 14.6

водородный показатель (рН, ед.). На базе аккредитованной лаборатории с использованием аттестованных методик параллельно с определением пигментов проводили гидрохимические исследования (БПК₅, растворенный кислород, биогенные элементы (азот аммонийный, нитритный и нитратный; фосфор фосфатный и общий; кремний) и физико-химический анализ ДО (влажность, гранулометрический состав, тип и содержание ОВ).

Пробы для исследования пигментов в воде и ДО подготавливали по стандартной процедуре.¹ Содержание Хл *a* и Ф – производных Хл *a*, определяли спектрофотометрическим методом (Logezzen, 1967; Jeffrey, Humphrey, 1975). Концентрацию пигментов в ДО рассчитывали с использованием тех же формул, что и в воде, используя вместо объема воды массу сухого грунта. Содержание Хл *a* + Ф выражали в микрограммах на 1 г сухой массы образца (мкг/г с.о.), миллиграммах на 1 г органического вещества (мг/г ОВ) и сырого осадка на площади 1 м² толщиной 1 мм (мг/(м² × мм)). Соотношение между концентрациями пигментов (СКП) в воде и ДО определяли как толщину слоя грунта, в котором концентрация Хл *a* + Ф соответствует его концентрации в столбе воды (Сигарева, 2012).

Трофический статус пелагиали оценивали по концентрации Хл *a* + Ф в фитопланктоне (Carlson, 1977; Китаев, 1984), бентали – по его концентрации в расчете на сухой осадок (Möller, Scharf, 1986). Статистическую обработку результатов выполняли с помощью прикладных программ MS Excel и Statistica v. 10. Анализ массива данных проводили методом главных компонент. Достоверность различий средних значений оценивали по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена ($p < 0.05$).

¹ ГОСТ 17.1.4.02–90. Вода. Методика спектрометрического определения хлорофилла *a*. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009756> (дата обращения 16.09.2023 г.)

Таблица 2. Абиотические характеристики воды и ДО лагуны Буссе

Показатель	Центральный район (n = 6)	Прибрежье (n = 18)
Температура, °C	21.0 ± 0.5 (6)	22.1 ± 0.4 (7)
Соленость, ‰	28.3 ± 1.1 (9)	24.8 ± 5.8 (33)
рН, ед.	8.18 ± 0.02 (1)	8.23 ± 1.9 (4)
Растворенный кислород, %	111.7 ± 7.9 (17)	118.6 ± 28.0 (24)
БПК ₅ , мг/дм ³	1.20 ± 0.09 (18)	1.95 ± 0.46 (58)
Азот нитритный, мкг/дм ³	<0.25 (1)	0.7 ± 0.2 (132)
Фосфор фосфатный, мкг/дм ³	5.3 ± 0.7 (32)	16.0 ± 3.8 (60)
Влажность ДО, %	51.9 ± 6.0 (29)	30.8 ± 2.7 (36)
ОВ, %	4.0 ± 0.7 (41)	1.7 ± 0.3 (48)
Фракция ДО <0.1 мм, %	58.8 ± 14.6 (61)	14.6 ± 3.3 (108)

Примечание. Здесь и в табл. 4, даны средние значения со стандартной ошибкой, в скобках – коэффициент вариации C_v , %; n – число станций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По данным системы Terascan², июль 2021 г. в районе исследования характеризуется как аномально теплый. Температура поверхности воды в лагуне превысила нормальное значение, рассчитанное за период 1998–2022 гг., на 5.8°C. Наиболее теплые воды (до 25.0°C) зарегистрированы у восточного побережья, наиболее холодные (до 18.8°C) – в проходе Суслова. Вариации солености в прибрежье лагуны были гораздо шире, чем в ее центре (табл. 2). Слабощелочная реакция среды и значительная вариабельность содержания растворенного в воде кислорода отражали фотосинтетическую способность растительных организ-

² <http://www.seaspace.com> (дата обращения 16.09.2023 г.)

мов. Концентрации биогенных элементов были невысокими, тогда как содержание ОВ (по БПК₅) в отдельных прибрежных районах (станции 12, 15–17, 19) достигало существенных значений (2.56–4.86 мкг/дм³). Влажность осадков, доля в них илистых фракций и ОВ в центральном районе превышали таковые в прибрежье (табл. 2). Максимальное содержание ОВ в ДО (2.1–6.0%) отмечено в наиболее влажных (33.2–68.5%) алевро-пелитах в центре лагуны.

Концентрации Хл *a* + Ф в воде лагуны Буссе изменялись в диапазоне 0.87–16.0 мкг/дм³, в ДО – 0.22–64.8 мкг/г с.о. (0.03–1.35 мкг/г ОВ). Средние значения содержания пигментов приведены в табл. 3. Количество продуктов деградации хлорофилла – феопигментов в водной толще достигало 0.43–10.4 мкг/дм³ (C_v 132 ± 3%) или 23.9–74.3% суммы с чистым Хл *a*. Содержание Ф в грунтах изменялось в пределах 3.9–52.5 мкг/г с.о. (C_v 142 ± 17%), создавая основную часть пигментов ДО (67.1–98.8%). Между Ф и Хл *a* + Ф в воде и ДО установлена тесная зависимость (рис. 2). В прибрежье содержание пигментов и характеристики абиотических условий варьировали в более широких пределах, чем в центре лагуны (табл. 2, 3). Коэффициенты вариации (C_v) средних концентраций Хл *a* + Ф в воде (92 ± 4%) были ниже, чем в грунтах (144 ± 20%). Повышенные уровни Хл *a* + Ф в воде (7.1–12.1 мкг/дм³) приурочены к местам впадения рек в северном (ст. 15) и восточном (ст. 16–18) районах лагуны с максимумом (16.0 мкг/дм³) в оз. Выселковое (ст. 12). Наиболее высокие концентрации осадочных пигментов (>42.8 мкг/г с.о. или 0.96 мкг/г ОВ) зарегистрированы для зоны “затишья” в центре лагуны (Задкова и др., 1975).

Корреляционная связь между содержанием Хл *a* + Ф в ДО и его концентрацией в единице объе-

ма воды слабо выражена (табл. 4). Значимая положительная связь отмечена между концентрацией пигментов в воде под единицей площади (м²) и в сухом осадке, а также в отложениях с натуральной влажностью. Соотношения между количеством Хл *a* в водном столбе и верхнем слое осадка изменялись от 0.1 до 7.5 мм в зависимости от станции. Вариабельность и средняя величина соотношения между концентрациями пигментов в центре лагуны меньше, чем в прибрежье (табл. 3). Среднее значение этого показателя для лагуны (1.7 ± 0.4 мм) почти совпадает со среднегодовой скоростью осадконакопления (1.6 мм) (Задкова и др., 1975).

Таблица 3. Содержание пигментов и их соотношения в воде и ДО лагуны Буссе

Показатель	Центральный район (<i>n</i> = 6)	Прибрежье (<i>n</i> = 18)
Вода		
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/дм ³	2.1 ± 0.3 (30)	4.7 ± 1.0 (90)
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/м ²	9.8 ± 1.0 (24)	3.6 ± 0.8 (91)
Ф, мкг/дм ³	0.76 ± 0.14 (44)	2.2 ± 0.6 (126)
Ф, % суммы Хл <i>a</i> + Ф	35.1 ± 4.2 (29)	42.2 ± 3.9 (38)
Донные отложения		
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/г с.о.	39.9 ± 9.9 (61)	4.8 ± 1.0 (95)
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/(м ² · мм)	22.8 ± 4.2 (45)	5.0 ± 1.0 (81)
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/г ОВ	0.90 ± 0.15 (42)	0.24 ± 0.04 (77)
Ф, мкг/г с.о.	34.2 ± 8.6 (62)	4.3 ± 0.9 (89)
Ф, % от суммы Хл <i>a</i> + Ф	82.7 ± 3.5 (10)	86.7 ± 1.5 (7)
СКП, мм	0.6 ± 0.2 (69)	2.1 ± 0.5 (104)

Примечание. с.о. – сухой осадок, остальные обозначения даны в табл. 2.

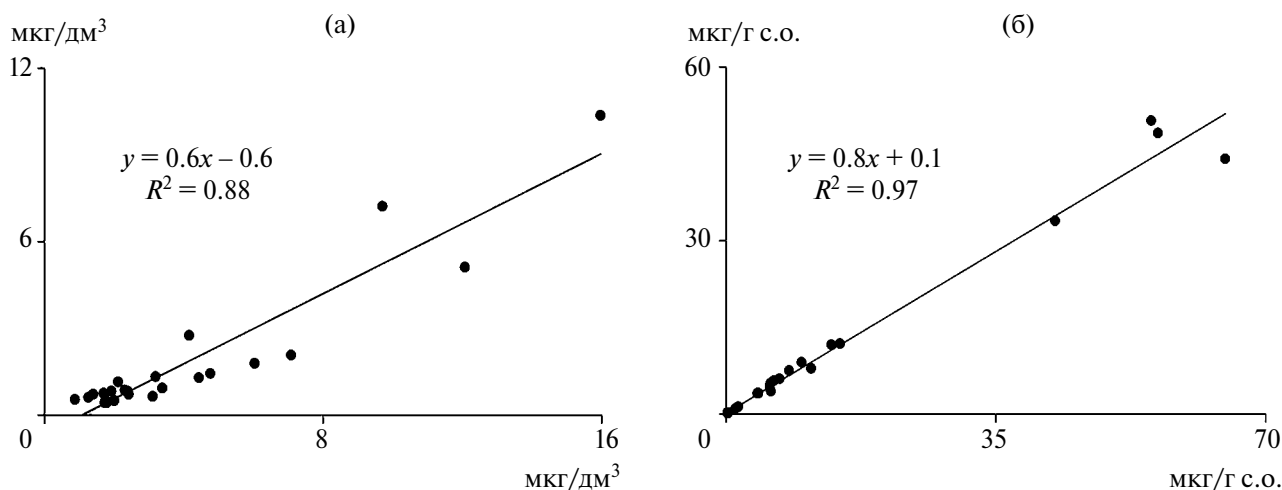


Рис. 2. Корреляционная зависимость между содержанием Ф и Хл *a* + Ф в воде (а) и ДО (б). По оси абсцисс – концентрация Хл *a* + Ф, по оси ординат – концентрация Ф.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между содержанием пигментов в лагуне Буссе и абиотическими характеристиками водной среды

Показатель, ед. измерения	Хл <i>a</i> + Ф в воде		Хл <i>a</i> + Ф в ДО	
	мкг/дм ³	мг/м ²	мкг/г с.о.	мг/(м ² × мм)
Глубина, м	−0.29	0.71	0.70	0.72
БПК ₅ , мг/дм ³	0.62	0.18	−0.24	−0.26
Азот нитритный, мкг/дм ³	0.64	0.30	−0.10	−0.10
Фосфор фосфатный, мкг/дм ³	0.59	−0.25	−0.62	−0.48
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/дм ³	1.0	0.50	−0.21	−0.27
Хл <i>a</i> + Ф, мг/м ²	0.50	1.0	0.51	0.56
Хл <i>a</i> + Ф в ДО, мкг/г с.о.	−0.21	0.51	1.0	0.94
Хл <i>a</i> + Ф, мг/(м ² · мм)	−0.27	0.56	0.94	1.0
ОВ в ДО, %	0.00	0.65	0.88	0.79
Влажность, %	0.05	0.65	0.89	0.76
Хл <i>a</i> + Ф, мг/г ОВ	−0.28	0.44	0.92	0.98
Диаметр частиц, %:				
10–1 мм	0.38	−0.23	−0.77	−0.77
0.9–0.1 мм	−0.21	−0.52	−0.15	−0.10
0.09–0.005 мм	0.04	0.55	0.55	0.53

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0.05$).

Содержание Хл *a* + Ф в единице объема воды связано с концентрацией биогенных и органических веществ (табл. 4). Еще более сильная связь получена между количеством пигментов под единицей площади воды, а также в грунтах и глубиной станции. Влияние температуры, солености, рН и содержания растворенного в воде кислорода на пигментные показатели в лагуне не выявлено.

Количество осадочного Хл *a* + Ф связано с типологическими характеристиками грунтов, более тесная зависимость отмечена с влажностью и содержанием ОВ (табл. 4). Характер связей отражает взаимный рост концентрации хлорофилла в осадках и их физико-химических характеристик. Так, в песчаных ДО с низкой влажностью и минимальным содержанием ОВ у прохода Суслова (районы I и II) количество пигмента наиболее низкое (рис. 3). В илисто-песчаных ДО с повышенными влажностью и концентрацией ОВ у западного побережья и в оз. Выселковое (районы III и IV соответственно) содержание Хл *a* + Ф существенно выше. Максимальное содержание

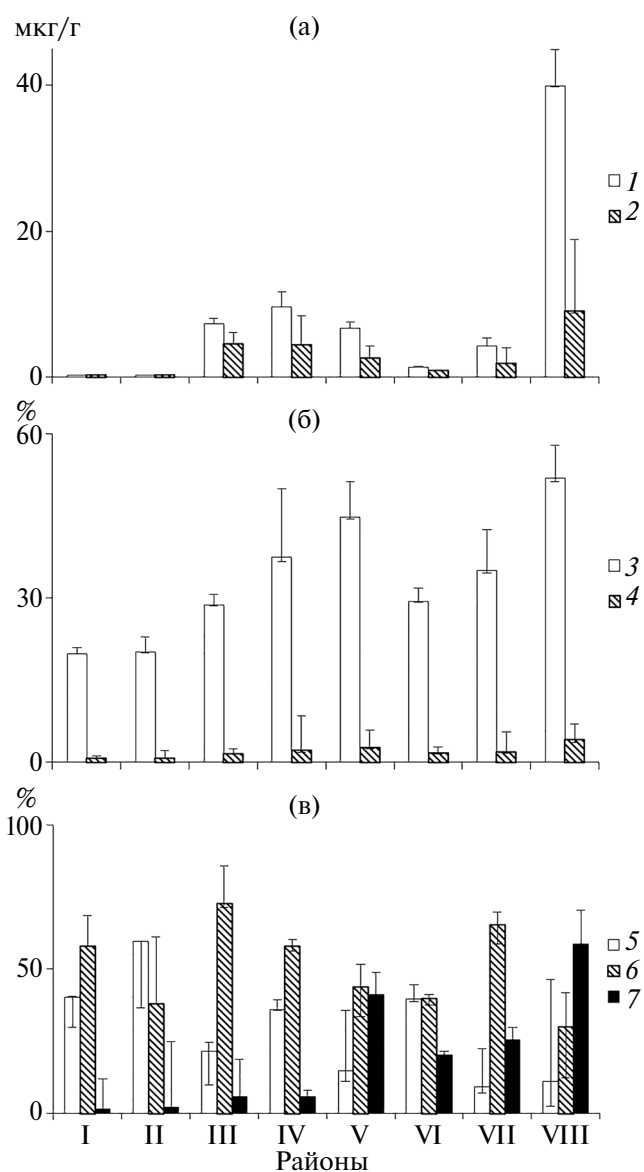


Рис. 3. Содержание пигментов (а), воды и ОВ (б), типа грунта (в) в ДО исследованных районов лагуны Буссе. По оси ординат: а – концентрация Хл *a* + Ф в сухом осадке (1) и в ОВ (2); б – влажность сырого осадка (3) и содержание ОВ в сухом осадке (4); в – доля в ДО галечника и гравия (5), песка (6), алевритов и пелитов (7); по оси абсцисс – номера районов.

Хл *a* + Ф отмечено в илах с наибольшими влажностью и долей ОВ в центре лагуны (район VIII).

Анализ массива данных показал, что наиболее значимый фактор (30% общей дисперсии) связывает пигменты ДО, физико-химические характеристики бентали (влажность, содержание ОВ, доля илов) и глубину станции (табл. 5). Второй фактор (25%) группирует пигменты и характеристики пелагиали (БПК₅, N-NO₂, P-PO₄). В меньшей степени (23%) связаны между собой гидролого-гидрохимические (температура, соленость,

Таблица 5. Факторные нагрузки для некоторых изученных параметров воды и ДО в лагуне Буссе

Показатель	Фактор			
	1	2	3	4
Температура, °C	0.25	−0.44	−0.61	0.24
Глубина, м	−0.79	−0.21	0.13	−0.08
Соленость, ‰	0.18	−0.23	0.89	−0.11
pH, ед.	0.27	0.10	0.61	−0.16
Растворенный кислород, % насыщения	0.19	0.12	0.89	0.06
БПК ₅ , мг/дм ³	0.24	0.69	−0.35	−0.03
Азот нитритный, мкг/дм ³	0.10	0.72	−0.37	0.04
Фосфор фосфатный, мкг/дм ³	0.35	0.52	0.19	−0.23
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/дм ³	0.11	0.94	+0.10	0.08
Хл <i>a</i> + Ф, мг/м ²	−0.65	0.52	−0.12	0.05
Ф, мкг/дм ³	0.12	0.88	−0.02	0.16
Хл <i>a</i> + Ф, мкг/г с.о.	−0.96	−0.10	−0.11	−0.13
Хл <i>a</i> + Ф, мг/(м ² × мм)	−0.91	−0.12	−0.15	−0.09
Ф, мкг/г с.о.	−0.95	−0.07	−0.13	−0.10
Влажность, %	−0.84	0.16	−0.07	−0.39
ОВ в ДО, %	−0.83	0.13	−0.10	−0.44
Хл <i>a</i> + Ф, мг/г ОВ	−0.91	−0.12	−0.21	−0.21
Диаметр частиц, %:	0.24	0.31	0.04	0.83
10–1 мм	0.27	0.31	−0.04	0.65
>1–0.1 мм	−0.52	0.16	−0.01	−0.74
>0.1–0.005 мм				
Вклад фактора в суммарную дисперсию, %	33	22	13	10

Примечание. Значения получены путем многомерного факторного анализа корреляционной матрицы (для 20 переменных) по методу главных компонент с варимакс-вращением. Жирным шрифтом выделены значимые нагрузки (при $p < 0.05$).

pH, концентрация растворенного в воде кислорода) и геоморфологические (гранулометрический состав грунтов) показатели.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Содержание Хл *a* + Ф (4.1 ± 0.8 мкг/дм³) в воде лагуны Буссе в июле 2021 г. в среднем превышало уровни, характерные для зал. Анива Охотского моря в аналогичный период 2007 г. (0.74 ± 0.07 мкг/дм³), 2009 г. (1.08 ± 0.06 мкг/дм³) и 2012 г. (1.05 ± 0.09 мкг/дм³) (Коренева, Латковская, 2013). Средняя концентрация Хл *a* + Ф в ДО лагуны (13.5 ± 4.0 мкг/г с.о.) также была выше, чем в зал. Анива (6.5 ± 0.7 мкг/г с.о.) и Амурском лимане Японского моря ($3.0–10.0$ мкг/г с.о.) (Марьяш и др., 2010). Более высокое содержание Хл *a* + Ф в воде и ДО лагуны по сравнению с морскими водоемами умеренно-муссонного климата

обусловлено специфичностью водоема. Известно, что лагуны — это центры химических природных превращений, где происходит интенсификация биологических процессов (Cadier et al., 2017). Несмотря на аномально жаркое лето, среднее содержание Хл *a* + Ф в ДО водоема в 2021 г. было в 1.6 раз ниже, чем в июле 2013 г. (Коренева и др., 2021). Исходя из максимальной продукционной активности фитопланктона в лагуне Буссе при температуре воды $3.0–11.7^\circ\text{C}$ в мае и $16.0–16.8^\circ\text{C}$ в сентябре (Мотылькова, Коновалова, 2021), можно предположить, что условия экстремального прогрева в июле 2021 г. не были благоприятными для развития водорослей. Пониженная продуктивность также могла быть следствием низкой солнечной активности (Golosov et al., 2021). Среднее значение солнечной активности (число Вольфа) в июле 2021 г. было значительно ниже, чем в июле 2013 г.³.

В пигментном составе воды преобладала активная форма Хл *a*, в осадочном комплексе — продукты его деградации. Это связано с более сильным разрушением пигментов в ДО, чем в воде, а также с неблагоприятными условиями для сохранения осадочного Хл *a* в составе новообразованного ОВ. Тесная зависимость между Хл *a* + Ф и Ф указывает, что основной источник Ф в лагуне — планктонные водоросли. Содержание Ф в воде сопоставимо с таковым для зал. Анива в период сезонного минимума развития фитопланктона (Коренева, Латковская, 2013).

Неоднородность пространственного распределения концентраций Хл *a* + Ф в воде согласуется с таковым для фитопланктона в период его летнего минимума (Мотылькова, Коновалова, 2021). В отличие от зал. Анива с наибольшими показателями продуктивности в центре акватории (Коренева, Латковская, 2013), в лагуне Буссе максимумы содержания Хл *a* + Ф отмечены в устьевых зонах побережья, обогащенных биогенными элементами за счет речных вод (Ефанов и др., 2014).

Неоднородность распределения Хл *a* + Ф в ДО является следствием различных условий формирования грунтов и их продукционных свойств. В зоне влияния речных вод в побережье высокая доля ОВ и повышенная влажность осадков связаны с активным развитием бентосных водорослей при хорошей обеспеченности их минеральными солями. Максимальное содержание пигментов в ДО глубоководных станций центрального района типично для лагуны и согласуется со статичностью и повышенным заилинием (Коренева и др., 2021). Причиной повышенного содержания Хл *a* + Ф в ДО в центре лагуны может быть большее количество осаждающейся растительной взвеси на глубоководных станциях и деструкция

³ <https://www.sidc.be/SILSO/home> (Дата обращения 16.09.2023 г.)

илистых осадков в условиях дефицита растворенного в воде кислорода, фиксируемого по присутствию сероводорода в придонных слоях. Тесная связь содержания Хл $a + \Phi$ с распределением ДО по площади дна зависит от их типологических и физико-химических свойств, что согласуется с полученными ранее для лагуны Буссе и зал. Анива данными (Коренева, Сигарева, 2019; Коренева и др., 2021). Зависимость между количеством осадочного Хл $a + \Phi$ и содержаниями ОВ в ДО подтверждает индикаторную значимость пигментов ДО как продукционных показателей, поскольку регулируется в основном физиологическим состоянием планктона и бентоса, а также доступностью ОВ в качестве субстрата (Агатова, 2017).

Наличие связи между содержанием пигментов в воде и донных отложениях лежит в основе использования данных о пигментах ДО в оценке трофического состояния водных экосистем и его изменений (Krishnan et al., 2022; Raja, Rosell-Melé, 2022). В лагуне зависимость между содержанием Хл $a + \Phi$ в ДО и его концентрацией в единице объема воды достоверно не установлена. По-видимому, на содержание осадочных пигментов оказывали влияние интенсивный водообмен, препятствующий осаждению фитопланктона; хороший прогрев, стимулирующий деструкцию ОВ в толще воды; выедание водорослей зоопланктоном (Guimaraes-Bermejo et al., 2018; Мотылькова, Коновалова, 2021). Вместе с тем, отмечена положительная связь между содержанием пигментов в столбе воды ($\text{мг}/\text{м}^2$) и сухом осадке, а также ДО с натуральной влажностью. Показано, что количественное соотношение между показателями продуктивности фитопланктона в воде и ДО лагуны Буссе сопоставимо со среднегодовой скоростью осадконакопления, что объясняется вкладом растительной взвеси в формирование отложений. Отклонения значений соотношения между концентрациями пигментов на станциях от их среднего значения в лагуне обусловлены различием факторов формирования трофических условий на отдельных участках. Результаты исследований согласуются с полученными ранее данными на пресноводных волжских водоемах, для которых был предложен примененный в настоящей работе способ расчета соотношения пигментов (Сигарева, 2010, 2012). Следовательно, для разнотипных водоемов (пресноводных и морских) характерны общие количественные связи между продукционными и деструкционными процессами, что позволяет использовать соотношение пигментов в воде и ДО в качестве показателя продуктивности в настоящем и будущем.

Основной фактор, влияющий на продуктивность лагуны — биотический: в воде — это продукция, в грунтах — деструкция ОВ. Гидрохими-

ческий, гидрологический и геоморфологический факторы оказывали меньшее влияние на формирование трофических условий в лагуне летом. Доминирующее влияние биотического фактора на изменчивость показателей продуктивности в летний период отмечали и ранее для лагуны Буссе (Коренева и др., 2021) и зал. Анива (Коренева, Сигарева, 2019).

Содержание хлорофилла в воде характеризует трофические условия в лагуне Буссе, сложившиеся в аномально теплом июле 2021 г. По среднему содержанию Хл $a + \Phi$ в воде ($4.1 \pm 0.8 \text{ мкг}/\text{дм}^3$) лагуна — мезотрофный водоем (Carlson, 1977; Китаев, 1984). Отдельные участки в прибрежье (станции 15–18) и оз. Выселковое (ст. 12) имеют эвтрофный статус ($12.1\text{--}16.0 \text{ мкг}/\text{дм}^3$), что обусловлено активным развитием водорослей в приустьевых водах с повышенным за счет влияния речного стока содержанием биогенных элементов. Высокую продуктивность фитопланктона в мелководье летом наблюдали и ранее (Мотылькова, Коновалова, 2021). Количество Хл $a + \Phi$ в ДО отражает продукционные свойства экосистемы водоема за более длительный период функционирования. Согласно средней концентрации Хл $a + \Phi$ в ДО ($13.5 \pm 4.0 \text{ мкг}/\text{г с.о.}$ или $0.41 \pm 0.10 \text{ мг}/\text{г ОВ}$), лагуна Буссе — тоже мезотрофный водоем (Möller, Scharf, 1986). Особенности распределения пигментов в бентали лагуны обуславливают различия оценок биологической продуктивности ее отдельных участков. Так, по содержанию Хл $a + \Phi$ в ДО прибрежье ($0.22\text{--}11.06 \text{ мкг}/\text{г с.о.}$ или $0.03\text{--}0.58 \text{ мг}/\text{г ОВ}$) имеет олиготрофный статус, центральный район ($14.8\text{--}56.1 \text{ мкг}/\text{г с.о.}$ или $0.96\text{--}1.35 \text{ мг}/\text{г ОВ}$) — мезотрофный. Эвтрофное состояние характерно для глубоководного участка (ст. 24) в центре лагуны с концентрацией Хл $a + \Phi$ $64.80 \text{ мкг}/\text{г с.о.}$ или $1.09 \text{ мг}/\text{г ОВ}$. Трофический статус мелководной лагуны Буссе соответствует категории трофии в прежние годы, хотя средняя концентрация Хл $a + \Phi$ в ДО в июле 2021 г. была меньше, чем в июле 2013 г. ($21.4 \pm 5.6 \text{ мкг}/\text{г с.о.}$) (Коренева и др., 2021). Трофность лагуны превышала таковую ближайшего более крупного морского водоема — зал. Анива (Кантаков и др., 2007). Вместе с тем, универсальная связь между содержанием осадочных пигментов и физико-химическими характеристиками ДО в водоемах с разным уровнем трофии сохраняется (Коренева, Сигарева, 2019; Сигарева и др., 2020; Коренева и др., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопряженные данные о содержании Хл $a + \Phi$ в воде и ДО лагуны Буссе позволили выявить закономерности их распределения на разнотипных

участках пелагиали и бентали в период сезонного минимума продуктивности фитопланктона. Несмотря на значительную вариабельность абиотических условий, между содержанием пигментов в воде и ДО установлена зависимость, отражающая роль фитопланктона в формировании продукционных свойств бентали. Величина соотношения пигментов в воде и ДО может быть использована при оценке состояния и динамики продуктивности водоема.

По среднему содержанию $Хл\ a + Ф$ в воде и ДО, лагуна Буссе — мезотрофный водоем. На отдельных участках трофическое состояние лагуны изменяется от олиготрофного (в прибрежных районах) до мезотрофного (в центральном районе). В статической глубоководной зоне и северо-восточном побережье выявлены станции с эвтрофным статусом. Трофическое состояние бентали лагуны с 2013 по 2021 гг. остается олиготрофным в мелководном побережье и мезотрофным в центре лагуны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.Е. Марыхину за помощь в проведении экспедиционных работ и Д.М. Ложкину (Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии) за предоставление данных по температуре воды в лагуне Буссе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Сахалинским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии и Институтом биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, а также по темам государственного задания (№ 076-00001-24-00 и № 124032100076-2).

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Автор Т.Г. Коренева: разработка цели и постановка задач исследования; анализ результатов исследования и подготовка данных; написание текста статьи.

Автор Л.Е. Сигарева: генерация идеи исследования; проведение научного консультирования; участие в обсуждении результатов.

Автор И.В. Сырбу: отбор проб, подготовка и спектрофотометрическое исследование образцов, расчет результатов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агапова А.И. 2017. Органическое вещество в морях России. М.: ВНИРО.
- Бровко П.Ф., Микишин Ю.А., Рыбаков В.Ф. и др. 2002. Лагуны Сахалина. Владивосток: ДВГУ.
- Винберг Г.Г. 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Гольдин Е.Б. 2013. Биологическая активность микроводорослей и ее значение в межвидовых взаимоотношениях // Экосистемы, их оптимизация и охрана. Симферополь: ТНУ. Вып. 9. С. 49.
- Евсеева Н.В. 2016. Современное состояние ресурсов анфельдии тобучинской Сахалино-Курильского региона и перспективы их рационального использования // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Матер. VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Петропавловск-Камчатский, 22–24 марта 2016 г.). С. 85.
- Ефанов В.Н., Тепаева А.Е. 2014. Сезонное развитие и количественные показатели фитопланктона лагуны Буссе // Перспективы науки. № 11(62). С. 22.
- Ефанов В.Н., Выпряхкин Е.Н., Латковская Е.М. 2013. Современное состояние донных отложений лагуны Буссе (залив Анива) // Наука и бизнес: пути развития. № 11(41). С. 31.
- Ефанов В.Н., Выпряхкин Е.Н., Латковская Е.М., Пономарева О.С. 2014. Гидрохимическая характеристика и видовой состав организмов спата лагуны Буссе (залив Анива) в июне 2012 года // Инновации и инвестиции. № 12. С. 159.
- Задкова И.И., Малюшко Л.Д., Сарочан В.Ф. 1975. Геохимия лагуны Буссе на Сахалине. Новосибирск: Наука.
- Калганова Т.Н. 1993. Питание приморского гребешка и использование им кормовой базы в лагуне Буссе (о. Сахалин) // Влияние антропогенных факторов на структуру и функционирование экосистем и их отдельные компоненты: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МПУ. С. 71.
- Кантаков Г.А., Стоник И.В., Селина М.С., Орлова Т.Ю. 2007. Адвекция, вертикальная устойчивость вод и особенности пространственно-временного распределения фитопланктона в заливе Анива Охотского моря в 2001–2003 гг. // Тр. СахНИРО. Т. 9. С. 295.
- Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск. КарНЦ РАН. 395 с.
- Коренева Т.Г., Латковская Е.М. 2013. Характеристика изменчивости вод залива Анива по содержанию пигментов фитопланктона // Вода: химия и экология № 10. С. 68. <https://elibrary.ru/rovykld>
- Коренева Т.Г., Сигарева Л.Е. 2019. Распределение хлорофилла *a* в донных отложениях залива Анива (Охотское море) // Биология моря. Т. 45. № 5. С. 299.
- Коренева Т.Г., Сигарева Л.Е., Латковская Е.М. 2021. Содержание хлорофилла *a* в донных отложениях

- мелководной лагуны Буссе (остров Сахалин) // Биология моря. Т. 47. № 5. С. 339.
- Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я. 2010. Хлорофилл, гуминовые вещества и органический углерод в эстуарии реки Раздольная в период ледостава // Вестн. ДВО РАН. № 6. С. 44.
- Матишов Г.Г., Фуштей Т.В. 2003. К проблеме вредоносных “цветений воды” в Азовском море // Электронный журнал “Исследовано в России”. С. 213.
<http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2003/022.pdf>
- Мотылькова И.В., Коновалова Н.В. 2021. Состав и структура фитопланктона лагуны Буссе (юго-восточный Сахалин) // Биология моря. Т. 27. № 5. С. 301.
- Сигарева Л.Е. 2010. Содержание хлорофилла в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 3. С. 38.
- Сигарева Л.Е. 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водохранилищ. М.: Тов-во науч. изданий КМК. 217 с.
- Сигарева Л.Е., Коренева Т.Г., Минеева Н.М., Тимофеева Н.А. 2020. Сравнительный анализ содержания хлорофилла а в пресноводном и морском водоемах // Биология внутр. вод. № 5. С. 439.
- Тепалева А.Е., Калганова Т.Н. 2012. Развитие фитопланктона в лагуне Буссе летом 2011 года // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 1. С. 104.
- Хлебович В.В. 1989. Критическая соленость и хлорофиллин: современный анализ понятий // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. Т. 189. С. 5.
- Шпилько Т.С., Шевченко Г.В. 2018. Влияние приливо-отливной динамики на обмен меропланктона (Bivalvia, Gastropoda) между лагуной Буссе и прилегающей морской акваторией залива Анива // Изв. ТИНРО. Т. 195. С. 92.
<https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-195-92-110>
- Cadier M., Sourisseau M., Gorgues T. et al. 2017. Assessing spatial and temporal variability of phytoplankton communities' composition in the Iroise Sea ecosystem (Brittany, France): A 3D modeling approach: Part 2: Linking summer mesoscale distribution of phenotypic diversity to hydrodynamism // J. Mar. Systems. V. 169. P. 111.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.01.004>
- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes // Limnol., Oceanogr. V. 22. № 2. P. 361.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Faust M., Larsen J., Moestrup Ø. 1999. Potentially toxic phytoplankton (3) Prorocentrum (Dinophyceae) // ICES Identification Leaflets for Plankton. № 184. P. 2.
<https://doi.org/10.17895/ices.pub.5164>
- Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. et al. 2021. On the parameterization of phytoplankton primary production in water ecosystem models // J. of Physics: Conference Series 2131 (3): 032079.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032079>
- Guimaraes-Bermejo M.O., Merino-Ibarra M., Valdespino-Castillo P.M. et al. 2018. Metabolism in a deep hypertrophic aquatic ecosystem with high water-level fluctuations: a decade of records confirms sustained net heterotrophy // PeerJ6: e5205.
<https://doi.org/10.7717/peerj.5205>
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanz. V. 167. № 2. P. 191.
[https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
- Krishnan S., Patil J.S., Anil A.C. 2022. Benthic-pelagic coupling assessed using phytoplankton marker pigments: a case study from the Paradip port, East Coast of India // Environ. Sci. and Pollut. Res. V. 29. P. 27761.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17458-7>
- Lorenzen C.J. 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnol., Oceanogr. V. 12. № 2. P. 343.
<https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>
- Linghan Z., Swann G.E.A., Leng M.J. et al. 2023. Ecosystem deterioration in the middle Yangtze floodplain lakes over the last two centuries: Evidence from sedimentary pigments // Quaternary Science Reviews. V. 302. P. 107954.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.107954>
- Möller W.A.A., Scharf B.W. 1986. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // Hydrobiologia. V. 143. № 1. P. 327.
<https://doi.org/10.1007/BF00026678>
- Raja M., Rosell-Melé A. 2022. Quantitative link between sedimentary chlorin and sea-surface Chlorophyll-a // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. V. 127(5).
<https://doi.org/10.1029/2021JG006514>
- Reavie E.D., Edlund M.B., Andresen N.A. et al. 2017. Paleolimnology of the lake of the woods southern basin: continued water quality degradation despite lower nutrient influx // Lake and Reservoir Manage. V. 33. № 4. P. 369.
<https://doi.org/10.1080/10402381.2017.1312648>

Chlorophyll in Water and Bottom Sediments as an Indicator of the Trophic State of Busse Lagoon (Sakhalin Island)

T. G. Koreneva¹, L. E. Sigareva², I. V. Syrbu¹

¹*Sakhalin Branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

²*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

*e-mail: t.koreneva@sakhniro.ru

New associated data on the content of chlorophyll *a* and its derivatives in the water and bottom sediments of Busse Lagoon (Sakhalin Island) have been obtained. Chlorophyll *a* and chlorophyll degradation products (Chl *a* + Ph) in the water column is represented predominantly by the active form ($61.4 \pm 1.1\%$), in bottom sediments – by a product of its degradation ($84.7 \pm 2.5\%$). The connection between pigments in water and bottom sediments, as well as the abiotic conditions of primary production, has been revealed. For the first time, for a unique reservoir characterized by overgrowth of aquatic vegetation, silt accumulation and regular death of aquatic organisms, the similarity of the average annual sedimentation rate in the lagoon with the ratio of pelagic and benthic pigments was shown. The prevailing importance of the biotic factor in the formation of trophic conditions has been established. Based on the average content of Chl *a* + Ph in water (4.1 ± 0.8 mg/dm³) and in bottom sediments (13.5 ± 4.0 µg/g d.s.), Busse Lagoon is a mesotrophic reservoir. Trophic state of benthic in the period 2013–2021 is preserved, remaining oligotrophic in the shallow coastal zone and mesotrophic in the central part of the lagoon.

Keywords: Busse Lagoon, chlorophyll, water, bottom sediments, trophic state