

УДК 556.555.6:581.132.1

СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА *A* В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МЕЛКОВОДНОЙ ЛАГУНЫ БУССЕ (ОСТРОВ САХАЛИН)

© 2021 г. Т. Г. Коренева^{1, *}, Л. Е. Сигарева^{2, **}, Е. М. Латковская¹

¹Сахалинский филиал ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск 693023, Россия

²Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок 152742, Россия

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

**e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 16.10.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Представлены первые результаты определения содержания хлорофилла *a* и продуктов его разрушения в донных отложениях лагуны Буссе (о-в Сахалин) на прибрежных и центральных участках разного типа. Установлена связь между содержанием осадочных пигментов и физико-химическими свойствами донных отложений. Трофическое состояние разнотипных по осадочным пигментам участков бентали в лагуне изменяется от олиго- до эвтрофного. Для побережья среднее содержание хлорофилла *a* с феопигментами относится к олиготрофной категории, для центральной части – к мезотрофной. Концентрация хлорофилла с дериватами характеризуется снижением средних значений с 21.4 ± 5.6 мкг/г сухого осадка летом до 6.1 ± 1.9 мкг/г осенью и в целом для лагуны составляет 16.3 ± 4.4 мкг/г. Сезонная динамика осадочных пигментов не согласуется с таковой для фитопланктона и в значительной мере может определяться гидродинамической активностью. При сравнительно низком содержании осадочных пигментов для лагуны характерны регулярная гибель гидробионтов и илонакопление – признаки терминального этапа олиготрофно-эвтрофной сукцессии экосистемы.

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

DOI: 10.31857/S0134347521050077

Информация о растительных пигментах широко используется для оценки биомассы и выделения доминирующих отделов фитопланктона, а также для характеристики экологического состояния, продуктивности и трофического статуса как морских, так и пресноводных экосистем (Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977; Bianchi et al., 2002; Szymczak-Żyła et al., 2011; Мордасова, 2014; Krajewska et al., 2017). Большинство гидробиологических работ, связанных с изучением растительных пигментов, выполнено на фитопланктоне, однако в настоящее время повышается интерес к пигментам в донных отложениях (ДО) как системным экологическим показателям (Szymczak-Żyła et al., 2017; Тимофеева и др., 2018; Сигарева и др., 2019; Vuchasa et al., 2019). Результаты исследований осадочных пигментов часто используются при изучении эволюции водных экосистем. Однако терминальную стадию развития экосистем рассматривают, как правило, на примере небольших пресноводных озер, а морские водоемы фактически не изучены (Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Naeher et al., 2016; Reavie et al., 2017).

Лагуна Буссе – памятник природы и особо охраняемая акватория регионального значения Сахалинской области; используется для рекреации, промысла уникальных видов гидробионтов и развития марикультуры (Бровко и др., 2002; Чернышова, Прохорова, 2018). Для лагуны характерны заиливание и регулярная массовая гибель водных организмов (Калганова, 1993; Тепаева, Калганова, 2012). Эти события можно рассматривать как признаки последней стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии экосистемы. Уникальное сочетание характеристик мелководной лагуны с географическими (защищенность от волнового воздействия открытого моря, постоянная связь с основным водоемом и сушей) и климатическими (более мягкий климат, чем на острове) факторами продуктивности объясняет не только практический, но и теоретический интерес к этому водоему.

Цель настоящей работы – изучить трофическое состояние бентали лагуны Буссе по содержанию хлорофилла *a* и феопигментов в ДО, а также выявить причины варьирования трофии разно-

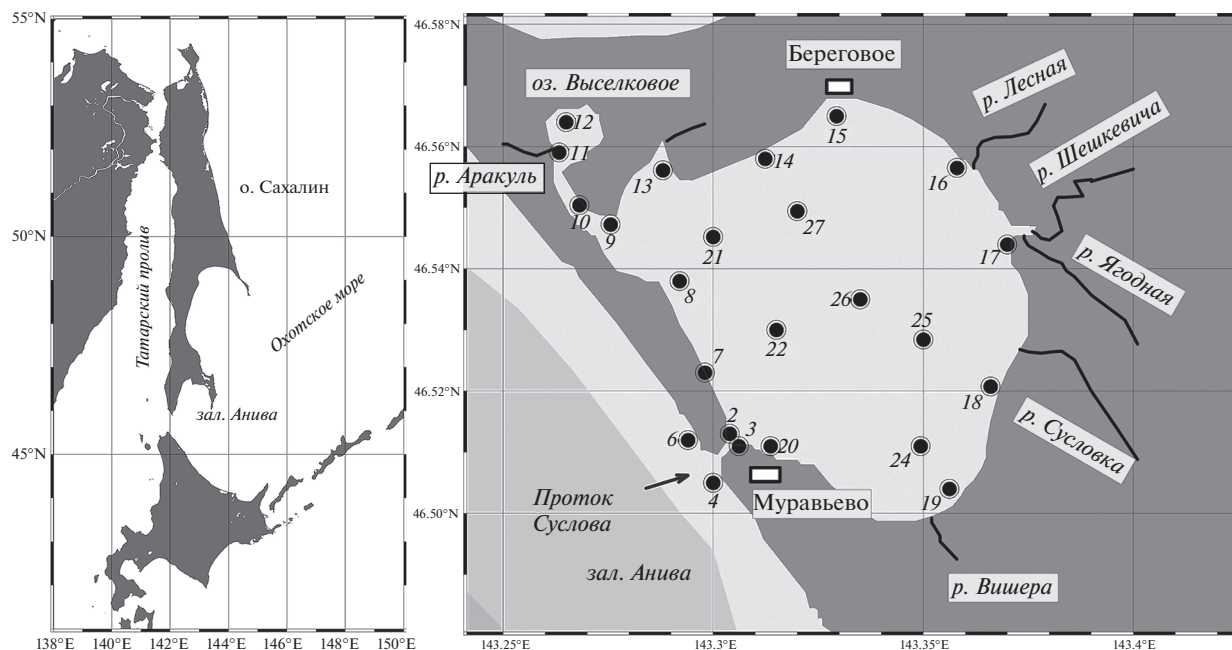


Рис. 1. Схема расположения станций в лагуне Буссе в 2013 г.

типных участков этого мелководного морского водоема.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Лагуна Буссе – морской водоем, расположенный на западном побережье Тонино-Анивского полуострова о-ва Сахалин ($46^{\circ}35' \text{ N}$, $143^{\circ}18' \text{ E}$; $46^{\circ}30' \text{ N}$, $143^{\circ}23' \text{ E}$) и сообщаемый с зал. Анива (Охотское море) через узкий прол. Суслова. Морфология береговой зоны и дна лагуны представлена абразионно-аккумулятивными равнинами с признаками ледового воздействия (Задкова и др., 1975). В лагуну впадают не менее десяти дренирующих заболоченные лесные почвы ручьев и рек, береговые обрывы и дно которых сформированы песчаником, алевролитами и аргиллитами (Тарасевич, 1970). Наибольшую площадь дна лагуны (43%) занимают пески с диаметром частиц от 1 до 0.1 мм; грубообломочные отложения (>1 мм), представленные галечником и гравием, составляют 26%, тонкозернистые осадки (алевриты и пелиты, <0.1 мм) – 31% (Ефанов и др., 2013). Для вод лагуны характерна высокая соленость (26–31‰) за счет интенсивного водообмена с морем (Бровко, 1990; Бровко и др., 2002).

Фитопланктон лагуны формируется морскими (50–63%), пресноводными (до 20%) и пресноводно-солонатоводными (до 15%) видами. Наблюдается значительное сезонное изменение видового состава и количественных характеристик фитопланктона (Ефанов, Калганова, 2014; Ефанов, Тепаева, 2014). По биомассе фитопланктона

лагуна относится к олиготрофным водоемам (Дмитриев и др., 1997).

Массовый продуцент среди макрофитов – красная морская водоросль анфельция тобучинская (Огородников, Сергеенко, 2001), известный источник агар-агара. Отмечено снижение общей площади полей и средней биомассы анфельции; в 1999–2012 гг. фитомасса водорослей сократилась с 31.8 до 26.3 тыс. тонн сырого сырья (Балконская, Чумаков, 2002; Евсеева, 2016). На зарослях анфельции в виде эпифитов часто встречаются бурые водоросли, преимущественно ламинариевые. Вдоль берега поля анфельции окаймлены морскими травами. В местах впадения рек доминируют рдесты и zostera. Большая часть побережья занята огромными скоплениями отмершей водной растительности (Фурсенко, Фурсенко, 1970).

Пробы воды и донных отложений отбирали в июле и ноябре 2013 г. Станции отбора проб располагались в следующих районах: I – проток Суслова, II – зал. Анива, III – западный прибрежный район, IV – оз. Выселковое, V – северный прибрежный район, VI – восточный прибрежный район, VII – южный прибрежный район и VIII – центральный район. Летом станции охватывали всю акваторию лагуны (22 станции), осенью – лишь прибрежные районы (16 станций) (рис. 1, табл. 1).

В придонном слое на каждой станции рН-метром-иономером MA130 фирмы “Mettler Toledo” измеряли температуру (Т) и водородный показатель (рН); соленость (S) измеряли с помощью

Таблица 1. Расположение и некоторые характеристики станций в лагуне Буссе (2013 г.)

Номер района	Район	Станция	Глубина, м	Тип донных отложений
I	Проток Сулова	2	0.5	Песок гравелистый
		3	0.5	Песок крупный
II	Зал. Анива	4	0.5	Гравийный
		6	0.5	Песок гравелистый
III	Западный прибрежный район	7	0.5	Песок гравелистый
		8	0.5	Песок средней крупности
		9	0.5	Песок мелкий
		10	0.5	Песок средней крупности
IV	Оз. Выселковое	11	0.5	Песок гравелистый
		12	0.5	Песок мелкий
V	Северный прибрежный район	13	0.5	Песок мелкий
		14	0.5	Песчано-алевритовый ил
		15(1)	0.5	Песчано-алевритовый ил
VI	Восточный прибрежный район	15(2)	0.5	Песок крупный
		16	0.5	Песок гравелистый
		17	0.5	Песок мелкий
VII	Южный прибрежный район	18	0.5	Песок пылеватый
		19	0.5	Песок пылеватый
		20	0.5	Песчано-алевритовый ил
VIII	Центральный район	21	0.5	Мелкоалевритовый ил
		22	5.7	Мелкоалевритовый ил
		24	5.7	Мелкоалевритовый ил
		25	3.7	Мелкоалевритовый ил
		26	4.6	Песчано-алевритовый ил
		27	5.3	Песчано-алевритовый ил

портативной системы YSI-63 фирмы “YSI incorporated”. Процент насыщения воды кислородом рассчитывали после определения его концентрации методом Винклера (Объемная концентрация..., 2010).

Донные осадки отбирали из верхнего 5-сантиметрового слоя дночерпателем Ван-Вина (площадь захвата 0.025 м²). Воду сливали, пробы упаковывали в полиэтиленовые пакеты и хранили не более месяца при температуре –20°С. Перед анализом пробы размораживали. Экстракты готовили в соответствии с традиционной процедурой. Оптическую плотность ацетоновых экстрактов измеряли спектрофотометрическим методом (Коренева, Сигарева, 2019). Концентрации хлорофилла *a* (Хл) и феопигментов (Ф) рассчитывали по формулам Лоренцена (Lorenzen, 1967) в микрограммах на 1 г сухой массы образца (мкг/г сухой осадка) и миллиграммах на 1 г органического вещества (мг/г ОВ).

Влажность ДО определяли по разнице между массой навесок до и после высушивания при тем-

пературе 105°С. Содержание ОВ измеряли фотометрическим методом (ГОСТ 26213-91, 1991), предварительно промывая образцы дистиллированной водой для удаления хлоридов. Тип ДО устанавливали по размеру фракций: от 10 до 1 мм – галечник и гравий, от 1 до 0.1 мм – пески, от 0.1 до 0.005 мм – алевриты и пелиты (ГОСТ 25100-2011, 2013).

Трофический статус бентали оценивали по концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (Хл + Ф, мкг/г сухого осадка) (Möller, Scharf, 1986). Для статистического анализа использовали прикладные программы Excel и Statistica. Наличие связи между пигментами, биотическими и абиотическими характеристиками воды и ДО определяли с помощью корреляционного анализа (r-Pearson). Многофакторный дисперсионный анализ корреляционной матрицы по методу главных компонент с варимакс-вращением применяли для выявления факторов, отвечающих за наличие связей между изученными показателями (Лакин, 1990; Мазуркин, Тойшева, 2010).

Таблица 2. Абиотические условия в придонном слое воды лагуны Буссе в 2013 г.

Показатель	Центральный район	Прибрежные районы		Cv, %	
	июль	июль	ноябрь	июль	ноябрь
Температура, °C	19.2–21.7	16.2–28.7	5.1–10.0	15	18
	20.4 ± 0.4	22.3 ± 0.9	7.9 ± 0.4		
Соленость, ‰	30.6–32.3	0.6–32.4	0.0–30.1	34	58
	31.6 ± 0.3	25.6 ± 2.6	20.3 ± 3.9		
рН, ед.	7.72–7.87	7.43–8.51	7.23–8.49	3	4
	7.81 ± 0.02	8.11 ± 0.07	8.05 ± 0.08		
Растворенный кислород, мг/дм ³	6.74–8.30	7.68–13.77	8.86–13.10	22	10
	7.49 ± 0.21	9.94 ± 0.50	10.67 ± 0.28		
Растворенный кислород, % насыщения	91.3–110.1	91.7–198.8	82.8–118.7	25	9
	100.2 ± 2.8	133.7 ± 8.1	102.3 ± 2.2		

Примечание. Здесь и в табл. 3: в числителе – диапазоны, в знаменателе – среднее значение с ошибкой среднего; Cv – коэффициент вариации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Абиотические условия летом и осенью 2013 г. в лагуне Буссе существенно различались. Температура и соленость в июле были выше, чем в ноябре (табл. 2). Реакция среды (рН) изменялась в слабощелочной области, отражая способность растительных организмов к фотосинтезу. Процентное содержание растворенного кислорода в воде в июле также было выше и изменялось сильнее (Cv = 25%), чем в ноябре (Cv = 9%). Экстремально высокие значения показателя насыщения (174–199%) отмечены летом в северном побережье.

Исследованные образцы ДО типичны для грунтового комплекса лагуны Буссе (табл. 1). Отложения в прибрежных районах были представлены преимущественно песками (рис. 2в): на станциях 13–17 – мелкими, а на станциях 7–10 и 18–20 – крупными и средними с включением гальки и гравия. В осадках повсеместно присутствовали илестые частицы, а также большое количество пустых раковин моллюсков. В центральном районе лагуны (станции 21–23, 25, 27 и 28) преобладали алевроито-пелитовые отложения в виде черных илов с резким запахом сероводорода.

Растительные пигменты в ДО были распределены неравномерно. Концентрация Хл + Ф изменялась от 0.2–70.2 мкг/г сухого осадка (0.03–3.9 мг/г ОВ) летом до 0.2–21.6 мкг/г сухого осадка (0.01–0.59 мг/г ОВ) осенью (табл. 3). Содержание Ф варьировало от 0.2–66.1 мкг/г сухого осадка в июле до 0.2–21.3 мкг/г в ноябре. Максимальное содержание пигментов отмечено в июле в песчано-алевритовых илах (станция 20) вблизи протоки и устья безымянного ручья (рис. 2а). Минимальной концентрация пигментов была в ноябре в отложениях гравелистого песка мелководной

станции 2 в протоке Сулова с активной гидродинамикой. Тесная связь между концентрациями Хл + Ф и Ф ($r = 0.95–0.97$, $p < 0.05$) отражает преимущественно фитопланктонное происхождение пигментов, а коэффициенты вариации их средних значений (Cv = 120–127%) позволяют говорить о сходном характере пространственного распределения. Средняя концентрация Хл + Ф в лагуне составляла 16.3 ± 4.4 мкг/г сухого осадка (0.59 ± 0.15 мг/г ОВ), а Ф – 13.4 ± 3.1 мкг/г. Основная доля (71–86%) от суммы Хл и Ф приходилась на продукты разрушения (табл. 3). В целом вклад феопигментов в афотических зонах морских и пресных водоемов, как правило, был выше, чем в эвфотических.

Пространственная изменчивость пигментов согласовывалась с динамикой содержания ОВ в ДО, а также, в меньшей степени, с влажностью и типом осадков (рис. 2). В алевроито-пелитовых ДО центральной части лагуны все рассмотренные показатели (за исключением Хл + Ф в ОВ) были в 2–3 раза выше, чем в грубообломочных и песчаных осадках прибрежных районов (рис. 3, табл. 3). Так, максимальные концентрации Хл + Ф (в среднем 31.8 ± 7.3 мкг/г) и Ф (25.2 ± 5.9 мкг/г) в южном побережье и в центре лагуны летом были приурочены к илам с высокими значениями влажности ($45.8 \pm 6.4\%$) и содержания ОВ ($3.4 \pm 0.7\%$) (рис. 3). Осенью повышенные средние концентрации Хл (13.8 ± 3.4 мкг/г) и Ф (11.6 ± 2.7 мкг/г) в оз. Выселковое (район IV) и в восточном побережье (VI) лагуны также были характерны для илестых осадков при влажности $19.1 \pm 3.7\%$ и содержании ОВ $2.8 \pm 0.5\%$. Минимальные концентрации Хл + Ф (0.22 ± 0.04 мкг/г) и Ф (0.20 ± 0.04 мкг/г) отмечены в крупнозернистых донных отложениях

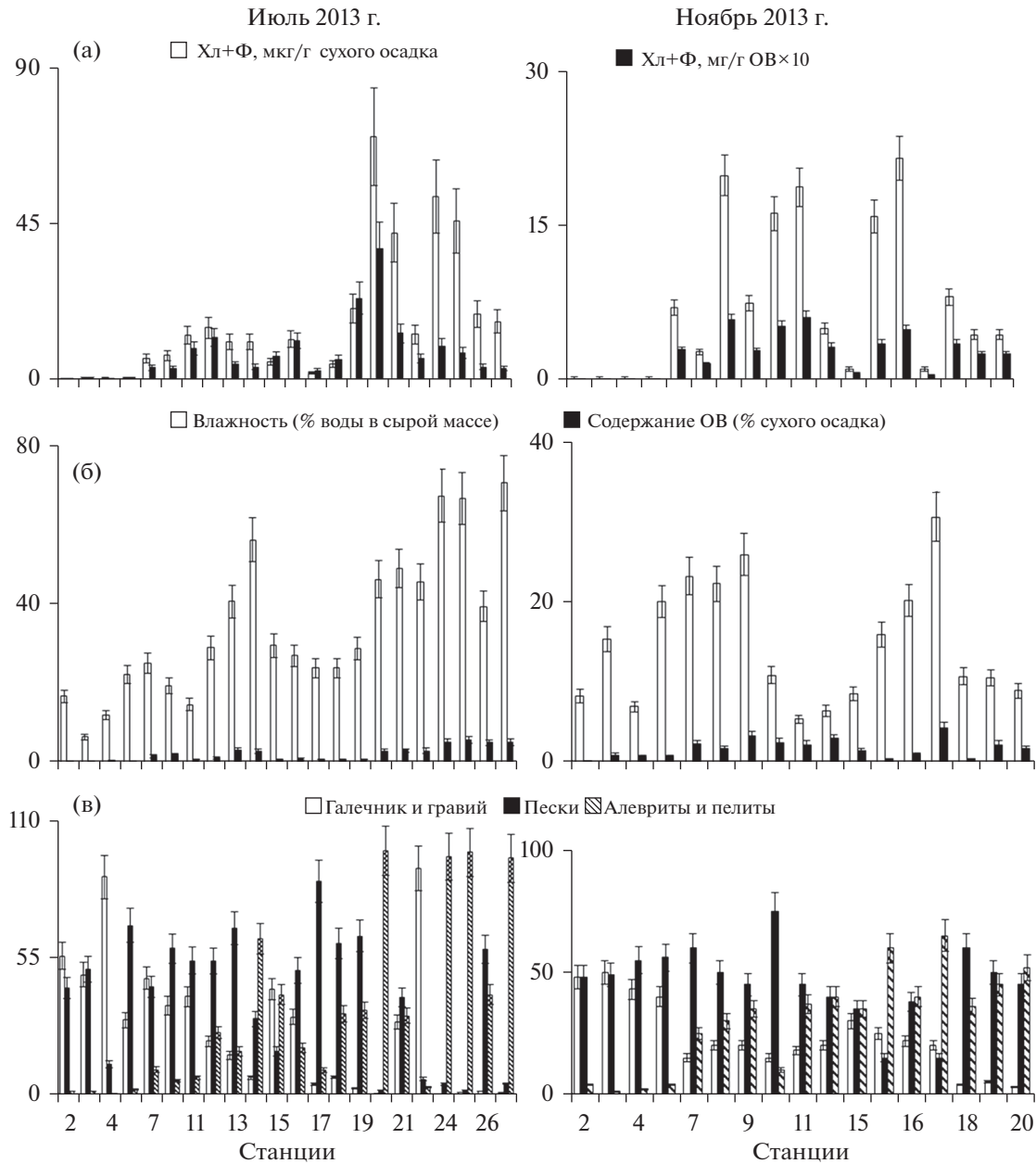


Рис. 2. Содержание осадочных пигментов (а), воды и ОВ (б) и размерных фракций (в) в донных отложениях лагуны Буссе на разных станциях (среднеарифметические значения по результатам трех параллельных измерений для каждого из параметров с абсолютными значениями погрешности при $P = 0.95$). По оси абсцисс – номера станций; по оси ординат: а – концентрация Хл + Ф; б – влажность и содержание ОВ; в – содержание размерных фракций, % сухого осадка.

ях протока Суслова (район I), а также в прибрежной зоне зал. Анива (район II) с пониженными значениями влажности ($13.5 \pm 3.2\%$) и содержания ОВ ($0.6 \pm 0.09\%$).

В целом высокие пигментные показатели были характерны для осадков оз. Выселковое, северного и южного побережья и центральной части лагуны (рис. 3а), т.е. для районов с незначительным варьированием всех абиотических показате-

лей. Пониженные концентрации растительных пигментов отмечены в мелководных районах с активной гидродинамикой, препятствующей накоплению и сохранению ОВ, – в западном и восточном побережье, а также в протоке Суслова и зал. Анива.

Характер корреляционной связи между содержанием пигментов и гранулометрическим составом ДО зависит от размера слагающих их частиц

Таблица 3. Содержание растительных пигментов и физико-химические характеристики донных отложений в лагуне Буссе в 2013 г.

Показатель	Центральный район	Прибрежные районы		Cv, %	
	июль	июль	ноябрь	июль	ноябрь
Хл + Ф, мкг/г сухого осадка	13.1–52.8	0.2–70.2	0.2–21.6	116	124
	31.7 ± 7.0	11.0 ± 4.2	6.1 ± 1.9		
Хл + Ф, мг/г ОВ	0.32–1.46	0.03–3.9	0.01–0.59	112	127
	0.74 ± 0.1	0.79 ± 0.25	0.23 ± 0.05		
Ф, мкг/г сухого осадка	8.8–50.1	0.2–66.1	0.2–21.3	129	125
	27.2 ± 6.7	7.8 ± 3.9	5.1 ± 1.7		
Ф, % от суммы Хл + Ф	67.5–94.9	42.2–94.1	54.9–100.0	22	19
	85.8 ± 4.1	71.2 ± 4.3	84.4 ± 4.0		
Влажность, %	20.3–70.5	6.6–56.2	6.5–30.6	59	49
	52.2 ± 8.1	26.4 ± 3.6	15.3 ± 1.9		
Содержание ОВ, %	2.1–5.8	0.4–3.7	0.2–4.4	84	70
	4.5 ± 0.6	1.3 ± 0.2	1.7 ± 0.3		

Таблица 4. Коэффициенты корреляции (г-Pearson) между концентрациями осадочных пигментов, а также биотическими и абиотическими показателями воды и донных отложений в лагуне Буссе в 2013 г.

Показатель	Хл + Ф, мкг/г сухого осадка		Ф, мкг/г сухого осадка	
	июль	ноябрь	июль	ноябрь
Глубина, м	+0.35	–	+0.44	–
Соленость, ‰	+0.19	–0.55	+0.27	–0.47
Влажность, %	+0.74	+0.38	+0.77	+0.32
Содержание ОВ, %	+0.67	+0.95	+0.64	+0.92
Хл + Ф, мг/г ОВ	+0.56	+0.97	+0.84	+0.84
Диаметр частиц, %:	10–1 мм	–0.43	–0.25	–0.44
	1–0.1 мм	–0.46	–0.11	–0.46
	0.1–0.005 мм	+0.76	+0.57	+0.57

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи ($p < 0.05$); “–” – связь отсутствует.

и отражает уменьшение концентрации пигментов в гравийно-галечниковых и песчаных осадках, а также ее увеличение в пелитах и алевритах (табл. 4). Влияние таких абиотических факторов, как температура, рН и концентрация растворенного кислорода, на содержание растительных пигментов в осадках не выявлено. Достаточно значимой (г соответственно -0.47 и -0.55 , $p < 0.05$) в ноябре была связь концентрации Хл + Ф и Ф с соленостью, что, вероятно, свидетельствует о сохранении пигментов в районах с несущественным влиянием морских вод.

Статистический анализ показал, что изменчивость изученных параметров в лагуне Буссе определяли несколько факторов: биотический (содержание Хл + Ф и Ф), гидролого-гидрохимический

(Т, рН, растворенный кислород), геоморфологический (влажность и гранулометрический состав ДО) и соленость. В июле наиболее значимым (40% от суммарной дисперсии) был биотический фактор, действие которого на пигментные характеристики максимально проявлялось на участках с зарослями макрофитов, в том числе анфельции (станции 19–21 и 24–25). Меньше влияли геоморфологический (19%), гидролого-гидрохимический факторы (16%), а также соленость (10%) (табл. 5). В ноябре изменчивость пигментных и типологических показателей ДО на участках с макрофитами (станции 9, 12 и 17) также определял биотический фактор (45%). Гидролого-гидрохимические факторы, в том числе соленость, как и летом, влияли на формирование осадочного комплекса пигментов в меньшей степени (16–20%).

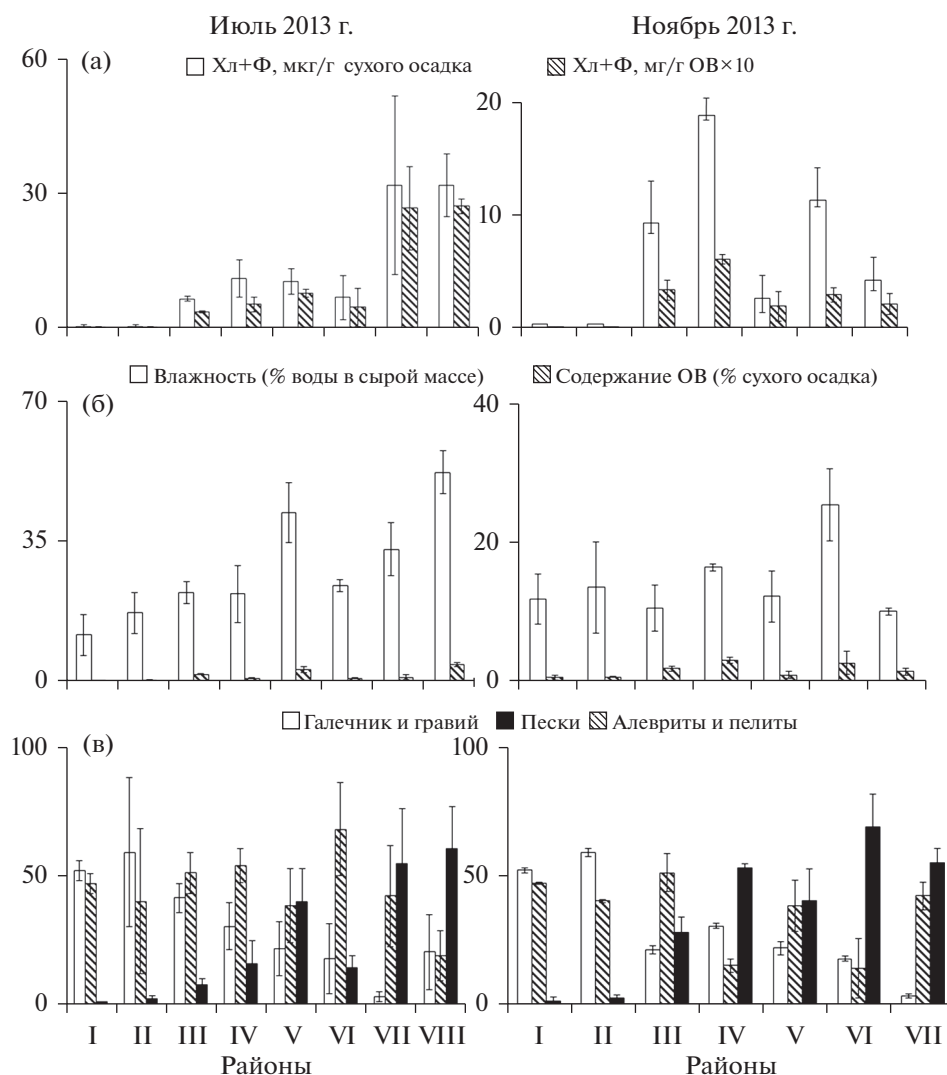


Рис. 3. Содержание осадочных пигментов и физико-химические характеристики донных отложений в лагуне Буссе по районам (среднеарифметические значения со стандартной ошибкой среднего, где n – количество станций в районе, как в табл. 1). По оси абсцисс – номера районов; по оси ординат: а – концентрация Хл + Ф; б – влажность и содержание органического вещества; в – содержание размерных фракций, % сухого осадка.

ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение и накопление растительных пигментов в ДО водоемов зависит от продукционных и деструкционных процессов, интенсивности первичной продукции ОВ, деградации пигментов в водной толще, от соотношения автохтонного и аллохтонного ОВ, скорости осадконакопления и других параметров гидродинамической активности (Leavitt, 1993; Сигарева, 2012). Корреляционный анализ показал, что концентрации Хл и Ф в лагуне Буссе достоверно связаны с характеристиками ДО (табл. 4), что согласуется с данными, полученными ранее для зал. Анива (Коренева, Сигарева, 2019). Тесная линейная зависимость между пигментами и концентрациями ОВ ($r = 0.64–0.95$) подтверждает индикаторную значимость осадоч-

ных пигментов как продукционных показателей лагуны, поскольку регулируется совокупностью условий, главные из которых – физиологическое состояние планктона и бентоса, а также доступность ОВ в качестве субстрата (Агатова, 2017). Влияние солености на изменчивость продукционных характеристик в лагуне Буссе, выявленное в результате статистического анализа (табл. 3, 4), свидетельствует о том, что содержание пигментов в ДО зависит не только от их концентрации в планктоне, но и от условий седиментации взвеси. Продукционные показатели планктонных водорослей в осенний период могут быть выше, чем летом и весной (Коновалова, 2016), однако гидрологические условия побережья, характеризующиеся усилением приливно-отливных течений и ветрового перемешивания водных масс в осен-

Таблица 5. Факторные нагрузки для изученных параметров воды и донных отложений лагуны Буссе в 2013 г.

Показатель	Июль				Ноябрь		
	факторы						
	биотический	гидро- гидрохимический	геоморфологический	соленость	биотический	гидро- гидрохимический	соленость
Температура, °С	-0.13	-0.70	0.48	-0.10	0.12	0.77	0.10
pH, ед.	-0.02	-0.90	-0.22	0.16	-0.24	0.59	0.44
Соленость, ‰	0.22	-0.27	-0.18	0.77	-0.53	0.08	0.74
Растворенный кислород, % насыщения	-0.09	-0.94	0.07	-0.04	-0.19	0.96	0.03
Влажность, %	0.50	0.04	0.71	0.39	0.44	0.25	0.68
Содержание ОВ, %	0.36	0.28	0.59	0.58	0.98	0.03	0.04
Хл + Ф, мкг/г сухого осадка	0.95	0.10	0.23	0.11	0.98	-0.16	-0.22
Хл + Ф, мг/г ОВ	0.87	-0.15	-0.02	-0.41	0.95	-0.06	-0.26
Ф, мкг/г сухого осадка	0.93	0.11	0.26	0.20	0.96	-0.21	0.00
Диаметр частиц, %:	10–1 мм	-0.31	0.06	-0.69	0.09	-0.35	0.02
	1–0.1 мм	-0.35	-0.02	-0.65	0.06	-0.33	-0.02
	0.1–0.005 мм	0.41	-0.05	0.87	-0.13	0.45	-0.08
Вклад фактора в суммарную дисперсию, %	40	16	19	10	45	20	16

Примечание. Значения получены путем многомерного факторного анализа корреляционной матрицы (для 13 переменных) по методу главных компонент (Principal components) с варимакс-вращением (Varimax raw). Жирным шрифтом выделены значимые нагрузки (при $p < 0.05$).

ний период (Ефанов и др., 2014), привели к резкому снижению концентрации пигментов на исследуемых участках в ноябре.

С гидрологических условиями формирования ДО и их продукционных свойств в лагуне Буссе связана также неоднородность пространственного распределения осадочных пигментов. Высокие пигментные показатели характерны для осадков из районов с незначительным варьированием всех абiotических показателей, что свидетельствует о низкой активности водных масс в этих частях лагуны (Задкова и др., 1975; Ефанов и др., 2014). В гидродинамически активном мелководном побережье содержание пигментов минимально.

Сравнение данных факторного анализа позволяет говорить о преобладающем влиянии биотического фактора на изменчивость продукционных характеристик в лагуне Буссе во все периоды, тогда как в зал. Анива – морском водоеме, связанном с лагуной, летом наиболее значимым был биотический фактор, а осенью – гидрологический (Коренева, Сигарева, 2019).

Особенности распределения пигментов в бенте лагуны Буссе обуславливают различия оце-

нок трофического статуса по содержанию пигментов в ДО. В июле по среднему уровню концентрации Хл + Ф в ДО (21.4 ± 5.6 мкг/г сухого осадка или 0.77 ± 0.21 мг/г ОВ) лагуна Буссе в целом попадает в разряд мезотрофных водоемов, при этом прибрежные районы – олиготрофные, а центральный район – мезотрофный (Möller, Scharf, 1986). Эвтрофное состояние характерно для участка, расположенного в зоне влияния морских и пресных поверхностных вод (станция 20), с концентрацией Хл + Ф, равной 70.2 мкг/г сухого осадка (3.79 мг/г ОВ). Осенью, как и летом, содержание Хл + Ф в ДО (6.1 ± 1.9 мкг/г сухого осадка или 0.23 ± 0.05 мг/г ОВ) характеризует прибрежные районы в лагуне Буссе как олиготрофные участки.

В мелководной лагуне Буссе концентрация Хл + Ф (0.2 – 70.2 мкг/г, среднее 16.3 ± 4.4 мкг/г сухого осадка) в ДО выше, чем содержание осадочных пигментов в более глубоких морских водоемах – в зал. Анива Охотского моря (1.9 – 19.5 мкг/г, среднее 6.5 ± 0.7 мкг/г сухого осадка) (Коренева, Сигарева, 2019) и в Амурском заливе Японского моря (3.0 – 10.0 мкг/г) (Марьяш и др., 2010). Однако концентрация Хл + Ф в ДО лагуны существенно меньше, чем в мелководном пресноводном оз.

Неро (Ярославская область), в котором средняя концентрация осадочных пигментов (Хл + Ф) достигает 300 мкг/г сухого осадка (Сигарева и др., 2019). При сравнении содержания осадочных пигментов в лагуне, расположенной в области умеренно-муссонного климата, в водоемах муссонной области Вьетнама и европейской части России обнаружены аналогичные закономерности распределения и характер связей с типологическими свойствами осадков, несмотря на то, что основные факторы продуктивности (температурный и световой режимы) заметно различались (Сигарева, 2012; Тимофеева и др., 2018). Известно, что показатели продуктивности фитопланктона в лагуне ниже, чем в ближайшем более крупном морском водоеме зал. Анива (Кантаков и др., 2007), и существенно ниже, чем в пресноводном оз. Неро (Бабаназарова и др., 2018). Однако и в морских, и в пресных водоемах с разным уровнем трофии сохраняется универсальная связь содержания осадочных пигментов с физико-химическими характеристиками ДО (Коренева, Сигарева, 2019; Сигарева и др., 2019). Следовательно, концентрации пигментов в ДО разнотипных по трофии водоемах (морской и пресноводный) обусловлены прежде всего взаимодействием гидрологических факторов с продуктивностью фитопланктона. Несмотря на разный уровень трофии, в обоих озеровидных водоемах отмечены признаки терминального этапа эволюции экосистемы — регулярная гибель гидробионтов и илонакопление (Тепалева, Калганова, 2012; Бабаназарова и др., 2018). Очевидно, признаки “умирания” экосистем могут проявляться при разном уровне продуктивности фитопланктона и разном содержании пигментов в ДО. Возраст превращения водных экосистем (гипертрофного пресноводного озера и мезотрофной морской лагуны), например, в болота (или другие природные объекты) будет зависеть от всего комплекса биотических и абиотических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты дополняют сведения о содержании и закономерностях распределения осадочных пигментов в морских водоемах, расположенных в районе умеренно-муссонного климата. Концентрации растительных пигментов в мелководной лагуне Буссе изменяются в зависимости от типа ДО и их физико-химических характеристик, отражая влияние растительных организмов на формирование структуры осадочного комплекса. Содержание пигментов минимально в гидродинамически активном мелководном прибрежье и максимально в статической глубоководной зоне центральной части лагуны. Неоднородное пространственное распределение осадочных пигментов связано с различиями условий форми-

рования ДО и продуцирования ОВ. Трофическое состояние лагуны Буссе, оцененное по средним концентрациям пигментов в ДО, изменяется от олиготрофного (в прибрежных районах) до мезотрофного (в центральной части).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между ФГБНУ “СахНИРО” и ИБВВ им. И.Д. Папанова РАН, а также по темам государственного контракта (№ 34-01/2013) и государственного задания (№ НИОКТР 121051100099-5).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам Лаборатории исследований среды и мониторинга антропогенного воздействия Сахалинского филиала ФГБНУ ВНИРО (СахНИРО) за помощь в выполнении экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агатова А.И. Органическое вещество в морях России. М.: Изд-во ВНИРО. 2017. 260 с.
- Бабаназарова О.В., Сиделев С.И., Жданова С.М. и др. Уровень воды в мелководном высокоэвтрофном озере — фактор развития по макрофитовому или фитопланктонному типу (оз. Неро, Ярославская область) // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 645—655.
- Балконская Л.А., Чумаков А.А. Современное состояние полей *Ahnfeltia tobuchiensis* (Kannoet Matsub.) Makijenko и запасы ее фитомассы в лагуне Буссе (остров Сахалин) // Растит. ресурсы. 2002. Т. 38. № 1. С. 34—43.
- Бровко П.Ф. Развитие прибрежных лагун. Владивосток: Изд-во ДВГУ. 1990. 148 с.
- Бровко П.Ф., Микишин Ю.А., Рыбаков В.Ф. и др. Лагуны Сахалина. Владивосток: ДВГУ. 2002. 80 с.
- ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов. 1991. 7 с.
- ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ. 2013. 46 с.
- Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Третьяков В.Ю., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофиче-

- ский статус водных экосистем // Вестн. СПбГУ. 1997. Сер. 7. Вып. 1. № 7. С. 51–67.
- Евсеева Н.В.* Современное состояние ресурсов анфельдии тобучинской Сахалино-Курильского региона и перспективы их рационального использования // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы VII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием (Петропавловск-Камчатский, 22–24 марта 2016 г.). 2016. С. 85–88.
- Ефанов В.Н., Выпряхкин Е.Н., Латковская Е.М.* Современное состояние донных отложений лагуны Буссе (залив Анива) // Наука и бизнес: пути развития. 2013. № 11(41). С. 31–37.
- Ефанов В.Н., Выпряхкин Е.Н., Латковская Е.М.* Гидрохимическая характеристика и видовой состав организмов спата лагуны Буссе (залив Анива) в июне 2012 года // Инновации и инвестиции. 2014. № 12. С. 159–163.
- Ефанов В.Н., Калганова Т.Н.* О микро- и нанопланктоне лагуны Буссе (залив Анива) // Глобальный науч. потенциал. 2014. № 11(44). С. 27–30.
- Ефанов В.Н., Тепаева А.Е.* Сезонное развитие и количественные показатели фитопланктона лагуны Буссе // Перспективы науки. 2014. № 11(62). С. 22–30.
- Задкова И.И., Малюшко Л.Д., Сарочан В.Ф.* Геохимия лагуны Буссе на Сахалине. Новосибирск: Наука. 1975. 90 с.
- Калганова Т.Н.* 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: Межуз. сб. науч. тр. М.: МПУ. 1993. С. 71–75.
- Кантаков Г.А., Стоник И.В., Селина М.С., Орлова Т.Ю.* Адвекция, вертикальная устойчивость вод и особенности пространственно-временного распределения фитопланктона в заливе Анива Охотского моря в 2001–2003 гг. // Тр. СахНИРО. 2007. Т. 9. С. 295–324.
- Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И.* Первичная продукция // Океанология. Биология океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука. 1977. С. 183–209.
- Коновалова Н.В.* Современное состояние фитопланктона лагуны Буссе (о. Сахалин) // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы V Международ. науч. конф. (Минск–Нарочь, 12–17 сентября 2016 г.). Минск: БГУ. 2016. С. 150.
- Коренева Т.Г., Сigareва Л.Е.* Распределение хлорофилла *a* в донных отложениях залива Анива (Охотское море) // Биол. моря. 2019. Т. 45. № 5. С. 299–308.
- Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа. 1990. 352 с.
- Мазуркин П.М., Тойшева Н.П.* Факторный анализ химических веществ почвы // Охрана и защита, обустройство, индентация и тестирование природной среды: Сб. статей. М.: Академия естествознания. 2010. С. 153–157.
- Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я.* Хлорофилл, гуминовые вещества и органический углерод в эстуарии реки Раздольная в период ледостава // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 44–51.
- Мордасова Н.В.* Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Тр. ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 41–56.
- Объемная концентрация растворенного кислорода в морских водах. Методика измерений йодометрическим методом: РД 52.10.736-2010. М.: ФГУ ГОИН. 2010. 27 с.
- Огородников В.С., Сергеенко В.А.* История промысла и состояние запасов анфельдии лагуны Буссе // Рыб. хоз-во. 2001. № 1. С. 34–35.
- Сigareва Л.Е.* Хлорофилл в донных отложениях волжских водохранилищ. М.: Товарищество науч. изд. КМК. 2012. 217 с.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. и др.* Признаки естественного эвтрофирования мелководного оз. Неро по осадочным пигментам // Биол. внутр. вод. 2019. № 4–2. С. 27–35.
- Тарасевич Ю.Н.* Третичная система: Геология СССР. Т. 33. М.: Недра. 1970. С. 168–173.
- Тепаева А.Е., Калганова Т.Н.* Развитие фитопланктона в лагуне Буссе летом 2011 года // Международ. журн. прикл. и фундамент. исслед. 2012. № 1. С. 104–106.
- Тимофеева Н.А., Сigareва Л.Е., Гусаков В.А., Законнов В.В.* Содержание растительных пигментов в донных отложениях водоемов Вьетнама // Биол. внутренних вод. 2018. № 3. С. 45–53.
- Фурсенко А.В., Фурсенко К.Б.* О фораминиферах лагуны Буссе и условиях их существования // Общие вопросы изучения микрофауны Сибири, Дальнего Востока и других районов // Тр. Ин-та геол. и геофиз. СО АН СССР. М.: Наука. 1970. Вып. 71. С. 114–135.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.* Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 279 с.
- Чернышова Ю.С., Прохорова Н.Ю.* Перспективы использования лагуны Буссе как природного источника для получения спата приморского гребешка *Mizuhopecten yessoensis* // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 195. С. 219–228.
- Bianchi T.S., Rolff C., Widbom B., Elmgren R.* Phytoplankton pigments in Baltic Sea seston and sediments: seasonal variability, fluxes, and transformations // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 2002. V. 55. № 3. P. 369–383.
- Buchaca T., Kosten S., Lacerot G. et al.* Pigments in surface sediments of South American shallow lakes as an integrative proxy for primary producers and their drivers // Freshwater Biol. 2019. V. 64. P. 1437–1452.
- Krajewska M., Szymczak-Żyła M., Kowalewska G.* Algal pigments in Hornsund (Svalbard) sediments as biomarkers of Arctic productivity and environmental conditions // Pol. Polar Res. 2017. V. 38. № 4. P. 423–443.
- Leavitt P.R.* A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. 1993. V. 9. Iss. 2. P. 109–127.
- Lorenzen C.J.* Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equations // Limnol. Oceanogr. 1967. V. 12. № 2. P. 343–346.

- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia*. 1986. V. 143. P. 327–329.
- Naeher S., Suga H., Ogawa N.O. et al. Compound-specific carbon and nitrogen isotopic compositions of chlorophyll *a* and its derivatives reveal the eutrophication history of Lake Zurich (Switzerland) // *Chem. Geol.* 2016. V. 443. P. 210–219.
- Reavie E.D., Edlund M.B., Andresen N.A. et al. Paleolimnology of the Lake of the Woods southern basin: continued water quality degradation despite lower nutrient influx // *Lake Reservoir Manage.* 2017. V. 33. Iss. 4. P. 369–385.
- Szymczak-Żyła M., Kowalewska G., Louda J.W. Chlorophyll-*a* and derivatives in recent sediments as indicators of productivity and depositional conditions // *Mar. Chem.* 2011. V. 125. P. 39–48.
- Szymczak-Żyła M., Krajewska G., Winogradow A. et al. Tracking trends in eutrophication based on pigments in recent coastal sediments // *Oceanologia*. 2017. V. 59. Iss. 1. P. 1–17.

Chlorophyll *a* Content in Bottom Sediments of the Shallow Busse Lagoon, Sakhalin Island

T. G. Koreneva^a, L. E. Sigareva^b, and E. M. Latkovskaya^a

^a*Sakhalin Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia*

^b*I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 152742, Russia*

The present study provides the first results of measurements of chlorophyll *a* and chlorophyll degradation products in bottom sediments of the Busse Lagoon, Sakhalin Island, that were carried out in nearshore and central sites of different types in this body of water. A relationship between the sedimentary pigment content and the physicochemical characteristics of bottom sediments has been identified. Determined by the sedimentary phytopigment content, the trophic level of the lagoon varies from oligo- to eutrophic in its different parts. The nearshore waters with an average content of chlorophyll *a* and pheopigments can be assigned the oligotrophic category; the waters of the central part, the mesotrophic category. The concentration of chlorophyll with derivatives in sediments decreased from $21.4 \pm 5.6 \mu\text{g/g}$ dry weight (d.w.) in the summer to $6.1 \pm 1.9 \mu\text{g/g}$ d.w. in the autumn; for the entire lagoon, it averaged at $16.3 \pm 4.4 \mu\text{g/g}$. The seasonal dynamics of sedimentary pigments does not correlate with that of phytoplankton and can depend, to a greater extent, on the hydrodynamic activity. With the relatively low sedimentary pigment content, the lagoon ecosystem shows signs of the terminal phase of oligotrophic–eutrophic succession: periodic mortality of aquatic organisms and silt accumulation.

Keywords: Busse Lagoon, chlorophyll *a*, pheopigments, bottom sediments, trophic level