

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,  
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.555.6:581.132.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА *a*  
В ПРЕСНОВОДНОМ И МОРСКОМ ВОДОЕМАХ

© 2020 г. Л. Е. Сигарева<sup>a, \*</sup>, Т. Г. Коренева<sup>b</sup>, Н. М. Минеева<sup>a</sup>, Н. А. Тимофеева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,  
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

<sup>b</sup>Сахалинский филиал ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства  
и океанографии”, Южно-Сахалинск, Россия

\*e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 17.12.2019 г.

Принята к публикации 28.01.2020 г.

Обобщены данные по содержанию хлорофилла в воде и донных отложениях пресноводного Рыбинского водохранилища (Верхняя Волга) и морского залива Анива (Охотское море). Средняя концентрация хлорофилла *a* в планктоне водохранилища  $23.0 \pm 1.9$  мкг/л, залива –  $0.77 \pm 0.06$  мкг/л, в донных отложениях –  $144.2 \pm 14.9$  и  $8.2 \pm 0.7$  мкг/г сухого осадка соответственно. Выявлены корреляционные связи между концентрациями пигментов в эвфотической зоне, афотическом придонном слое, целом столбе воды и верхнем слое донных отложений, а также связи пигментов с глубиной (в пределах 6–100 м) и прозрачностью (от 1 до 18 м). Показано, что общие связи для двух водоемов аппроксимируются нелинейными уравнениями с коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) от 0.37 до 0.93. Характер связей между пигментными показателями сходен для обоих водных объектов.

**Ключевые слова:** хлорофилл, эвфотическая зона, афотическая зона, водохранилище, морской залив

**DOI:** 10.31857/S032096522004018X

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая основа существования экосистем – продукция растительных сообществ, в изучении которых широко применяются сведения об универсальном пигменте фотосинтетического аппарата Хл и его производных (Swain, 1985; Adams, Prentki, 1986; Leavitt, 1993; Szymczak-Żyła, Kowalewska, 2009; Сигарева, 2012; Krajewska et al., 2017).

Информация о растительных пигментах может использоваться для оценки состава фитопланктона, первичной продукции, условий окружающей среды, изменений климата, трофии водоема, эвтрофирования и др. (Freiberg et al., 2011; Jimenez et al., 2015; Schuller et al., 2015; Tse et al., 2015; Naeher et al., 2016; Reavie et al., 2017; Cotoviez et al., 2018; Koornkang et al., 2018; Timofeeva et al., 2018b). Рассматривается связь растительных пигментов с другими звеньями трофической цепи, например, с мейофауной, макрозообентосом (Liu et al., 2005; Rasiq et al., 2016; Lampadariou, Eleftheriou, 2018; Timofeeva et al., 2018). Растительные пигменты всесторонне используются в монито-

ринге состояния водоемов Волжского бассейна (Минеева, 2004; Сигарева, 2012; Сигарева и др., 2016; Структура..., 2018). Интерес к пигментам в морских водах обусловлен необходимостью оценки первичной продукции ОВ в Мировом океане, а также изучения эволюции жизни на Земле (Виноградов, 2004).

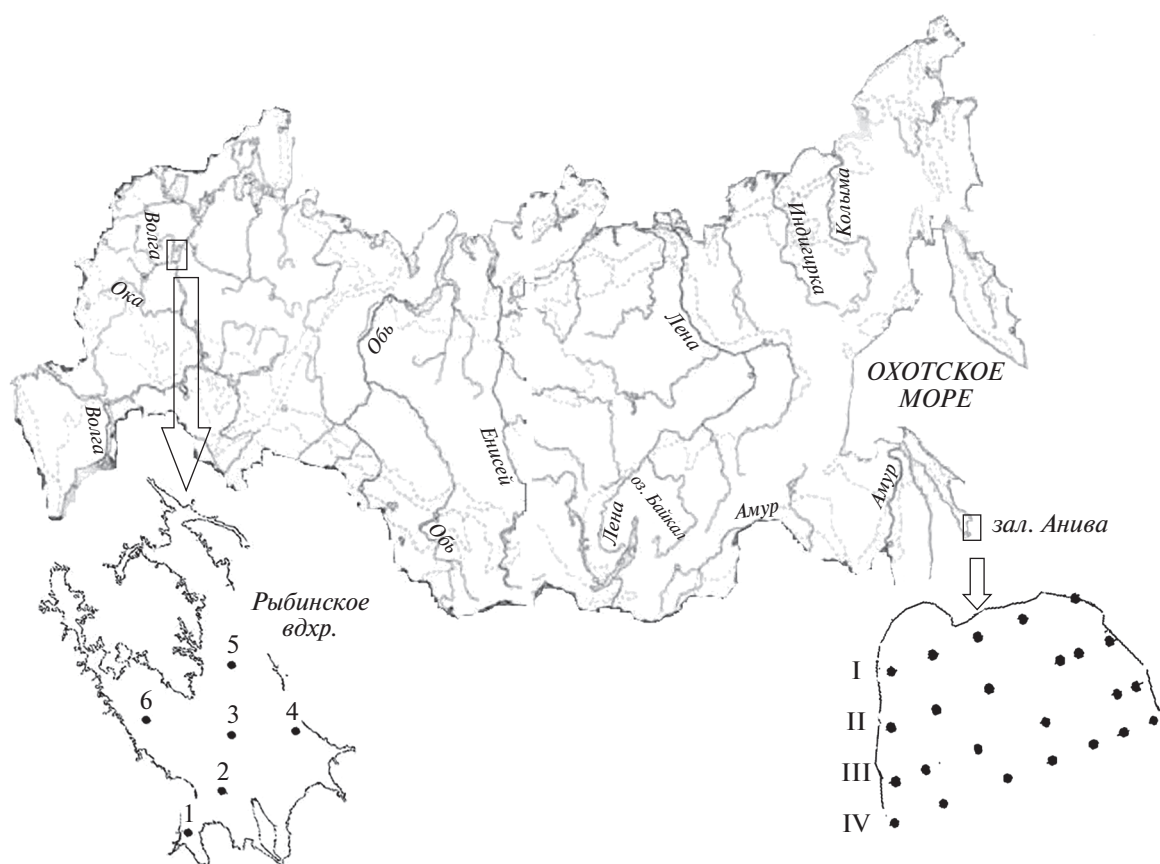
В этом плане особый интерес представит анализ распределения пигментов в компонентах морских и пресноводных экосистем, существенно различающихся по абиотическим условиям и видовому составу организмов.

Цель работы – сравнить содержание и характер связей Хл в воде и донных отложениях пресноводного и морского водоемов на примере Рыбинского водохранилища на р. Волге и залива Анива в Охотском море.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы по Рыбинскому водохранилищу получены в стандартных экспедициях на научно-исследовательском судне “Академик Топчиев”, по заливу Анива – на судне “Дмитрий Песков”. В Рыбинском водохранилище пробы собирали в безледные периоды 2008–2017 гг., в заливе Анива –

**Сокращения:** Хл – хлорофилл *a*, ОВ – органическое вещество.



**Рис. 1.** Схема расположения станций в Рыбинском водхр. и заливе Анива (Охотское море). I, II, III, IV – разрезы в заливе, 1–6 – станции.

2009 и 2013 г. Пробы воды в водохранилище отбирали на шести постоянных станциях (рис. 1) одномоетровым батометром по всей глубине в основной части фотосинтезирующей зоны (0–2 м), в среднем перемешиваемом (2–6 м) и нижнем (от 6 м до дна) слоях, а также в придонном одномоетровом слое. Пробы воды в заливе отбирали на 24 станциях четырех разрезов (рис. 1). Использовали батометрическую секцию Rossette, снабженную кассетой из 12 пластиковых батометров Нискина объемом 1.7 л с дистанционным закрытием на заданной глубине (поверхность, 10, 20, 30... м). Пробы донных отложений отбирали из верхнего 2.5-сантиметрового слоя отложений в Рыбинском водохранилище стратометром или коробчатым дночерпателем, в заливе Анива – дночерпателем Ван-Вина.

Содержание Хл и его производных определяли спектрофотометрическим или флуоресцентным методами (Гольд и др., 1986; Jeffrey, Humphrey, 1975; Lorenzen, 1967). Воздушно-сухую объемную массу донных отложений рассчитывали по влажности грунта (Сигарева, 2012). Тип донных отложений оценивали по гранулометрическому составу и водно-физическим свойствам грунта.

**Краткая характеристика исследуемых водных объектов.** Рыбинское водохранилище (58°22.378' с.ш., 38°23.217' в.д.) – одно из крупнейших в волжском каскаде, служит резервуаром пресной воды для центральных регионов РФ. Площадь 4550 км<sup>2</sup>, объем 25.4 км<sup>3</sup>, средняя глубина 5.6 м (Структура..., 2018). Прозрачность воды в водохранилище (средняя за сезон) варьирует в пределах 1–1.7 м. Климат в регионе умеренно-континентальный. Трофический статус водохранилища по показателям развития фитопланктона и концентрации Хл оценивался чаще всего как мезотрофный с признаками эвтрофии. В последнее время для водохранилища характерно эвтрофное состояние (Структура..., 2018).

Первичная продукция фитопланктона водохранилища составила 187–414 г O<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> год). (Пырина и др., 2006). Содержание общего азота в воде – 0.46–1.07 мг/л, общего фосфора – 40–68 мкг/л (Структура..., 2018). Площадь грунтов разного типа была рассчитана по данным 2010 г. и составила: 14% почв; 55% песчаных наносов; 28% илистых отложений торфа и 3% отложений из макрофитов (Структура..., 2018). Содержание ОВ в песчаных отложениях было 0.2–4.6%, в глини-

стых илах – 7.7%, в торфянистых – 10.3–22.4%, торфе – 40.1%. Скорость осадконакопления – 2.2 мм/год, скорость илонакопления – 5.9 мм/год (Структура..., 2018).

Залив Анива – юго-западная часть Охотского моря, омывает побережье о. Сахалин, находится между мысами Крильон (45°54' с.ш., 142°05' в.д.) и Анива (46°01' с.ш., 142°25' в.д.). Площадь акватории залива 5809 км<sup>2</sup>. Наименьшие глубины характерны для северной части залива (10–40 м), наибольшие – для южной центральной (80–110 м). Средняя глубина залива 63 м (Люция..., 2003). Климат умеренно-муссонный. Среднеголетние значения температуры воды в заливе колеблются от –1.5°C в марте до 13.0°C в августе. Соленость глубоководной части залива – 30.3–33.0, прибрежной – 22.8–31.9‰. Прозрачность воды изменяется от 2 до 18 м (Leonov, Pishchal'nik, 2005). Алеврито-пелитовые отложения с размерами частиц <0.1 мм занимают 39% площади дна, пески (≤1 мм) – 35%, грубообломочные грунты (<1 мм) – 26%. Доля алеврито-глинистых илов достигает 54% в районе дампинга грунта, в местах с галькой и гравием снижается до 5% (Шевченко и др., 2016).

В заливе Анива первичная продукция фитопланктона в среднем  $0.29 \pm 0.04$  г С/(м<sup>2</sup> сут) при диапазоне 0.01–1.53 г С/(м<sup>2</sup> сут), в период массового развития диатомовых водорослей в акватории Охотского моря может достигать 3–6 г С/(м<sup>2</sup> сут) (Агатова и др., 2016). Нитратный азот – основной лимитирующий фактор развития фитопланктона в заливе (Коренева и др., 2014). Весенний максимум нитратного азота 86.1 мкг/л, минерального фосфора – 33.6 мкг/л, летом эти показатели уменьшаются до 63.8 и 18.9 мкг/л соответственно (Пропп, Гаврина, 2005). Влажность грунтов 7–51%, концентрация ОВ 0.2–2.7% (Koreneva, Sigareva, 2019). Воздушно-сухая объемная масса донных отложений залива характеризуется величинами (0.7–2.3 г/см<sup>3</sup>), сходными с отмечаемыми в других районах Охотского моря (Здобин, 2014). Средняя скорость осадконакопления в море 0.295 мм/год, на отдельных участках от 0.024 до 0.425 мм/год (Астахов и др., 1988), у берегов Сахалина – 0.08 мм/год (Семаков, 1976).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Рыбинском водохранилище на постоянных станциях среднегодовая концентрация Хл в эвфотической зоне (0–2 м) изменялась от  $5.2 \pm 1.7$  до  $50.5 \pm 7.9$  мкг/л, в придонном однометровом слое от  $2.3 \pm 0.8$  до  $37.8 \pm 16.2$  мкг/л. Средние концентрации Хл на станциях в 2009–2014 гг. приведены в табл. 1. В заливе Анива (табл. 1) концентрация Хл в фотосинтезирующей области (до глубины трехкратной прозрачности) была 0.36–1.46 мкг/л, в придонной афотической (глубины более трехкрат-

**Таблица 1.** Концентрация Хл (мкг/л) в эвфотическом и придонном слоях Рыбинского водохранилища (среднее за 2009–2014 гг.) и залива Анива (2013 г.)

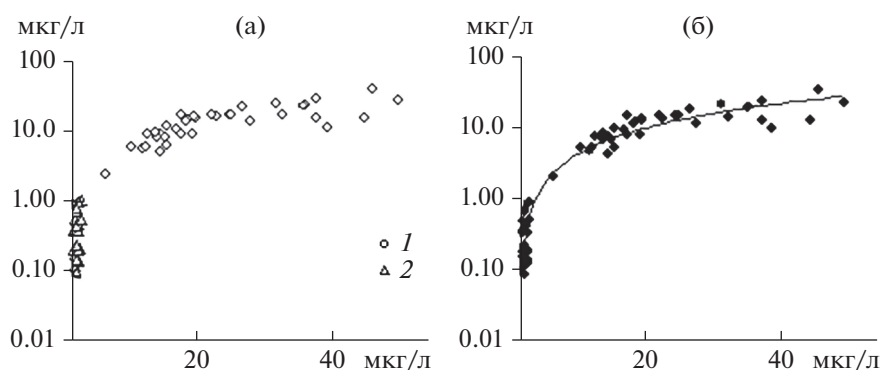
Номер станции, разрез	Эвфотическая зона	Придонный слой
Рыбинское водохранилище		
1	24.4 ± 5.5	13.1 ± 3.4
2	32.4 ± 6.2	21.0 ± 4.4
3	19.8 ± 4.1	13.3 ± 2.8
4	18.0 ± 2.1	11.6 ± 1.5
5	17.6 ± 2.5	10.5 ± 2.0
6	25.8 ± 5.4	11.7 ± 1.8
Залив Анива		
I	0.53 ± 0.12	0.36 ± 0.05
II	0.59 ± 0.06	0.21 ± 0.1
III	1.01 ± 0.14	0.49 ± 0.11
IV	0.91 ± 0.08	0.36 ± 0.12

ной прозрачности до 100 м) – 0.09–0.96 мкг/л. Средняя концентрация Хл в эвфотической зоне водохранилища достигала  $23.0 \pm 1.9$ , залива –  $0.77 \pm 0.06$  мкг/л.

Между концентрациями Хл в слоях водной толщи Рыбинского водохранилища (0–2, 2–6 и 6 м – дно, 0 м – дно) зарегистрированы достаточно тесные корреляционные связи (в 2009–2014 гг.  $r = 0.5–0.9$ ) (Минеева, 2016). Аналогичные результаты получены при анализе связи концентраций пигмента в эвфотическом и придонном однометровом слоях (Sigareva et al., 2019). Концентрация Хл в придонной воде была меньше, чем в эвфотической зоне – в 1.8 раза в Рыбинском водохранилище и в 2.1 раза в заливе Анива. Зависимость между концентрациями Хл в эвфотической зоне и придонной воде обоих водных объектов представлена универсальной связью при высоком коэффициенте детерминации (рис. 2). Доля Хл придонного полуметрового слоя в водном столбе в Рыбинском водохранилище достигала 3–8% концентрации в целом столбе воды, в заливе Анива – 0.14–4.1%.

Связь между Хл в водном столбе и его глубиной в исследованных водоемах представлена прямой зависимостью (рис. 3а). Объединение данных в один ряд приводит к изменению связи (между общим содержанием Хл и глубиной в пределах 6–100 м) с прямой положительной на нелинейную отрицательную (рис. 3в).

Связь Хл с прозрачностью (показателем световых условий, толщины фотосинтезирующей зоны и количества взвеси), выявленная в Рыбинском водохранилище, обратная и достаточно тесная, в заливе – менее выражена (рис. 3б). Для объединенных данных (рис. 3г) установлена силь-



**Рис. 2.** Зависимость концентрации Хл в придонной воде (ось ординат) от концентрации пигмента в эвфотической зоне (ось абсцисс): а – Рыбинское вдхр. (1) и залив Анива (2); б – оба водоема,  $R^2 = 0.93$ .

ная обратная связь Хл с прозрачностью (диапазон 1–18 м) в виде степенного уравнения ( $R^2 = 0.67$ ).

Концентрация Хл с его производными в донных отложениях составила в Рыбинском водохранилище  $144.2 \pm 14.9$  мкг/г сухого грунта, в заливе –  $8.2 \pm 0.7$  мкг/г сухого грунта. Связи концентрации осадочных пигментов с влажностью грунтов в Рыбинском водохранилище и заливе Анива аппроксимируются положительными нелинейными зависимостями (рис. 4а), с объемной массой – отрицательными нелинейными (рис. 4в). Для объединенных данных по обоим водоемам характер связей представлен нелинейными зависимостями в пределах всего диапазона рассматриваемых величин: положительной связью пигментов с влажностью (рис. 4б) и отрицательной – с воздушно-сухой объемной массой грунта (рис. 4г).

Связь осадочных пигментов с глубиной водной толщи в Рыбинском водохранилище – тесная положительная степенная, в заливе Анива такая связь отсутствует (рис. 4д, 4е). При этом общая для двух объектов зависимость от глубины не прослеживается ни для концентраций пигментов в сухом грунте, ни для их содержания в целом столбе воды.

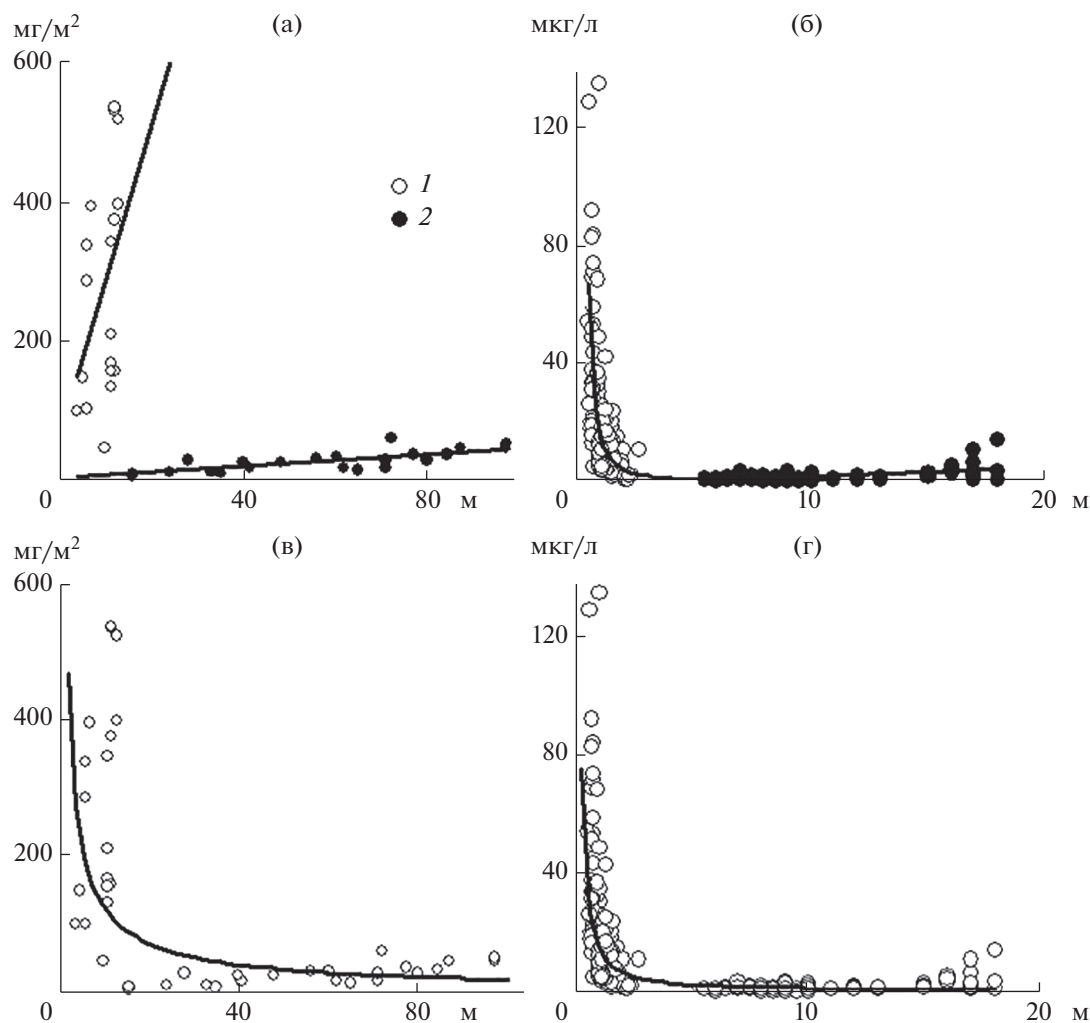
Содержание феопигментов (производных Хл) меняется в толще воды и донных осадках двух водных объектов сходным образом. При благоприятных условиях для фотосинтеза растительных организмов в водной толще относительное содержание продуктов разрушения Хл значительно ниже, чем в донных отложениях (табл. 2).

Соотношение между концентрациями Хл в воде и донных отложениях в заливе Анива и Рыбинском водохранилище можно представить как ли-

**Таблица 2.** Содержание феопигментов (% суммы с Хл) в Рыбинском водохранилище и заливе Анива

Номер станции, разрез	Слой водной толщи*			Донные отложения (0–2.5 см)
	верхний	средний	нижний	
Рыбинское водохранилище				
1	$37.2 \pm 3.4$	$37.9 \pm 4.4$	$46.2 \pm 3.8$	$77.5 \pm 3.0$
2	$28.5 \pm 3.2$	$30.7 \pm 3.6$	$43.1 \pm 4.8$	$68.5 \pm 1.8$
3	$28.8 \pm 5.7$	$43.8 \pm 6.8$	$46.9 \pm 9.5$	$88.2 \pm 2.3$
4	$37.0 \pm 4.2$	$47.3 \pm 7.6$	–	$91.2 \pm 2.9$
5	$36.2 \pm 5.4$	$48.2 \pm 7.1$	$58.5 \pm 8.2$	$82.8 \pm 2.7$
6	$29.3 \pm 4.6$	$39.6 \pm 6.6$	$53.2 \pm 6.7$	$71.2 \pm 1.2$
Залив Анива				
I	$45.9 \pm 7.6$	$55.1 \pm 16.3$	$61.5 \pm 2.8$	$80.8 \pm 7.2$
II	$58.2 \pm 6.5$	$55.3 \pm 5.3$	$35.9 \pm 10.9$	$88.6 \pm 3.1$
III	$50.5 \pm 5.7$	$59.7 \pm 4.2$	$67.5 \pm 10.5$	$88.5 \pm 2.3$
IV	$57.3 \pm 2.4$	$69.1 \pm 4.3$	$77.3 \pm 5.1$	$89.0 \pm 3.4$

\* В водохранилище верхний слой – 0–2 м, средний – 2–6 м, нижний – 6 м–дно; в заливе верхний слой – <1, средний – 1–3, нижний – >3 прозрачности воды.

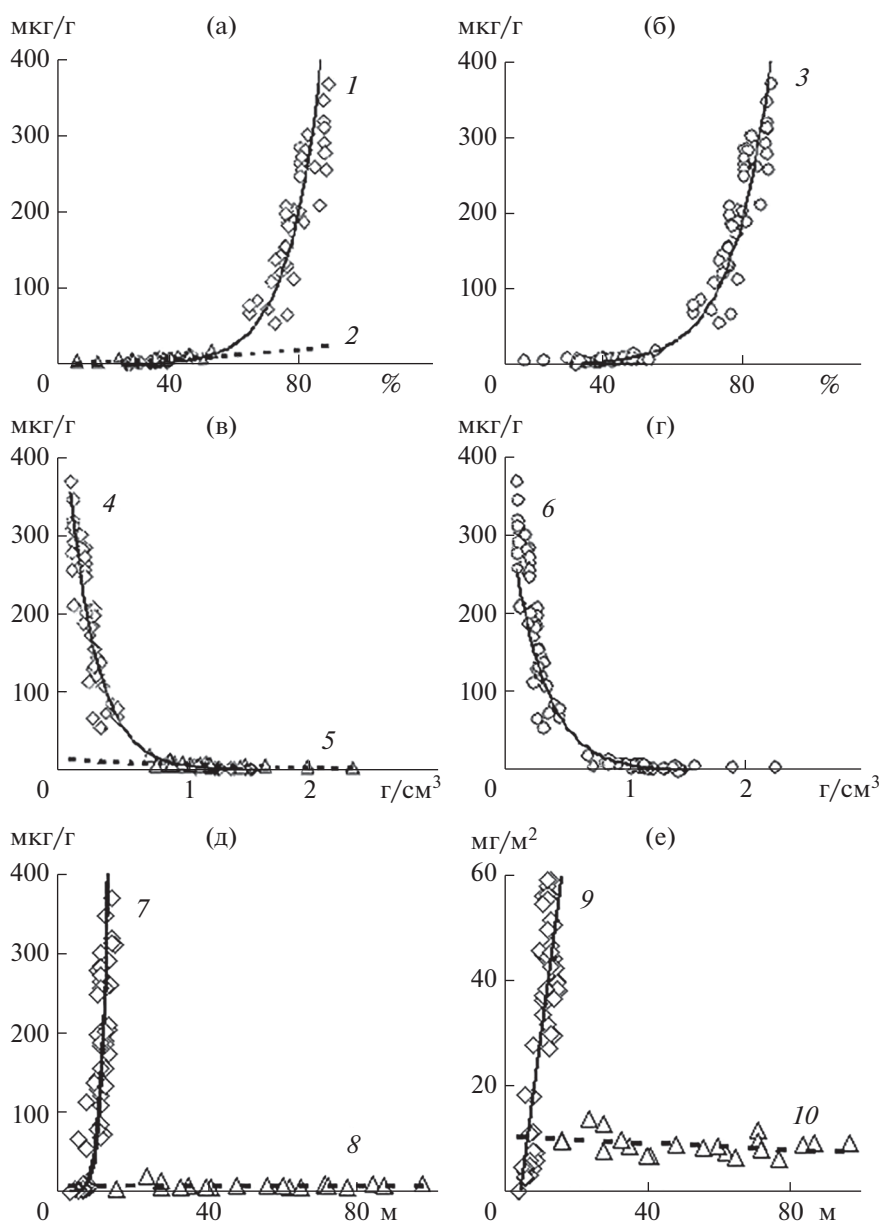


**Рис. 3.** Связь содержания Хл в столбе воды с глубиной (а, в) и в эвфотической зоне с прозрачностью воды (б, г). а – Рыбинское вдхр. (1,  $R^2 = 0.18$ ) и залив Анива (2,  $R^2 = 0.56$ ); б – Рыбинское вдхр. (1,  $R^2 = 0.46$ ) и залив Анива (2,  $R^2 = 0.26$ ); в – Рыбинское вдхр. + залив Анива ( $R^2 = 0.37$ ); г – Рыбинское вдхр. + залив Анива ( $R^2 = 0.67$ ).

нейной, так и степенной зависимостями (рис. 5) с высокими коэффициентами детерминации (0.72 и 0.71 соответственно). Линии, отражающие зависимость бентосного Хл от планктонного, пересекают ось ординат не в нулевой точке, т.е. даже при отсутствии пигмента в водной толще (например, за счет сезонной динамики) в отложениях водоема сохраняется некоторое количество Хл. Среднее соотношение между содержанием Хл в водном столбе ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ) и верхнем слое донных отложений ( $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{мм})$ ) составляет  $3.91 \pm 0.22$  в Рыбинском водохранилище и  $3.33 \pm 0.47$  в заливе Анива. Согласно критерию Стьюдента, различия между этими величинами недостоверны. Если учесть скорости осадконакопления, то исследуемое соотношение будет в Рыбинском водохранилище 0.66, заливе Анива 11.3.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты изучения растительных пигментов позволили выявить универсальные закономерности в распределении Хл в морском и пресноводном водоемах, обусловленные сходством процессов формирования первичной продукции ОВ фитопланктона. В Рыбинском водохранилище содержание Хл соответствует величинам мезотрофной и эвтрофной категорий вод (Винберг, 1960). В морском заливе Анива концентрация Хл существенно ниже, чем в Рыбинском водохранилище, но по градации для морских вод (Ведерников, 1975; Antoine et al., 1996; Мордасова, 2014) тоже соответствует мезотрофным и эвтрофным величинам. Широкий диапазон концентраций Хл в исследуемых водоемах обусловлен динамикой фитопланктона и абиотических факторов продуктивности (Пырина и др., 2006; Коренева, Латковская, 2013; Корене-



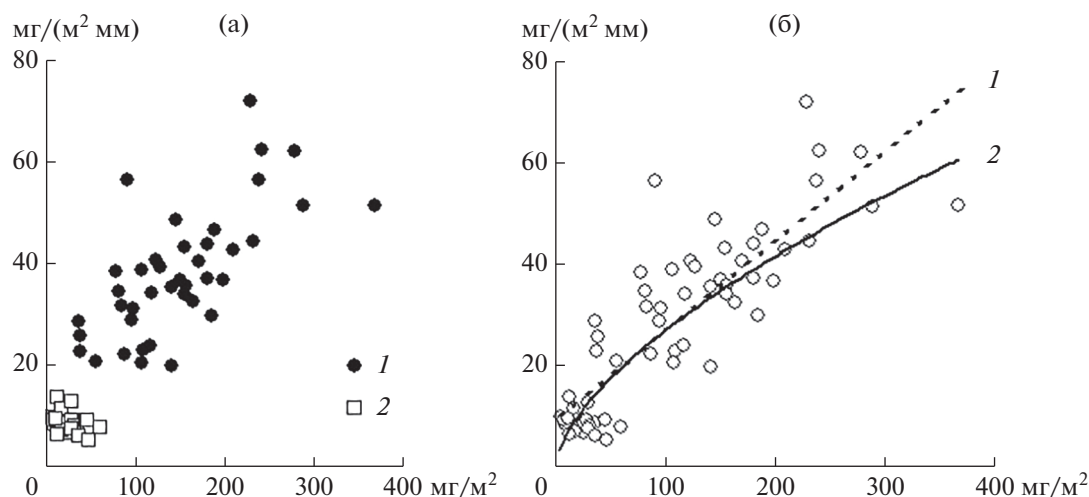
**Рис. 4.** Связи концентрации Хл + феопигменты в донных отложениях с влажностью (а, б), воздушно-сухой объемной массой грунта (в, г) и глубиной водного столба (д, е). Линии регрессии для Рыбинского вдхр. – 1, 4, 7, 9 ( $R^2$  соответственно 0,72, 0,75, 0,64, 0,65); для залива Анива – 2, 5, 8, 10 ( $R^2$  соответственно 0,52, 0,47, 0,002, 0,15); для обоих водоемов – 3 ( $R^2 = 0,72$ ) и 6 ( $R^2 = 0,68$ ).

ва и др., 2014; Структура..., 2018). В многолетнем аспекте содержание Хл в водохранилище варьирует согласно цикличности солнечной активности без определенных трендов и остается типичным для водоема (Пырина и др., 2006).

Суммарное содержание Хл в столбе воды зависит от количества водорослей и увеличивается с глубиной водной толщи. Связь между Хл и глубиной в конкретных водоемах представлена прямой зависимостью (рис. 3а). Наиболее тесная связь ( $R^2 = 0,56$  в морском заливе) выявлена для широ-

кого диапазона глубин, различающихся в 10 раз, менее тесная ( $R^2 = 0,18$  в водохранилище) – для сравнительно небольших глубин при двукратных различиях.

Характер установленной нами универсальной для водохранилища и морского залива связи между Хл и прозрачностью согласуется с результатами, приведенными в работе (Carlson, 1977) для пределов концентраций Хл 0,04–1183 мкг/л и прозрачности 0,06–64 м в природных водоемах. Обратная связь концентрации Хл с прозрачно-



**Рис. 5.** Связь между содержанием пигментов в поверхностных донных отложениях (Хл + феопигменты) и Хл в столбе воды: а – Рыбинское вдхр. (1) и залив Анива (2); б – оба водоема, линии регрессии: 1 – линейная ( $R^2 = 0.73$ ), 2 – степенная ( $R^2 = 0.71$ ).

стью обусловлена уменьшением последней при увеличении плотности клеток фитопланктона и, как следствие, увеличении концентрации Хл. Наиболее резкие изменения отмечены в Рыбинском водохранилище при небольшом диапазоне прозрачности, ограничивающей толщину эвфотической зоны (рис. 3б).

Содержание Хл в донных отложениях водохранилища, как и в водной толще, характеризовалось более высокими величинами, чем в морском заливе. Средняя концентрация осадочного Хл в Рыбинском водохранилище относится к эвтрофной категории, в заливе Анива – олиготрофной (Möller, Scharf, 1986). Выявленные зависимости осадочных пигментов от свойств грунтов обусловлены варьированием значений водно-физических показателей донных отложений, связанных с ОВ растительного происхождения. В целом, характер связей сходен с таковым для других исследованных ранее водоемов – разнотипных озер и водохранилищ Волжского бассейна (Номоконова, 2009, 2011; Сигарева, 2012).

Среди закономерностей пространственного распределения пигментов между компонентами экосистем можно отметить сходство соотношения между потенциально активной и деградированной формами Хл в Охотском море и Рыбинском водохранилище. В других водоемах соотношение Хл и его производных тоже возрастает с глубиной в водном столбе и донных отложениях (Минеева, 2004; Сигарева, 2012; Смольская и др., 2018; Структура..., 2018). Относительное содержание феопигментов зависит не только от благоприятных для фотосинтеза условий, но и от ста-

билизирующих пигментный фонд факторов, к которым относят аноксию, наличие сероводорода и метана, как, например, во впадине Каспийского моря (Kravchishina et al., 2016) или некоторых пресноводных озерах (Leavitt, 1993).

Содержание растительных пигментов в афотических зонах (и донных отложениях) тесно коррелирует с содержанием пигментов в зоне фотосинтеза. Этот факт согласуется с особенностями распределения и динамики пигмента (водорослей) в воде и донных отложениях водоемов (Состояние..., 2008; Номоконова, 2011; Минеева, 2016; Сигарева и др., 2016; Структура..., 2018)). Расчеты показывают, что общее содержание Хл в водном столбе соответствует их содержанию в слое поверхностных отложений толщиной ~3–4 мм. Такие величины сопоставимы с полученными ранее для ряда озер и водохранилищ волжского каскада другим способом, учитывающим объем всей водной массы и общую площадь водоема (Сигарева, 2012). Соотношение между содержанием Хл (пересчитанного на ОВ) в среднегодовом слое осадконакопления и первичной продукцией невелико (Сигарева, 2012), как и отношение содержания ОВ в донных отложениях к первичной продукции, которое в Охотском море уменьшается с глубиной. В центральном наиболее глубоком районе моря в отложениях содержится 0.15–0.7% ОВ, в менее глубоком районе континентальных склонов – 0.7–1.0%, в отдельных местах – 1–3% (Bosin et al., 2010). Такие данные близки к средней величине для биосферы, составляющей 0.8% ОВ от первичной продукции (Romankevich et al., 2009). Незначительная доля первичной продукции фитопланктона, поступающей на дно, свидетельствует о сбалан-

сированности продукционно-деструкционных процессов в водных экосистемах и, следовательно, об устойчивости биогеохимических круговоротов (Горшков, 1985; Виноградов, 2004; Максимова, 2004).

Различия свойств фонда растительных пигментов в морском и пресноводном водоемах обусловлены широким диапазоном абиотических факторов продуктивности — почти десятикратной разницей средних глубин и прозрачности воды. Основной показатель различий — содержание Хл, которое в пресноводном Рыбинском водохранилище в 30 раз выше, чем в морском заливе Анива (табл. 1). Следствием разного влияния глубины на распределение Хл в компонентах экосистем были более тесные корреляционные связи между глубиной и Хл в планктоне морского залива, чем в водохранилище. Однако, связи между глубиной и содержанием осадочных пигментов лучше выражены в пресноводном водоеме (рис. 4).

Сходство структурно-функциональной организации фонда растительных пигментов в водохранилище и заливе проявилось в универсальных для водоемов закономерностях, характеризующих связи между концентрациями пигмента в компонентах экосистемы. Например, соотношение между концентрациями Хл в нижнем (афотическом) придонном и верхнем (эвфотическом) слоях воды, как правило, меньше 1.0, а общая (для двух водоемов) связь достаточно тесная. Сильная связь между концентрациями пигмента по вертикальному разрезу водоема отражает определяющую роль в экосистеме новообразованного ОВ при фотосинтезе. В эвфотической зоне скорость синтеза Хл превышает скорость его деградации, в афотической зоне Хл, теоретически, не синтезируется, а разрушается. В афотической зоне, включая дно, концентрация пигментов пополняется за счет осевших клеток водорослей, Хл превращается в феопигменты и другие продукты деградации. По вертикальному профилю водоема возрастает процентное содержание феопигментов, о чем свидетельствуют максимальные значения этого показателя в самых нижних горизонтах водной толщи и донных отложениях. Универсальный характер связи между концентрациями пигментов в водной толще и донных отложениях отражает наличие определенного соотношения пигментов (и ОВ) в бентали и пелагиали, несмотря на трансформацию ОВ при седиментации.

Жизнь в морских и пресных водах различается на всех уровнях организации — экосистемном, организменном, клеточном и молекулярном, а специфичность биоты в водоемах разной солености считается фундаментальным свойством жизни (Жирков, 2017). Однако, наряду с различиями,

морские и пресноводные экосистемы характеризуются сходными закономерностями функционирования первичного звена и сходными связями между компонентами пигментного фонда. Сравнительный анализ морских и пресноводных водоемов может быть одним из подходов к пониманию структурно-функциональной организации разнотипных водных экосистем.

**Выводы.** Особенности формирования и распределения фонда растительных пигментов в пресноводном Рыбинском водохранилище и морском заливе Анива (Охотское море) контролируются абиотическими условиями. Концентрации Хл в воде и донных отложениях пресноводного водоема существенно выше по сравнению с морским заливом. Для пресного и морского водоемов выявлено более высокое относительное содержание феопигментов в афотических водных слоях и донных отложениях по сравнению с эвфотической зоной. Универсальные связи (связи между концентрациями растительных пигментов в эвфотическом, афотическом слоях и донных отложениях; содержания Хл в водной толще с глубиной водного столба и прозрачностью; содержания осадочных пигментов с водно-физическими свойствами отложений — влажностью и объемной массой; содержания пигментов в поверхностном слое отложений с концентрацией Хл в водном столбе) отражают сходство пигментных фондов исследованных водных объектов. Содержание Хл в фотосинтезирующем слое влияет на его распределение в компонентах экосистемы. Полученные результаты могут применяться в мониторинге экологического состояния морских и пресноводных объектов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А18-118012690096-1, а также содружества между Институтом биологии внутренних вод РАН и Сахалинским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. 2016. Органическое вещество, скорости его трансформации и продуктивность различных районов Охотского моря // Труды ВНИРО. Т. 164. С. 41.
- Астахов А.С., Вагина Н.К., Горбаренко С.А. и др. 1988. Скорости голоценового осадконакопления в Охотском море // Тихоокеанская геология. № 4. С. 3.
- Ведерников В.И. 1975. Зависимость ассимиляционного числа и концентрации хлорофилла *a* от продуктив-



- ности вод в различных температурных областях Мирового океана // *Океанология*. Т. 15. № 4. С. 703.
- Винберг Г.Г.* 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Виноградов М.Е.* 2004. Биологическая продуктивность океанических экосистем // *Новые идеи в океанологии*. Т. 1. Физика. Химия. Биология. Москва: Наука. С. 237.
- Гольд В.М., Гаевский Н.А., Шатров И.Ю. и др.* 1986. Опыт использования флуоресценции для дифференциальной оценки содержания хлорофилла у планктонных водорослей // *Гидробиол. журн.* Т. 22. № 3. С. 80.
- Горшков В.Г.* 1985. Устойчивость биогеохимических круговоротов // *Экология*. № 2. С. 3.
- Жирков И.А.* 2017. Биогеография. Общая и частная: суши, моря и континентальных водоемов. Москва: Тов-во науч. изд. КМК.
- Здобин Д.Ю.* 2014. Состав и свойства илов шельфа Охотского моря // *Инженерная геология*. № 2. С. 34.
- Коренева Т.Г., Латковская Е.М.* 2013. Характеристика изменчивости вод залива Анива по содержанию пигментов фитопланктона // *Вода: хим.экол.* № 10. С. 68.
- Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Частиков В.Н.* 2014. Сезонная динамика гидролого-гидрохимических характеристик и концентрации хлорофилла *a* в заливе Анива в 2003 г. // *Вода: хим. экол.* № 4. С. 33.
- Люция Татарского пролива, Амурского лимана и пролива Лаперуза. 2003. Санкт-Петербург: ГУНиОМО РФ.
- Максимова М.П.* 2004. Сравнительная гидрохимия морей // *Новые идеи в океанологии*. Т. 1. Физика, химия, биология. Москва: Наука. С. 168.
- Минеева Н.М.* 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Москва: Наука.
- Минеева Н.М.* 2016. Сезонная и межгодовая динамика хлорофилла в планктоне Рыбинского водохранилища по данным флуоресцентной диагностики // *Тр. ин-та биол. внутр. вод РАН*. № 76(79). С. 75.
- Мордасова Н.В.* 2014. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // *Тр. ВНИРО*. Т. 152. С. 41.
- Номоконова В.И.* 2009. Гидрохимический режим и трофическое состояние озер Самарской Луки и сопредельной территории // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. Т. 11. № 1. С. 155.
- Номоконова В.И.* 2011. Содержание фотосинтетических пигментов в воде и донных отложениях водоемов Самарской Луки // *Самарская Лука: пробл. регион. глобал. экол.* Т. 20. № 2. С. 54.
- Пропп Л.Н., Гаврина Л.Ю.* 2005. Сезонные вариации соединений биогенных элементов и продукционных характеристик в водах залива Анива по результатам экспедиционных исследований 2001–2002 гг. // *Тр. СахНИРО*. Т. 7. С. 111.
- Пырина И.Л., Литвинов А.С., Кучай Л.А. и др.* 2006. Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона Рыбинского водохранилища в связи с действием климатических факторов // *Состояние и проблемы продукционной гидробиологии*. Москва: Товарищество науч. изданий КМК. С. 36.
- Семаков Н.Н.* 1976. Палеомагнитное изучение отложений южной части Охотского моря // *Палеомагнетизм мезозоя и кайнозоя Сибири и Дальнего Востока*. Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР. С. 113.
- Сигарева Л.Е.* 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.
- Сигарева Л.Е., Пырина И.Л., Тимофеева Н.А.* 2016. Межгодовая динамика растительных пигментов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // *Тр. ин-та биол. внутр. вод РАН*. № 76(79). С. 119.
- Смольская О.С., Жукова А.А., Люля А.С.* 2018. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мястро // *Журн. Белорусс. гос. ун-та. Биология*. № 2. С. 65.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. 2008. Москва: Наука.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. 2018. Москва: РАН.
- Шевченко Г.В., Частиков В.Н., Кириллов К.В., Кусайло О.В.* 2016. Экспериментальные исследования течений в заливе Анива в 2003 г. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т. 9. № 4. С. 35.
- Adams M.S., Prentki R.T.* 1986. Sedimentary pigments as an index of the trophic status of Lake Mead // *Hydrobiologia*. V. 143. № 1. P. 71.  
<https://doi.org/10.1007/BF00026647>
- Antoine D., Andre J.-M., Morel A.* 1996. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll // *Global Biogeochem. Cycles*. V. 10. № 1. P. 57.
- Bosin A.A., Zakharkov S.P., Gorbarenko S.A.* 2010. The reflection of the present distribution of the primary production in the bottom sediments of the Sea of Okhotsk // *Oceanology*. V. 50. № 2. P. 175.  
<https://doi.org/10.1134/S0001437010020037>
- 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>
- Cotovicz L.C., Jr., Knoppers B.A., Brandini N. et al.* 2018. Predominance of phytoplankton-derived dissolved and particulate organic carbon in a highly eutrophic tropical coastal embayment (Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil) // *Biogeochemistry*. V. 137. № 1–2. P. 1.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-017-0405-y>
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F.* 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Bio-*

- chem. 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)
- Jiménez L., Romero-Viana L., Conde-Porcuna J.M., Pérez-Martínez C.* 2015. Sedimentary photosynthetic pigments as indicators of climate and watershed perturbations in an alpine lake in southern Spain // *Limnetica*. V. 34. № 2. P. 439.  
<https://doi.org/10.23818/limn.34.33>
- Freiberg R., Nõmm M., Tõnno I. et al.* 2011. Dynamics of phytoplankton pigments in water and surface sediments of a large shallow lake // *Estonian J. Earth Sci.* V. 60. № 2. P. 91.  
<https://doi.org/10.3176/earth.2011.2.03>
- Koomklang J., Yamaguchi H., Ichimi K., Tada K.* 2018. A role for a superficial sediment layer in upward nutrient fluxes across the overlying water–sediment interface // *J. Oceanogr.* V. 74. № 1. P. 13.  
<https://doi.org/10.1007/s10872-017-0434-0>
- Koreneva T.G., Sigareva L.E.* 2019. The distribution of chlorophyll *a* in the bottom sediments of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) // *Russ. J. Mar. Biol.* № 5. P. 341.  
<https://doi.org/10.1134/S1063074019050067>
- Krajewska M., Szymczak-Żyła M., Kowalewska G.* 2017. Algal pigments in Hornsund (Svalbard) sediments as biomarkers of Arctic productivity and environmental conditions // *Polish Polar Research*. V. 38. № 4. P. 423.  
<https://doi.org/10.1515/popore-2017-0025>
- Kravchishina M.D., Lisitzin A.P., Lein A.Y. et al.* 2016. First results on determination of chlorophyll *a* and its derivatives in the system of trapped sedimentary material–fluffy layer–bottom sediment of the Caspian Sea // *Dokl. Earth Sci.* V. 467. № 1. P. 284.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X16030041>
- Lampadariou N., Eleftheriou A.* 2018. Seasonal dynamics of meiofauna from the oligotrophic continental shelf of Crete (Aegean Sea, eastern Mediterranean) // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* V. 502. P. 91.  
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.12.014>
- Leavitt P.R.* 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // *J. Paleolimnol.* № 9. № 2. P. 109.  
<https://doi.org/10.1007/BF00677513>
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M.* 2005. Biotransformation of organogenic substances in the Aniva Bay waters: assessment with the use of mathematical modeling // *Water Resour.* V. 32. № 5. P. 508.  
<https://doi.org/10.1007/s11268-005-0065-5>
- Liu X., Zhang Z., Wu Y., Huang Y., Zhang Y.* 2005. Distribution of sediment chloroplast pigments in the Southern Yellow Sea, China // *J. Ocean Univ. China*. V. 4. № 2. P. 163.  
<https://doi.org/10.1007/s11802-005-0011-9>
- 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>
- 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>
- Naeher S., Suga H., Ogawa N.O. et al.* 2016. Distributions and compound-specific isotopic signatures of sedimentary chlorins reflect the composition of photoautotrophic communities and their carbon and nitrogen sources in Swiss lakes and the Black Sea // *Chem. Geol.* V. 443. P. 198.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.04.029>
- Rasiq K.T., Kurian S., Karapurkar S.G., Naqvi S.W.A.* 2016. Sedimentary pigments and nature of organic matter within the oxygen minimum zone (OMZ) of the Eastern Arabian Sea (Indian margin) // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* V. 176. P. 91.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.04.013>
- 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 Reservoir Manage.* V. 33. № 4. P. 369.  
<https://doi.org/10.1080/10402381.2017.1312648>
- Romankevich E.A., Vetrov A.A., Peresykin V.I.* 2009. Organic matter of the World Ocean // *Russian Geology and Geophysics*. V. 50. № 4. P. 299.  
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.03.013>
- Schüller S.E., Bianchi T.S., Li X. et al.* 2015. Historical reconstruction of phytoplankton composition in estuaries of Fiordland, New Zealand: the application of plant pigment biomarkers // *Estuaries Coasts*. V. 38. № 1. P. 56.  
<https://doi.org/10.1007/s12237-014-9771-z>
- Sigareva L.Ye., Mineyeva N.M., Timofeyeva N.A.* 2019. Chlorophyll *a* content in the near-bottom layer of water of the Rybinsk Reservoir (the Upper Reaches of the Volga River, Russian Federation) // *Gydrobiol. Zh.* V. 55. № 1. P. 58.  
<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i1.60>
- Swain E.B.* 1985. Measurement and interpretation of sedimentary pigments // *Freshwater Biol.* V. 15. № 1. P. 53.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1985.tb00696.x>
- Szymczak-Żyła M., Kowalewska G.* 2009. Chloropigments *a* in sediments of the Gulf of Gdansk deposited during the last 4000 years as indicators of eutrophication and climate change // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* V. 284. № 3–4. P. 283.  
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.10.007>
- Timofeeva N.A., Perova S.N., Sigareva L.E.* 2018a. Distribution of sedimentary pigments and macrozoobenthos in the deepwater part of the Rybinsk Reservoir // *Contemporary Problems of Ecology*. V. 11. № 6. P. 652.  
<https://doi.org/10.1134/S1995425518060100>
- Timofeeva N.A., Sigareva L.E., Gusakov V.A., Zakonov V.V.* 2018b. Content of plant pigments in the bottom sediments of the water bodies of Vietnam // *Inland Water Biology*. V. 11. № 3. P. 278.  
<https://doi.org/10.1134/S1995082918030215>
- Tse T.J., Doig L.E., Leavitt P.R. et al.* 2015. Long-term spatial trends in sedimentary algal pigments in a narrow river-valley reservoir, Lake Diefenbaker, Canada // *J. Great Lakes Res.* V. 41. Suppl. 2. P. 56.  
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.08.002>

## Comparative Analysis of Chlorophyll *a* Content in Freshwater and Marine Waterbodies

L. E. Sigareva<sup>1, \*</sup>, T. G. Koreneva<sup>2</sup>, N. M. Mineeva<sup>1</sup>, and N. A. Timofeeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

<sup>2</sup>*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

*\*e-mail: sigareva@ibiw.ru*

The data on chlorophyll content in the water and bottom sediments in freshwater Rybinsk Reservoir (Upper Volga) and Aniva Sea Bay (Sea of Okhotsk) are summarized. The average concentration of chlorophyll *a* in plankton of the reservoir is  $23.0 \pm 1.9 \mu\text{g/L}$ , in the bay  $0.77 \pm 0.06 \mu\text{g/L}$ , in the bottom sediments  $144.2 \pm 14.9$  and  $8.2 \pm 0.7 \mu\text{g/g}$  of dry sediment, respectively. Correlation between pigment concentrations in the euphotic zone, in the aphotic bottom layer, the whole column of water and the upper layer of bottom sediments, as well as the relationship of pigments with depth (within 6–100 m) and transparency (from 1 to 18 m) were revealed. It is shown that the general relations for two water bodies are approximated by nonlinear equations with determination coefficients ( $R^2$ ) from 0.37 to 0.93. The nature of the relationship between pigment indices is similar in both water bodies.

*Keywords:* chlorophyll, euphotic zone, aphotic zone, reservoir, sea bay