

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРУЖНОГО ФЛУОРИМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

К. А. Боровкова^{1,2}, С. В. Александров^{1,2}, А. В. Килесо²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. Невского, 14,
e-mail: kristina.borovkova.99@bk.ru;

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: hydrobio@mail.ru

Концентрация хлорофилла «а» является одним из параметров экологического мониторинга. Целью исследования было выявление сезонных зависимостей между величинами хлорофилла «а», измеренными прямым (экстрактным, спектрофотометрическим) методом и погружным флуориметром, и улучшение зависимостей с учетом факторов среды. Работы проводились в течение 5 экспедиций в 2023–2025 гг. в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря. Сравнение данных погружного флуориметра с прямыми измерениями показало слабую зависимость, особенно в период активной вегетации фитопланктона (весна, лето) в фотическом слое, что связано с занижением значений, получаемых погружным флуориметром. Учет в уравнениях параметров мутности и температуры позволил увеличить коэффициенты детерминации почти в два раза для теплого периода. В ноябре–декабре зависимость осталась на том же уровне, что обуславливается невысокими значениями хлорофилла «а» в этот период. Полученные результаты подчеркивают необходимость уточнения региональных погрешностей измерений, получаемых с помощью погружного флуориметра, с целью дальнейшего использования в рамках мониторинга Балтийского моря.

Ключевые слова: фитопланктон, флуоресценция хлорофилла «а», экологический мониторинг, Балтийское море

Введение

Современные наблюдения выявляют существенные изменения в экосистеме Балтийского моря, обусловленные глобальными климатическими колебаниями, антропогенным воздействием и эвтрофированием вод. Юго-Восточная Балтика относится к районам с наибольшим уровнем эвтрофирования из-за длительного значительного поступления биогенных веществ со стоком крупнейших рек Балтийского моря (Висла, Неман) (Snoeijjs-Leijonmalm et al., 2017; Viitasalo et al., 2022). Значительное внимание уделяется мониторингу и оценке экологического состояния Балтийского моря (HELCOM, 2013). С 2022 г. в российском секторе Балтийского моря реализуется программа климатического и экологического мониторинга в рамках работы

консорциума «ОКЕАН: МОНИТОРИНГ И АДАПТАЦИЯ» (Mosharov et al., 2022; Bashirova et al., 2023; Mosharov et al., 2024). В 2021 г. в целях осуществления мониторинга потоков парниковых газов в Балтийском море организована морская площадка карбонового полигона «Росянка» в рамках пилотного проекта Минобрнауки России (оператор – БФУ им. И. Канта).

Концентрация хлорофилла (Хл «а») является важнейшим параметром для оценки обилия фитопланктона и эвтрофирования водных экосистем, поэтому используется в качестве одного из основных мониторинговых индикаторов в комплексной оценке Балтийского моря (Mosharov et al., 2024). Наиболее точные измерения Хл «а» основаны на прямом методе, включающем отбор проб воды, экстракцию пигментов фитопланктона и последующее спектрофотометрическое измерение (Jeffrey et al., 1997; Александров, Семенова, 2023). Данный метод трудоемок и позволяет выполнять ограниченное количество измерений. В качестве экспресс-метода разрабатывается метод измерения флуоресценции пигментов *in vivo* (диапазон 680–685 нм) с помощью погружных флуориметров, что позволяет получать данные в вертикальном профиле с высокой частотой, в отличие от стандартных дискретных проб (Ostrowska et al., 2015). Анализ данных хлорофилла «а» с зондирующего комплекса вместе с традиционными лабораторными измерениями уже проводился в Черном и Охотском морях (Мансурова и др., 2023; Моисеева и др., 2024), где было выявлено значительное занижение данных Хл «а», полученных флуоресцентным методом, по сравнению с лабораторным, а также отмечалась региональная вариативность взаимосвязей флуоресценции хлорофилла с факторами среды. В частности, в исследовании Балтийского моря уже применялся современный комплекс бортового, проточного и погружного флуориметров, разработанный на кафедре МГУ (Маторин и др., 2006). Однако было отмечено, что полномасштабный анализ изменений экосистемы под действием климатических и антропогенных факторов невозможен без длительных систематических исследований состояния фитопланктонного сообщества (Маторин и др., 2006). Следовательно, применение погружных флуориметров для целей экологического мониторинга требует многолетнего набора данных, а также верификации и региональной коррекции данных, получаемых в юго-восточной части Балтийского моря. Цель исследования – выявление сезонных зависимостей между величинами Хл «а», измеренными прямым методом и погружным флуориметром, в Юго-Восточной Балтике и улучшение зависимостей с учетом других параметров воды.

Материалы и методы исследований

Сезонные исследования в юго-восточной части Балтийского моря (рисунок 1) выполнялись в переходный осенне-зимний (ноябрь, декабрь 2023 г.), летний (июль, август 2024 г.) и весенний (апрель 2025 г.) периоды на судах «Академик Борис Петров» (рейсы 54, 55, 56, 60) и «Академик Иоффе» (рейс 68). Отбор проб на хлорофилл «а» производился с помощью батометров Нискина независимо от времени суток. Основная часть пробоотбора проводилась в благоприятных погодных

условиях, исключая влияние значительных штормовых волнений. Содержание хлорофилла «а» на горизонтах 0–1 м, 10 м, над термоклин, над галоклином и у дна определялось следующим образом: пробы воды (от 0.5 до 1.5 л) фильтровали через мембранные фильтры Владипор МФАС-МА-6 (Россия, диаметр пор 0.3 мкм) на борту судна. Измерения ацетоновой вытяжки после центрифугирования осуществляли согласно ГОСТ 17.1.04.02-90 с помощью спектрофотометра СФ-56 в лаборатории института.

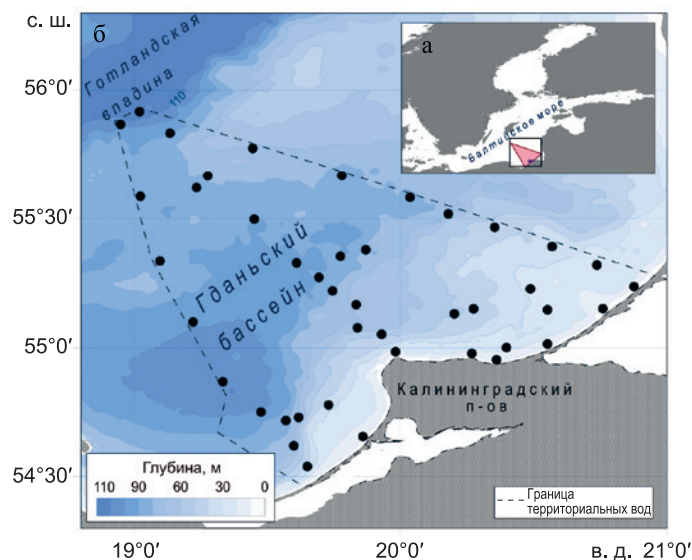


Рис. 1 – Расположение района исследований (а) и точек отбора проб (б) с указанием количества измерений в Балтийском море в 2023–2025 гг.

С помощью погружного флуориметра (Seapoint Chlorophyll Fluorometer, Норвегия, диапазон 0–75 мкг/л, чувствительность (sensitivity): 0.03 мкг/л), установленного на зонде SAIV SD208 (Норвегия), хлорофилл «а» измерялся от поверхности до дна (в диапазоне глубин 0–105 м). Дополнительно зондом определялась мутность (диапазон 0–750, ЕМФ единицы мутности по формазину на 1 литр (дм³)), температура (°С), соленость (εps). Для сравнения параметров использованы данные флуоресценции (Хл фл), соответствующие горизонтам отбора проб для прямых измерений (Хл «а»). Анализ данных проводили по слоям, различающимся условиями развития фитопланктона: фотический слой (0–25 м) и в зоне галоклин–дно. Для сравнения параметров использовался корреляционный анализ. Статистическая обработка выполнялась с помощью программы Excel.

Результаты и обсуждение

Для Балтийского моря характерна значительная сезонная и пространственная изменчивость природных условий, определяющих развитие фитопланктона (Кудрявцева и др., 2019). В конце осени и зимой в условиях светового и температурного

лимитирования наблюдается слабая вегетация фитопланктона и низкие концентрации Хл «а». С ноября по декабрь 2023 г. величины Хл «а», измеренные прямым методом, в фотическом слое (0–25 м) были в пределах 0.5–1.9 мкг/л, при этом средние концентрации снижались с 1.2 до 0.9 мкг/л одновременно с температурой воды. В слое галоклина и у дна (глубины 35–85 м) величины Хл «а» были ниже (в среднем 0.6–0.7 мкг/л).

В весенний период (апрель–июль для Юго-Восточной Балтики) начинается интенсивное развитие фитопланктона. Может наблюдаться значительная пространственная изменчивость с максимумом в прибрежных районах, куда поступает речной сток. В апреле 2025 г. в фотическом слое (0–15 м) наблюдалось активное развитие водорослей, и величины Хл «а» достигали 7 мкг/л и в среднем были 2.9 мкг/л. В слое галоклина и у дна значения снижались (в среднем 1.0 мкг/л).

Летний период характеризуется активной вегетацией фитопланктона, прежде всего, цианобактерий, которая может достигать уровня «цветения» воды в условиях интенсивного прогрева вод (Александров С. В. и др., 2023). В начале июля 2024 г. концентрации Хл «а» в фотическом слое (0–20 м) были максимальны (в среднем 3.3 мкг/л). Прогрев воды в это время достигал 20 °С. В позднелетний период (в конце августа 2024 г.) зафиксировано сезонное снижение обилия фитопланктона: Хл «а» в слое фотосинтеза уменьшился вдвое (в среднем 1.4 мкг/л). Сезонный термоклин препятствовал перемешиванию вод, и в слое галоклина (50–60 м) до дна (> 80 м) концентрация Хл «а» резко снижалась (в среднем 0.2–0.5 мкг/л) за счет клеток неактивного фитопланктона, опускающегося из фотического слоя. В исследованных районах концентрации Хл «а» летом составляли 0.8–4 мкг/л.

Сезонная динамика Хл *фл* также отражала развитие фитопланктона в течение года. С ноября по декабрь 2023 г. величины Хл *фл* находились в пределах 0.3–1.5 мкг/л для фотического слоя (ФС), и 0.1–1.2 мкг/л в слое галоклин–дно. В апреле пределы Хл *фл* составили 0.1–2.5 для ФС, для слоя галоклин–дно – 0.1–1.3; в июле: 0.7–2.5 – для ФС, 0.1–0.8 – для слоя галоклин–дно; в августе: 0.2–1.1 – для ФС, 0.03–0.3 – для слоя галоклин–дно.

На показания флуоресценции погружного флуориметра влияет присутствие в воде оптически активных компонентов (взвесь терригенного и органического происхождения) (De Oliveira et al., 2018). Средние значения мутности в ноябре–декабре составили 0.70–1.12 ЕМФ для ФС, 0.27–0.36 – ЕМФ в слое галоклин–дно; в теплый период (июль, август): 1.73–1.17 ЕМФ для ФС, для слоя галоклин–дно – 0.72–0.77 ЕМФ; в апреле: 0.86 ЕМФ для ФС, 0.37 ЕМФ для слоя галоклин–дно. Сопутствующим измеряемым параметром являлась также температура, которая оказывает влияние на состав фитопланктона и его распределение в воде. Диапазон средних значений температуры в ноябре–декабре составлял 9.5–6.7 °С для верхнего слоя, 8.3–7.1 °С – для слоя галоклин–дно; в теплый период – 18.2–19.5 °С для ФС, для слоя галоклин–дно – 7.2–6.2 °С; в апреле – 6.3 °С для ФС, 5.3 °С – для слоя галоклин–дно.

Сравнение данных погружного флуориметра с прямыми измерениями Хл «а» представлено в виде уравнений линейной регрессии (рисунок 2). В среднем флуориметр регистрировал более низкие величины, по сравнению с прямым методом

(в 2–2.5 раза), что требует коррекции его данных. В фотическом слое (от 0–1 до 10–25 м) в период активного развития фитопланктона и значительного диапазона Хл «а» (весна, лето) корреляция между данными флуориметра и прямыми измерениями была низкой ($R^2 = 0.21–0.30$). В ноябре–декабре коэффициент детерминации был более высоким ($R^2 = 0.53$), однако это период слабого развития фитопланктона (рисунок 2). У дна и в слое галоклина (диапазон глубин – 30–105 м) коэффициент детерминации был немного выше ($R^2 = 0.29–0.60$) с максимумом весной. Однако на данных глубинах концентрации Хл «а» низки и фитопланктон находится в неактивном состоянии за счет опускающихся из фотического слоя клеток, поэтому достоверность результатов корреляции ниже по сравнению с фотическим слоем. Таким образом, в период активного развития фитопланктона (весна, лето) наблюдалось выраженное различие в степени зависимости между фотическим слоем и в слое галоклин–дно. В период слабой вегетации фитопланктона (ноябрь–декабрь) зависимость в обоих слоях была сопоставима (рисунок 2).

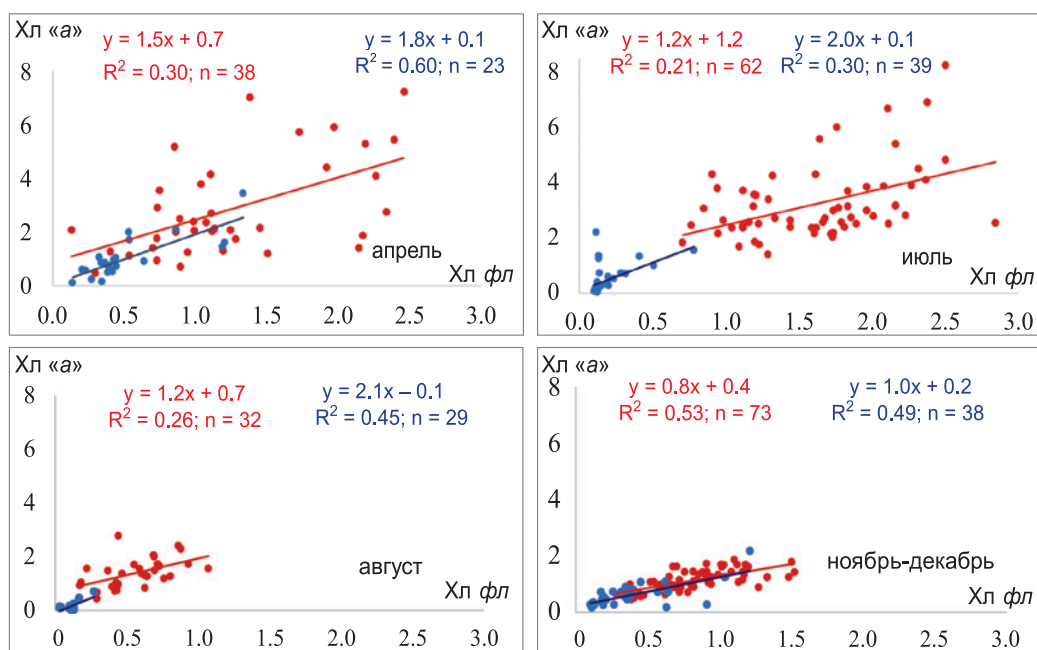


Рис. 2 – Зависимость между концентрациями хлорофилла «а» (мкг/л), полученными прямым методом (Хл «а») и погружным флуориметром (Хл фл) в фотическом слое (красные точки) в слое галоклин–дно (синие точки)

Слабая корреляция данных погружного флуориметра (Хл фл) с прямым измерением (Хл «а») связана с отсутствием прямой зависимости между концентрацией фотосинтетических пигментов и измеряемой флуоресценцией (Rolland et al., 2010; Ostrowska, 2012). Эти ошибки обусловлены изменениями флуоресцентных свойств пигментов в различных условиях окружающей среды (Ciotti et al., 2002). Например, изменениями спектрального состава подводного излучения, различным составом пигментов в фитопланктоне, эффектами взаимного затенения клетками, а также нелинейным влиянием изменчивости различных факторов окружающей среды на эффективность флуоресценции (Ciotti et al., 2002; Ficek et al., 2004). Тенденция к занижению

концентраций Хл «а», определенных флуориметрическим методом, по отношению к контрольным уровням концентраций Хл «а» была отмечена для акваторий Балтийского, Черного и других морей (Ostrowska et al., 2012; Мансурова и др., 2023). Вероятно, чем большее обилие фитопланктона и концентрация Хл «а», тем значительнее сказываются эти эффекты. Как следствие, наши исследования показали слабую зависимость с данными флуориметра в фотическом слое весной и летом. Увеличение корреляции в слое галоклина и у дна, возможно, обусловлено невысокими значениями Хл «а», за счет чего разница между данными была менее выражена. Также это подтверждается одинаковой, достаточно высокой, зависимостью в конце осени – зимой как в фотическом слое, так и глубже (рисунок 2).

Добавление в уравнение линейной регрессии параметров мутности и температуры значительно улучшило зависимости для фотического слоя в период активного развития планктона. В таблице 1 представлены полученные уравнения.

Табл. 1 – Линейные уравнения регрессии

Месяц	Уравнение			
	Хл «а» = $\beta_1 \times \text{Хл фл} + \beta_2 \times \text{мутность} + \beta_3 \times \text{температура} + \text{константа}$ ± 95 % доверительный интервал для коэффициента			
	β_1 (Хл фл)	β_2 (мутность)	β_3 (температура)	Константа
апрель 2025 г.	1.31 ± 0.71 (p = 0.001)	1.14 ± 0.6 (p = 0.001)	-0.14 ± 0.46 (p = 0.5)	1.10 ± 3.05
июль 2024 г.	1.18 ± 0.52 (p = 0.0001)	0.32 ± 0.3 (p = 0.038)	0.46 ± 0.29 (p = 0.003)	-7.40 ± 5.22
август 2024 г.	0.91 ± 0.77 (p = 0.022)	0.10 ± 0.13 (p = 0.128)	0.23 ± 0.27 (p = 0.094)	-3.67 ± 5.12
ноябрь, декабрь 2023 г.	0.94 ± 0.21 (p = 0.0001)	0.03 ± 0.05 (p = 0.154)	-0.03 ± 0.04 (p = 0.204)	0.57 ± 0.34

Наибольший вклад в улучшение зависимостей внес параметр мутности. Температура оказала меньшее влияние на увеличение R² (рисунок 3). Коэффициенты детерминации R² увеличились на 73 % в апреле, на 95 % в июле, на 34 % в августе при добавлении в уравнение параметра мутности (рисунок 3). Дальнейшее включение параметра температуры внесло менее значительные изменения: R² увеличился на 21 % для июля, на 17 % для августа, и всего на 2 % для апреля. В ноябре–декабре коэффициент детерминации увеличивался незначительно (менее 6 %) при добавлении обоих параметров.

Повышение R² в теплый сезон связано с компенсацией влияния мутности на флуоресценцию. Взвешенные частицы, концентрируясь в фотическом слое летом, поглощают и рассеивают возбуждающий свет, препятствуя его прохождению. Де Оливейра и др. обнаружили обратную зависимость между концентрацией взвешенных частиц и флуоресценцией. Эта зависимость линейна при низкой мутности, но становится нелинейной при высокой (De Oliveira et al., 2018). В теплый период мутность в фотическом слое в Балтийском море имеет наибольшие значения в связи с обилием планктона, что объясняет значительное улучшение коэффициента в верхнем слое в теплый период.

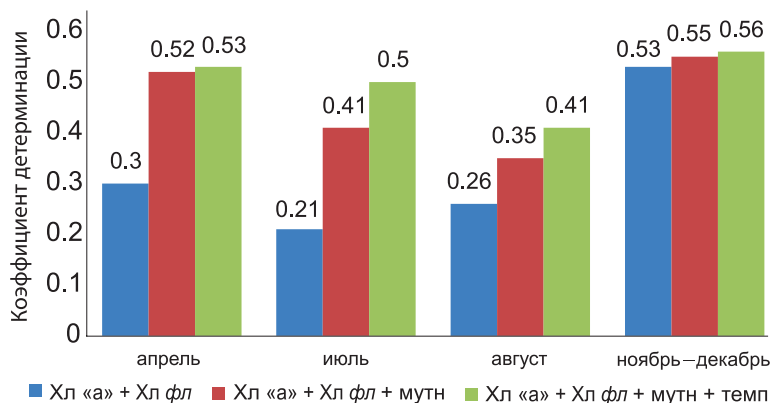


Рис. 3 – Коэффициенты детерминации линейной зависимости между концентрациями хлорофилла «а», полученными прямым методом, и погружным флуориметром (синим); с учетом мутности (красным); с учетом температуры воды (желтым)

Полученные зависимости позволяют ориентировочно оценивать общий уровень Хл «а» в холодные периоды года – весной, осенью и зимой. В то же время сохраняется значительный разброс единичных измерений, что не позволяет получить единое уравнение зависимости и корректно оценивать пространственную и вертикальную изменчивость Хл «а» в Юго-Восточной Балтике, а также требует дальнейшего уточнения и пересчета с целью достижения более высокой точности оценок Хл «а» по данным инструментальных измерений в водной толще в будущем. Для уточнения методики проведения экспедиционных исследований, а также повышения точности оценок Хл «а», дальнейшие измерения планируется проводить при более детальных настройках измерительного диапазона погружного флуориметра Seapoint Chlorophyll Fluorometer.

Заключение

На основе экспедиционных исследований в 2023–2025 гг. получены данные о сезонной изменчивости концентрации Хл «а» в Юго-Восточной Балтике и рассмотрены зависимости между величинами Хл «а», измеренными прямым методом и погружным флуориметром. Сравнение данных погружного флуориметра с прямыми (спектрофотометрическое измерение экстракта) измерениями Хл «а» показало слабую зависимость, особенно в период активной вегетации фитопланктона (весна, лето) в фотическом слое: значения коэффициентов детерминации не превышали 0.3. Величины Хл по флуориметру были значительно ниже (в среднем в 2–2.5 раза), что не позволяет их использовать без коррекции. Дополнение в уравнение линейной регрессии таких переменных, как мутность и температура воды, значительно улучшило получаемые зависимости для периода активного развития фитопланктона (весна, лето): коэффициенты детерминации были вдвое выше. Данные погружного флуориметра можно использовать для ориентировочной оценки Хл «а» с применением линейного уравнения регрессии, учитывающего мутность и температуру воды. С учетом корректировки

уравнения, данные погружного флуориметра можно использовать для предварительной оценки количества Хл «а» в рамках проведения оперативного мониторинга. Для максимально точного расчета Хл «а» по данным погружного флуориметра необходимо использование корреляционных коэффициентов для слоев 0–25 м и ГК в разные сезоны, а также добавление в исследование данных о видовом составе фитопланктона. Лучше сначала смотреть на уровень мутности и в соответствии с этим решать, стоит ли брать данные по хлорофиллу с зонда, или мутность слишком высокая и нужно делать измерения классическим способом.

Благодарности. Исследование хлорофилла «а» выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Анализ данных погружного флуориметра выполнен при поддержке государственного задания БФУ им. И. Канта (тема № FZWM-2024-0015). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки ПС «Академик Иоффе» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН». Авторы благодарят Ульянову М. О., Мошарова С. А. и Баширову Л. Д. за ценные рекомендации. Авторы также благодарят анонимных рецензентов за значительный вклад в улучшение статьи.

Список литературы

1. Александров С. В., Гусев А. А., Семенова А. С. Планктонные и бентосные сообщества юго-восточной части Балтийского моря в летний период 2018–2019 гг. // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51. № 1. С. 91–113. EDN: IZCNKS. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).5)
2. Александров С. В., Семенова А. С. Эвтрофирование вод и распределение зоопланктона Балтийского моря в условиях аномального прогрева вод летом 2021 г. // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51. № 2. С. 70–92. EDN: DPLOSH. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(2\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(2).1)
3. Кудрявцева Е. А., Александров С. В. Гидролого-гидрохимические основы первичной продуктивности и районирование российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 1. С. 56–71. EDN: LWPEQE. <https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71>
4. Мансурова И. М., Стельмах Л. В., Фарбер А. А. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла «а» в Черном море в летний и осенний периоды по данным зондирующего комплекса и прямых измерений // *Системы контроля окружающей среды*. 2023. № 2 (52). С. 84–91. EDN: KMVZLG. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2023-2-84-91>
5. Маторин Д. Н., Погосян С. И., Осипов В. А., Хантер Р., Рубин А. Б. Исследование состояния фотосинтетического аппарата фитопланктона Балтийского моря флуоресцентными методами // *Вестник Московского университета. Серия 16: Биология*. 2006. № 1. С. 61–66. EDN: HULSDP
6. Моисеева Н. А., Чурилова Т. Я., Скороход Е. Ю., Салюк П. А., Ефимова Т. В., Давыдова Д. Г., Саушева А. А., Самойлов М. А. Связь концентрации хлорофилла а с интенсивностью флуоресценции, регистрируемой погружным зондом в прибрежной акватории Камчатки // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. 2024. № 3. С. 33–45. ISSN: 2619-0605. EDN: NUATCX

7. *Bashirova L., Sivkov V., Ulyanova M., Gavrikov A., Artamonov A.* Climate and environmental monitoring of the Baltic Sea: general principles and approaches // *RT&A*. 2023. Vol. 18. No. S5 (75). P. 164–171. EDN: **UMBIND**. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-164-171>
8. *Ciotti A. M., Lewis M. R., Cullen J. J.* Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient // *Limnology and Oceanography*. 2002. Vol. 47. No. 2. P. 404–417. EDN: **LVCWDZ**. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0404>
9. *De Oliveira G., Bertone E., Stewart R., Awad J., Holland A., O'Halloran K., Bird S.* Multi-parameter compensation method for accurate in situ fluorescent dissolved organic matter monitoring and properties characterization // *Water*. 2018. Vol. 10 (9). P. 1146. <https://doi.org/10.3390/w10091146>
10. *Ficek D., Majchrowski R., Kaczmarek S., Ston-Egiert J., Wozniak B., Dera J.* Spectra of light absorption by phytoplankton pigments in the Baltic; conclusions to be drawn from a Gaussian analysis of empirical data // *Oceanology*. 2004. Vol. 46. No. 4. P. 533–555. EDN: **LZURFB**
11. HELCOM: Eutrophication in the Baltic Sea – Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region. *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2013. No. 133. P. 134.
12. *Jeffrey S. W., Mantoura R. F. C., Wright S. W.* *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*. Paris: UNESCO Publishing, 1997. 661 p. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80255-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80255-2)
13. *Mosharov S., Mosharova I., Borovkova K., Bubnova E.* Variability of primary productivity as an initial link in carbon flux under the influence of hydrological conditions in the Baltic Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Vol. 24. No. 2. P. 1–14. EDN: **YCZUCI**. <https://doi.org/10.2205/2024ES000888>
14. *Mosharov S., Mosharova I., Dmitrieva O., Semenova A., Ulyanova M.* Seasonal variability of plankton production parameters as the basis for the formation of organic matter flow in the Southeastern Part of the Baltic Sea // *Water*. 2022. Vol. 14. No. 24. P. 4099. EDN: **ICRUNR**. <https://doi.org/10.3390/w14244099>
15. *Ostrowska M.* Model dependences of the deactivation of phytoplankton pigment excitation energy on environmental conditions in the sea // *Oceanology*. 2012. Vol. 54. No. 4. P. 545–564. EDN: **RQMZLD**. <https://doi.org/10.5697/oc.54-4.545>
16. *Ostrowska M., Ston-Egiert J., Wozniak B.* Modified methods for defining the chlorophyll concentration in the sea using submersible fluorimeters – Theoretical and quantitative analysis // *Continental Shelf Research*. 2015. No. 109. P. 46–54. EDN: **VGKLDX**. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.009>
17. *Rolland A., Rimet F., Jacquet S.* A 2-year survey of phytoplankton in the Marne Reservoir (France): a case study to validate the use of an in situ spectrofluorometer by comparison with algal taxonomy and chlorophyll a measurements // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2010. No. 398. P. 01–19. <https://doi.org/10.1051/kmae/2010023>
18. *Snoeijs-Leijonmalm P., Schubert H., Radziejewska T.* *Biological Oceanography of the Baltic Sea*. Springer, 2017. 683 p. EDN: **XNPAXL**
19. *Viitasalo M., Bonsdorff E.* Global climate change and the Baltic Sea ecosystem: direct and indirect effects on species, communities and ecosystem functioning // *Earth Syst. Dynam.* 2022. Vol. 13. No. 2. P. 711–747. EDN: **IHHUHU**. <https://doi.org/10.5194/esd-13-711-2022>

Статья поступила в редакцию 24.11.2025, одобрена к печати 10.02.2026.

Для цитирования: *Боровкова К. А., Александров С. В., Килесо А. В.* Использование погружного флуориметра для исследования сезонной динамики хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря // *Океанологические исследования*. 2026. Т. 54. № 1. С. 39–50. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).3](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).3)

USING SUBMERSIBLE FLUORIMETER TO STUDY SEASONAL DYNAMICS OF CHLOROPHYLL “a” IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE BALTIC SEA

K. A. Borovkova^{1,2}, S. V. Aleksandrov^{1,2}, A. V. Kileso²

¹*Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russia,
e-mail: kristina.borovkova.99@bk.ru;*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: hydrobio@mail.ru*

Chlorophyll “a” concentration is a parameter used in environmental monitoring. The aim of this study was to identify seasonal dependencies between chlorophyll “a” values measured by directly method (extractively, spectrophotometrically) and by submersible fluorimeter and to improve them by taking into account other water parameters. The study was done during five cruises from 2023 to 2025 in the Russian sector of the southeastern part of the Baltic Sea. A comparison of submersible fluorimeter data with direct measurements revealed a weak correlation, particularly during periods of active phytoplankton growth (spring and summer) in the photic layer, due to underestimation of the submersible fluorimeter sensor values. Introducing turbidity and temperature variables into the equations allowed the determination coefficients to be nearly doubled for the warm period. In November and December, the correlation remained at the same level, which is due to initially low chlorophyll “a” values in this period. The obtained data highlight the need to clarify the regional uncertainty of measurements obtained using the submersible fluorimeter for future use in monitoring the Baltic Sea.

Keywords: phytoplankton, chlorophyll “a” fluorescence, environmental monitoring, Baltic Sea

Acknowledgement: The chlorophyll “a” study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025). The analysis of data from the submersible fluorimeter was performed within the state assignment of the Immanuel Kant Baltic Federal University (BFU) (Project No. FZWM-2024-0015). Field studies were carried out using the equipment of the USF R/V “Akademik Ioffe” as part of the Center for the collective use of scientific equipment “Scientific fleet of IO RAS”. The authors thank M. O. Ulyanova, S. A. Moshkarova, and L. D. Bashirova for their valuable recommendations. The authors also thank the anonymous reviewers for their significant contribution to improving the article.

References

1. Aleksandrov, S. V., A. A. Gusev, and A. S. Semenova, 2023: Planktonic and benthic communities of the southeastern Baltic Sea in the summer period 2018–2019. *Journal of Oceanological research*, **51** (1), 91–113, EDN: IZCNKS, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).5)

2. Aleksandrov, S. V. and A. S. Semenova, 2023: Water eutrophication and distribution of zooplankton in the Baltic Sea under conditions of abnormal water heating in the summer of 2021. *Journal of Oceanological research*, **51** (2), 70–92, EDN: DPLOSH, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(2\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(2).1)
3. Bashirova, L., V. Sivkov, M. Ulyanova, A. Gavrikov, and A. Artamonov, 2023: Climate and environmental monitoring of the Baltic Sea: general principles and approaches. *RT&A*, **18**, S5 (75), 164–171, EDN: UMBIND, <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-164-171>
4. Ciotti, A. M., M. R. Lewis, and J. J. Cullen, 2002: Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, **47** (2), 404–417, EDN: LVCWDZ, <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0404>
5. De Oliveira, G., E. Bertone, R. Stewart, J. Awad, A. Holland, K. O'Halloran, and S. Bird, 2018: Multi-parameter compensation method for accurate in situ fluorescent dissolved organic matter monitoring and properties characterization. *Water*, **10** (9), 1146, <https://doi.org/10.3390/w10091146>
6. Ficek, D., R. Majchrowski, S. Kaczmarek, J. Ston-Egiert, B. Wozniak, and J. Dera, 2004: Spectra of light absorption by phytoplankton pigments in the Baltic; conclusions to be drawn from a Gaussian analysis of empirical data. *Oceanology*, **46** (4), 533–555, EDN: LZURFB
7. HELCOM: Eutrophication in the Baltic Sea – Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region. *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2013, **133**, P. 134.
8. Jeffrey, S. W., R. F. C. Mantoura, and S. W. Wright, 1997: *Phytoplankton pigments in oceanography: guide-lines to modern methods*. Paris, UNESCO Publishing, 661 p., [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80255-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80255-2)
9. Kudryavtseva, E. A. and S. V. Aleksandrov, 2019: Hydrological and hydrochemical foundations of primary productivity and zoning of the Russian sector of the Gdansk basin of the Baltic Sea. *Oceanology*, **59** (1), 56–71, EDN: LWPEQE, <https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71>
10. Mansurova, I. M., L. V. Stelmakh, and A. A. Farber, 2023: Vertical distribution of chlorophyll a concentration in the Black Sea in summer and autumn periods according to data from a sounding complex and direct measurements. *Environmental Monitoring Systems*, **2** (52), 84–91, EDN: KMVZLG, <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2023-2-84-91>
11. Matorin, D. N., S. I. Pogosyan, V. A. Osipov, R. Kapter, and A. B. Rubin, 2006: Study of the state of the photosynthetic apparatus of phytoplankton of the Baltic Sea by fluorescent methods. *Bulletin of Moscow Universit, Series 16: Biology*, **1**, 61–66, EDN: HULSDP
12. Moiseeva, N. A., T. Ya. Churilova, E. Yu. Skorokhod, P. A. Salyuk, T. V. Efimova, D. G. Davydova, A. A. Sausheva, and M. A. Samoilov, 2024: Relationship of chlorophyll a concentration with fluorescence intensity registered by a submersible probe in the coastal water area of Kamchatka. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*, **3**, 33–45, ISSN: 2619-0605, EDN: NUATCX
13. Mosharov, S., I. Mosharova, K. Borovkova, and E. Bubnova, 2024: Variability of primary productivity as an initial link in carbon flux under the influence of hydrological conditions in the Baltic Sea. *Russian Journal of Earth Sciences*, **24** (2), 1–14, EDN: YCZUCI, <https://doi.org/10.2205/2024ES000888>
14. Mosharov, S., I. Mosharova, O. Dmitrieva, A. Semenova, and M. Ulyanova, 2022: Seasonal variability of plankton production parameters as the basis for the formation of organic matter flow in the Southeastern Part of the Baltic Sea. *Water*, **14** (24), 4099, EDN: ICRUNR, <https://doi.org/10.3390/w14244099>
15. Ostrowska, M., 2012: Model dependences of the deactivation of phytoplankton pigment excitation energy on environmental conditions in the sea. *Oceanology*, **54** (4), 545–564, EDN: RQMZLD, <https://doi.org/10.5697/oc.54-4.545>.

16. Ostrowska, M., J. Ston-Egiert, and B. Wozniak, 2015: Modified methods for defining the chlorophyll concentration in the sea using submersible fluorimeters – Theoretical and quantitative analysis. *Continental Shelf Research*, **109**, 46–54, EDN: VGKLDX, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.009>
17. Rolland, A., F. Rimet, and S. Jacquet, 2010: A 2-year survey of phytoplankton in the Marne Reservoir (France): a case study to validate the use of an in situ spectrofluorometer by comparison with algal taxonomy and chlorophyll “a” measurements. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, **398**, 01–19, <https://doi.org/10.1051/kmae/2010023>
18. Snoeijs-Leijonmalm, P., H. Schubert, and T. Radziejewska, 2017: *Biological Oceanography of the Baltic Sea*. Springer, 683 p., EDN: XNPAXL
19. Viitasalo, M. and E. Bonsdorff, 2022: Global climate change and the Baltic Sea ecosystem: direct and indirect effects on species, communities and ecosystem functioning. *Earth Syst. Dynam.*, **13** (2), 711–747, EDN: IHUHU, <https://doi.org/10.5194/esd-13-711-2022>

Submitted 24.11.2025, accepted 10.02.2026.

For citation: Borovkova, K. A., S. V. Aleksandrov, and A. V. Kilesa, 2026: Using submersible fluorimeter to study seasonal dynamics of chlorophyll “a” in the southeastern part of the Baltic Sea. *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 39–50, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).3](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).3)

利用潜水荧光仪研究波罗的海南部海域叶绿素*a*季节动态

K. A. Borovkova^{1,2}, S. V. Aleksandrov^{1,2}, A. V. Kilesa²

¹Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Nevsky str., Kaliningrad, 邮编: 236041, Russia,
电子邮件: kristina.borovkova.99@bk.ru;

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia,
电子邮件: hydrobio@mail.ru

叶绿素*a*浓度是生态监测的重要参数之一。本研究旨在识别直接测量法与潜水荧光仪测量值之间的季节相关性，并考虑环境因素以优化其关系。研究基于2023–2025年间在波罗的海南部俄罗斯海域进行的5次航次调查数据。对比分析表明，潜水荧光仪数据与直接测量值的相关性较弱，尤其是在浮游植物生长旺盛期（春夏季）的真光层内，这归因于潜水荧光仪测量值的低估。将浊度和温度参数纳入方程后，暖季的决定系数提高了近一倍。而11月至12月期间，由于该时段叶绿素a浓度较低，其相关性基本保持不变。研究结果强调了校准潜水荧光仪在波罗的海监测应用中的区域性测量误差的必要性。

关键词：浮游植物·叶绿素*a*荧光·生态监测·波罗的海

致谢：本研究中叶绿素a的相关工作是在俄罗斯联邦科学与高等教育部下达给俄罗斯科学院希尔绍夫海洋研究所的国家任务（课题编号：FMWE-2024-0025）框架内完成的。潜水荧光仪数据的分析工作是在康德波罗的海联邦大学的国家任务（课题编号：FZWM-2024-0015）框架内完成的。现场研究使用了隶属于集体科学设备使用中心“俄罗斯科学院海洋研究所科考船队”的独特科研装置“阿卡杰米克·约费”号科考船。作者感谢M. O. Ulyanova、S. A. Moshkarova和L. D. Bashirova提出的宝贵建议。同时感谢匿名审稿人对本文改进作出的重要贡献。