Верификация алгоритма расчёта первичной продукции для юго-восточной части Балтийского моря по судовым и спутниковым данным

Е.А. Кудрявцева¹, Т.В. Буканова¹, С.В. Александров²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: kudryavtzeva@rambler.ru, tatiana.bukanova@gmail.com

² Атлантический филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Калининград, 236022, Россия E-mail: hydrobio@mail.ru

Для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря предложен алгоритм расчёта первичной продукции (PP), полученный по данными ежемесячных измерений PP in situ на буйковой станции в 2008-2009 гг. Алгоритм включает три составляющие: вертикальный профиль хлорофилла a (Chl a), параметр оценки распределения подводной фотосинтетически активной радиации и фотосинтетический параметр. Для восстановления вертикальных профилей Chl a по его концентрации в поверхностном слое использовано эмпирическое уравнение, разработанное ранее для Балтийского моря польскими океанологами. Толщина эвфотического слоя определена по концентрации Chl *a* в поверхностном слое по эмпирическому уравнению, полученному для района наблюдений. Фотосинтетический параметр вычислен из уравнения множественной регрессии, переменные в котором — температура воды и концентрация Chl a. Верификация алгоритма выполнена по материалам экспедиционных исследований, которые проводились в изучаемом районе между 2003 и 2020 гг., а также по спутниковым данным, осреднённым для двухнедельных периодов, совпадающих со сроками экспедиций. Представленный алгоритм имеет сходную эффективность с другими моделями РР, которые верифицировались для Балтийского моря. В отличие от них вычисленные по алгоритму значения РР в тёплый период года не занижаются, что имеет большое значение для изучения и предсказания динамики экосистемы изучаемого района. Несмотря на ограничения, полученные уравнения могут быть использованы для расчёта РР по спутниковым данным и помогут восполнить пробелы в натурных наблюдениях.

Ключевые слова: первичная продукция, хлорофилл *a*, вертикальное распределение, измерения *in situ*, алгоритм расчёта первичной продукции, спутниковые данные, Балтийское море

Одобрена к печати: 25.07.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-59-74

Введение

Первичная продукция фитопланктона (*анел.* primary production — PP) определяет поток энергии в морской пищевой сети и оказывает большое влияние на биогеохимический цикл углерода в Мировом океане. На нижнем уровне продуктивности вод находятся субтропические районы. В прибрежных апвеллингах PP может превышать 10 гС·м⁻²·сут⁻¹ (Daneri et al., 2000; Kulk et al., 2020). Наиболее важными факторами, контролирующими преобразование энергии, происходящее при фотосинтезе, выступают свет и его пропускание водной толщей, доступность биогенных элементов, наличие стратификации. В случае Балтийского моря эти факторы подвержены заметной сезонной, межгодовой и многолетней изменчивости, связанной с процессами, происходящими в океане и атмосфере (Omstedt et al., 2014; Stont, Bukanova, 2019). Кардинальные сдвиги в экосистеме моря, к которым во второй половине XX в. привела хозяйственная деятельность человека, вызвали существенное увеличение запаса биогенных элементов, циркулирующих в экосистеме и доступных для потребления фитопланктону (Kaczmarek et al., 1997; Łysiak-Pastuszak et al., 2014). В настоящее время роль антропогенного фактора, по-видимому, снизилась, а последствия сбросов биогенных элементов постепенно нивелируются (Murray et al., 2019). По результатам анализа исследований PP в период с 1993 по 2018 г. выявлена слабая отрицательная тенденция к снижению первичной продуктивности Балтийского моря (Zdun et al., 2021).

Создание моделей PP становится одним из полезных инструментов анализа текущего состояния морских экосистем, который также может использоваться в прогностических исследованиях их реакции на изменения климата (Zheng et al., 2020). В совокупности со спутниковыми данными по концентрации хлорофилла a (Chl a), полученной из спектральной яркости моря, можно добиться хорошего пространственно-временного охвата наблюдениями обширных районов Мирового океана (Kulk et al., 2020). Однако в оптически сложных водах, таких как балтийские, с высоким содержанием растворённого окрашенного, взвешенного органического и неорганического вещества для корректного определения концентрации Chl a необходимы дополнительные исследования специфических особенностей поглощения и рассеяния света в водной толще, а также калибровка данных спутниковых радиометров по результатам натурных измерений (Буканова и др., 2011; Sathyendranath et al., 2019).

Одна из стратегий разработки математических моделей PP, основанных на данных дистанционного зондирования, заключается в использовании теоретических уравнений для описания скорости фиксации углерода ¹⁴С или ¹³С фитопланктоном в зависимости от количества доступного света и в применении этих уравнений к результатам экспериментальных измерений (Bouman et al., 2018). Измерения проводят непосредственно после отбора проб в короткопериодных опытах (не более 2–3 ч) в градиенте искусственного света при температуре, максимально приближенной к естественным условиям. Нелинейная зависимость скорости фиксации углерода от света (кривая P-E) может быть выражена множеством математических формул. Основные параметры этих формул: фотосинтетические параметры α^B и P_m^B , наклон кривой P-E и максимальная удельная скорость фиксации углерода при насыщении светом имеют чёткую физиологическую интерпретацию (Behrenfeld, Falkowski, 1997a; Platt et al., 1980).

В качестве альтернативы PP может быть вычислена на основе моделей, разработанных по результатам измерений PP *in situ* или имитации условий *in situ* при естественной переменной освещённости в более длительных опытах (световой день или половина светового дня). Ключевой параметр этих моделей P_{opt}^{B} не эквивалентен параметру P_{m}^{B} и представляется оптимальной скоростью фиксации углерода в эвфотическом слое (Behrenfeld, Falkowski, 1997a, b). Какое-то время присутствовала неопределённость в терминологии, и фотосинтетические параметры α^{B} и P_{m}^{B} могли быть вычислены по результатам опытов, которые проводились при естественной переменной освещённости (Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977; Усвоение ..., 1985; Behrenfeld, Falkowski, 1997a; Forget et al., 2007; Vant, Budd, 1993; Woźniak et al., 1989). Допускалось, что значения параметров характеризуют фитоценоз в состоянии, близком к устойчивому, а PP зависит только от количества света, проникающего на глубину, и его изменчивости в течение дня.

К настоящему времени Европейское космическое агентство (анел. European Space Agency — ESA) добилось значительных успехов в создании глобальной базы данных, насчитывающей более 9000 кривых P-E, полученных в опытах по поглощению углерода (Bouman et al., 2018). Для каждого биогеографического района Мирового океана с особыми физикохимическими условиями приводятся осреднённые значения фотосинтетических параметров. Данные непосредственно по Балтийскому морю в этой базе отсутствуют (Longhurst, 1998). Изучение возможности применения в Балтийском море ряда моделей PP: DESAMBEM (англ. Development of a Satellite Method for Baltic Ecosystem Monitoring) (Darecki et al., 2008, Woźniak et al., 2011), VGPM (ahea. Vertically Generalized Production Model) (Behrenfeld, Falkowski, 1997a), ERGOM (ahea. Ecological Regional Ocean Model) (Neumann, Schernewski, 2008), ProDeMo (ahen. Production and Destruction of Organic Matter Model) (Ołdakowski et al., 2005), BEC (англ. Biogeochemical Elemental Cycling) (Moore et al., 2002) — показало, что наилучшее соответствие измеренных и вычисленных значений PP обеспечивается моделью DESAMBEM (Stramska, Zuzewicz, 2013). Однако авторы работы отмечали, что в период с середины мая по сентябрь вычисленные величины РР существенно занижаются. В российском секторе юго-восточной части Балтийского моря за это время фитопланктоном создаётся около 70 % годовой величины PP (Kudryavtseva et al., 2019а).

В некоторых случаях, если концентрация Chl a характеризует изменение биомассы фитопланктона, PP может быть получена из регрессионной связи между PP и концентрацией Chl a(Behrenfeld, Falkowski, 1997b; Matrai et al., 2013). Однако чаще концентрация Chl a находится под заметным влиянием таксономического состава фитопланктона (Bouman et al., 2018; Kulk et al., 2020), в том числе в российском секторе Балтийского моря (Kudryavtseva et al., 2019а). Кроме того, для изучаемого района обнаружена заметная зависимость PP от температуры воды (Kudryavtseva et al., 2019b).

Задача данного исследования состоит в подборе метода, которым лучше всего описываются экспедиционные данные по PP российского сектора юго-восточной части Балтийского моря, и проверка работы выбранного метода расчёта PP по спутниковым данным.

Материалы и методы

Экспедиционные данные

Исследования проводили в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря на станции глубиной 35 м (55°01,60' с.ш., 20°11,90' в.д.), находящейся в зоне взаимодействия прибрежных вод с водами открытых морских районов. Пробы отбирали ежемесячно с апреля 2008 г. по апрель 2009 г. на глубинах от 1 до 30 м с шагом 5 м. После добавления радиоактивно меченного ¹⁴С пробы инкубировали в море там, где они были отобраны, в течение 5-8 ч в зависимости от длины светового дня, начиная с полудня (Kudryavtseva et al., 2019a; Steemann Nielsen, 1952). Дополнительно на каждой стандартной глубине экспонировали пробу, отобранную в верхнем 1-метровом слое, а пробы с разных глубин — в инкубаторе на борту судна. Общее содержание Chl a в фитопланктоне измерялось на спектрофотометре LEKI SS 2109 UV (Финляндия). Температуру и электропроводность определяли зондом СТD90М (Германия). Поверхностную фотосинтетически активную радиацию (ФАР) в диапазоне 400-700 нм измеряли люксметром ТКА-ЛЮКС (Россия) от рассвета до заката с интервалом в полчаса. Для определения коэффициента ослабления света морской водой (k) по данным измерений диском Секки (D) использовали соотношение k = 1, 3/D (Matciak, 1997). В качестве независимой базы данных для верификации алгоритмов расчёта РР использовали результаты наблюдений *in situ* на шести заякоренных станциях, которые устанавливали в изучаемом районе в марте – октябре 2006–2007 гг. и в июле 2020 г., а также экспедиционные данные 2003–2008 и 2019 гг. (Кудрявцева, Александров, 2019).

Спутниковые данные

Использованы данные видимого и инфракрасного диапазонов спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутниках Terra и Aqua (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/), с пространственным разрешением 1 км и уровнем обработки 2. Для расчёта Chl a в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря использовался региональный алгоритм, предложенный в статье (Буканова и др., 2011). Для сопоставления с результатами измерений в массивах спутниковых данных находили пиксель, который совпадал с датой и положением станции. Для дней измерений PP *in situ* было получено по 5 спутниковых изображений концентрации Chl a и температуры поверхности моря (*англ.* sea surface temperature — SST). Для обеспечения спутниковыми данными времени проведения остальных экспедиций концентрации Chl a и SST на станциях осредняли для двухнедельных периодов.

Расчёт первичной продукции

Для математического описания вертикального распределения концентрации Chl *a* использовали эмпирическое уравнение, разработанное для Балтийского моря и основанное на кривой Гауса (Ostrowska et al., 2007):

$$\operatorname{Chl}_{z} = \operatorname{Chl}_{0} \frac{A + B \cdot \exp\left(-(z - z_{m})\sigma\right)^{2}}{A + B \cdot \exp\left(-(z_{m})^{2}\sigma\right)},$$
(1)

где Chl_{z} — концентрация Chl *a* на глубине (мг·м⁻³); Chl₀ — концентрация Chl *a* в поверхностном слое (мг·м⁻³); z_{m} — глубина максимума концентрации Chl *a* (м), вычисленная как

$$z_m = -4,61 \cdot \log(\text{Chl}_0) + 8,86; \quad A = 10^{(1,38 \cdot \log(\text{Chl}_0 + 0,0883))}; \quad B = 10^{(0,714 \cdot \log(\text{Chl}_0 0 + 0,0233))}; \quad \sigma = 0,0052.$$

Интегральное значение PP (IPP) рассчитывалось для модели с разрешением по глубине и интегрированной по времени:

$$IPP = \int_{z=0}^{z_{EU}} Chl_z P_z^B dz,$$
(2)

где IPP — интегральная PP (мгС·м⁻²·день⁻¹); Chl_z — концентрация Chl *a* на глубине *z* (мг·м⁻³); P_z^B — PP, нормированная на концентрацию Chl *a* на глубине *z* (мгС·мгХл⁻¹·день⁻¹); z_{EU} — глубина эвфотического слоя (м). Границу эвфотического слоя принимали равной 1%-му уровню ФАР.

Для описания вертикального профиля P_z^B использовали экспоненциальное уравнение, разработанное М. Стилом (Steele, 1962) и модифицированное Е. Сисванто с соавторами (Siswanto et al., 2005):

$$P_z^B = P_{opt}^B \frac{E_z}{E_{\max}} \exp\left(1 - \frac{E_z}{E_{\max}}\right),\tag{3}$$

где P_{opt}^B — максимальная нормированная на концентрацию Chl *a* PP в эвфотическом слое (мг C·мг Xл⁻¹·день⁻¹); $E_z - \Phi$ AP на глубине *z* (моль квантов·м⁻²·день⁻¹); $E_{max} - \Phi$ AP в точке перегиба между светоограниченной и светонасыщенной скоростью фотосинтеза в эвфотическом слое (моль квантов·м⁻²·день⁻¹).

Во втором варианте расчёта P_z^B использовали уравнение Платта (Platt et al., 1980):

$$P_z^B = P_m^B \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha^B E_z}{P_m^B}\right) \right],\tag{4}$$

где α^{B} — начальный наклон кривой P-E (мгС·мгХл⁻¹·моль квантов⁻¹·м⁻²); P_{m}^{B} — максимальная удельная PP (мгС·мгХл⁻¹·ч⁻¹). Значения этих параметров были взяты из базы данных по биогеохимическим провинциям (Bouman et al., 2018; Longhurst, 1998). При расчёте IPP по уравнению Платта в уравнении (2) учитывались длина светового дня и ФАР.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых в 2008–2009 гг. исследований на буйковых станциях было выявлено три типа вертикальных профилей концентрации Chl *a*. Профили первого типа характеризовались ярко выраженным максимумом концентрации Chl *a* в верхнем 5-м слое (более 10 мг·м⁻³) и наблюдались весной и летом в периоды годовых максимумов PP. Профили второго типа характеризовались низкой концентрацией Chl *a* (1–2 мг·м⁻³) и равномерным распределением Chl *a* в нестабильных зимних водах. К третьему типу относились профили с хорошо выраженным глубинным максимумом концентрации Chl *a*. В марте увеличение и снижение концентрации Chl *a* относительно горизонтов, лежащих выше и ниже глубинного максимума Chl *a*, наблюдалось в 15-м слое, который начинался на глубине 5 м и заканчивался на глубине 20 м. Этот слой соответствовал ядру верхнего перемешанного слоя, который образуется в Балтийском море в результате зимней вертикальной конвекции до достижения температуры максимальной плотности воды (Kudryavtseva et al., 2019a; Wasmund et al., 1998). Глубинные максимумы концентрации Chl *a* в мае и июне ассоциировались со скачком плотности воды, который в эти месяцы совпадал с нижней границей эвфотического слоя.

Вертикальное распределение PP в течение года представляло собой убывающую функцию глубины, начиная с верхнего 1-метрового горизонта отбора пробы. Только в мае образование глубинного максимума Chl *a* приводило к небольшому повышению PP на глубине 15 м, где интенсивность света составляла около 2,3 моль квантов·м⁻²·день⁻¹ (4,5%-й уровень подповерхностной ФАР). Наличие популяций фитопланктона, адаптированных к низкой интенсивности света, подтверждалось фотоингибированием проб, которые были отобраны на глубинах от 5 до 20 м и экспонировались на палубе (с угнетением фотосинтеза светом до 0 в пробах с глубин 15–20 м), а также увеличением PP в пробах из верхнего 1-метрового слоя, которые инкубировали на глубинах 5–10 м. В результате образования глубинных максимумов концентрации Chl *a* и PP вклад верхнего 5-метрового слоя в IPP снижался (61±8 %) и возрастал вклад слоя 5–10 м в IPP (29±3 %). В остальные месяцы в верхнем 5-м слое создавалось не менее 77±7 % IPP, а в слое 5–10 м – 15±4 %.

Нормализация PP на концентрацию Chl *а* показала, что из обследованных глубин наиболее близкие к оптимальным условия фотосинтеза всегда отмечались на 1-метровой глубине. Самые низкие значения параметра P_{opt}^{B} наблюдались зимой (7,6–12,5 мг С·мг Хл⁻¹·день⁻¹). Высокие значения параметра P_{opt}^{B} наблюдались с июля по октябрь (57,32–106,36 мг С·мг Хл⁻¹·день⁻¹), однако их значения могли снижаться до 23,53–31,93 мг С·мг Хл⁻¹·день⁻¹ в отдельные периоды при усилении ветра или при относительно низких концентрациях Chl *a* в воде.

Наилучший алгоритм восстановления P_{opt}^B ($R^2 = 0,48$; n = 13) был получен с использованием двух переменных: температуры поверхностного слоя моря (SST) и концентрации Chl *a* в верхнем 1-метровом слое (Chl₀):

$$P_{opt}^{B} = -0,3712 + 2,308 \cdot \text{SST} + 1,6239 \cdot \text{Chl}_{0}.$$
(5)

Для вычисления показателя вертикального ослабления света (k) по данным о концентрации Chl a в поверхностном слое (Chl₀) использовали эмпирическую связь между концентрацией Chl a и глубиной видимости диска Секки (Кудрявцева, Александров, 2017). В результате получено регрессионное уравнение:

$$k = 0,1716 + 0,0177 \cdot \text{Chl}_0. \tag{6}$$



Рис. 1. Сравнение измеренной in situ и вычисленной IPP: a — PP вычислена по данным натурных измерений: 1 — с использованием уравнения (4) и фотосинтетических параметров α^B и P^B_m, 2 — с использованием уравнений (2), (3) и сезонных значений параметра P^B_{opt} из *таблицы*, 3 — параметр P^B_{opt} определён по регрессионному уравнению (5); б — PP вычислена по спутниковым данным, полученным для дней измерений *in situ* (1, 2, 3 как на графике (a)). Диагональ — линия совпадения данных

Сравнение значений IPP, измеренных и вычисленных с использованием уравнений (2), (3) и (5), показало хорошее совпадение результатов ($R^2 = 0,57$). Значения IPP до 2000 мг С·м⁻²·день⁻¹ были плотно распределены по линии идеального соответствия 1:1 (*рис. 1a*, см. с. 63). Однако бо́льшие значения IPP, наблюдаемые при концентрациях Chl *a* около 10 мг·м⁻³, существенно переоценивались. Среднее завышение вычисленных значений PP составило 218 мгС·м⁻²·сут⁻¹ (18 %).

Для проверки подхода, когда параметры модели назначаются для конкретного региона в зависимости от времени года, по результатам наблюдений на буйковых станциях были вычислены средние значения параметра P_{opt}^{B} для четырёх сезонов года (*таблица*). В результате вычислений по уравнениям (2), (3) и сезонным значениям P_{opt}^{B} степень связи между измеренными и вычисленными величинами IPP возросла ($R^2 = 0,60$), но увеличилось также среднее завышение моделью вычисленных значений до 246 мгС·м⁻²·сут⁻¹ (20 %).

Зима	Весна	Лето	Осень
1,7±0,5	9,8±8,8	6,3±3,8	7,64±3,90
$1,8{\pm}0,7$	$10,4\pm 8,1$	6,9±4,2	8,0±4,4
34±13	142±98	107±51	137±60
14±3	340±361	410±263	322±11
72±16	1241±1009	1622±689	1344±41
9,06±2,40	27,76±18,48	65,74±40,08	48,0±23,14
0,12±0,04	0,39±0,31	0,95±1,03	0,21±0,09
	<u>Зима</u> 1,7±0,5 1,8±0,7 34±13 14±3 72±16 9,06±2,40 0,12±0,04	ЗимаВесна1,7±0,59,8±8,81,8±0,710,4±8,134±13142±9814±3340±36172±161241±10099,06±2,4027,76±18,480,12±0,040,39±0,31	ЗимаВеснаЛето1,7±0,59,8±8,86,3±3,81,8±0,710,4±8,16,9±4,234±13142±98107±5114±3340±361410±26372±161241±10091622±6899,06±2,4027,76±18,4865,74±40,080,12±0,040,39±0,310,95±1,03

Показатели продуктивности фитопланктона в разные сезоны, измеренные в период ежемесячных наблюдений 2008–2009 гг.

Примечание: Chl_0 , Chl_{max} — концентрация Chl a в поверхностном слое, максимальная концентрация в столбе воды; B — интегральная концентрация Chl a в эвфотическом слое; PP_0 IPP — первичная продукция на поверхности, интегральная в эвфотическом слое; Δ Sigma-t — разность значений плотности в придонном слое и у поверхности.

Для расчёта IPP на основании теоретической кривой Платта (Platt et al., 1980) (уравнения (2) и (4)) использовали сезонные значения фотоадаптивных параметров α^B и P_m^B для биогеохимической провинции NECS (*англ.* North-East Continental Shelf — Северо-восточный континентальный шельф), к которой относится Балтийское море. Вычисленные величины IPP занижались моделью в среднем на 594 мгС·м⁻²·сут⁻¹ (35%) по сравнению с измеренными. Эффективность данного алгоритма оказалась ниже, чем у предыдущих двух вариантов расчёта IPP ($R^2 = 0,47$). Ранее также было показано, что модели на основе уравнения Платта занижают измеренную величину IPP в Балтийском море и в других районах Атлантического океана (Dogliotti et al., 2014; Lobanova et al., 2018; Stramska, Zuzewicz, 2013).

По спутниковым данным, которые удалось получить для дней измерений PP на буйковых станциях, концентрации Chl *a* изменялись от 4,18 до 14,90 мг·м⁻³, SST — от 10,0 до 19,3 °C. Диапазоны их значений были недостаточно большими, что ограничивало регрессионный анализ IPP (*puc. 16*). Связь между измеренными и вычисленными по трём указанным выше алгоритмам величинами IPP отсутствовала.

Для проверки работы первых двух вариантов алгоритма расчёта PP, основанных на фотосинтетическом параметре P_{opt}^{B} , на всей акватории российского сектора юго-восточной части Балтийского моря использованы сезонные данные по температуре воды и по концентрации Chl *a* в поверхностном слое, полученные в периоды 2003–2008 и 2019–2020 гг. В этих исследованиях измерения PP проводили в условиях имитации экспозиции проб *in situ* в проточном инкубаторе на палубе судна. Поскольку пробы PP со стандартных глубин экспонировали без светорассеивающих экранов, для сокращения ошибок в данной работе сравнивали только измеренные и вычисленные значения PP в пробах, отобранных в верхнем слое моря (около 2 м). Результаты сравнения показали, что вычисленные значения PP соответствовали измеренным на 35–36 % (*рис. 2a*, б). При вычислении PP с использованием уравнений (2), (3) и (5) среднее завышение PP алгоритмом составляло $-2 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{день}^{-1}$ (1%), при использовании уравнений (2), (3) и средних значений параметра P_{opt}^{B} для каждого сезона — 32 мгС $\cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{день}^{-1}$ (26%).



Puc. 2. Сравнение измеренных в экспедициях 2003–2020 гг. значений PP в поверхностном слое и вычисленных значений PP: *a* – с использованием значений параметра P_{opt}^{B} , вычисленных по уравнению (5); *б* – с использованием сезонных значений параметра P_{opt}^{B} из *таблицы*. Сопоставление значений PP при исключении прибрежных станций глубинами 10–20 м (*в*, *г*)

Характерная особенность Балтийского моря и изучаемого района, в частности, состоит в постоянном примыкании к берегу более пресных вод, которые формируются под влиянием стока с суши (Гидрометеорология..., 1994; Кудрявцева, Александров, 2019). В области распространения относительно пресных вод в составе фитопланктона возрастает роль пресноводных по происхождению видов, которые оказывают заметное влияние на наблюдаемые концентрации Chl *a* в изучаемом районе моря (Kudryavtseva et al., 2019а). Полученные в работе регрессионные зависимости для вычисления PP основаны на данных, собранных в районе 35-й изобаты, где влияние относительно пресных вод и речного стока с северного побережья Самбийского п-ова носит эпизодический характер. При исключении из анализа результатов экспедиционных измерений, полученных на станциях с глубинами 10–20 м, которые располагались ближе всего к берегу (на расстоянии 1–5 км), эффективность воспроизведения данных улучшилась (см. *рис. 26*). Предсказывающая способность алгоритмов составила 44–48 % (в зависимости от способа оценки параметра P_{opt}^{B}). Для логарифмированных величин PP, которые часто используются для оценки эффективности моделей PP, степень связи в обоих случаях достигала 73 %. При этом среднее завышение алгоритмом значений PP при подборе параметра P_{opt}^{B} по уравнению (5) увеличилось до 15 мгС·м⁻³·день⁻¹ (14 %), а при использовании сезонных значений параметра P_{opt}^{B} — до 49 мгС·м⁻³·день⁻¹ (48 %).

На *рис. 3* показан пример распределения PP, измеренной и вычисленной по материалам 45-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Борис Петров» в июле 2019 г. Значения PP, вычисленные с использованием полученных двумя способами параметров P_{opt}^{B} , удовлетворительно соответствовали измеренным значениям PP ($321\pm94 \text{ мгC} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{денb}^{-1}$). Пространственные различия в распределении PP отмечались вблизи северного побережья Самбийского п-ова, где в Балтийское море впадают небольшие реки. Величины PP, вычисленные с использованием средних значений параметра P_{opt}^{B} для каждого сезона ($490\pm159 \text{ мгC} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{денb}^{-1}$), завышались сильнее, чем величины PP, вычисленные с использованием гараметра P_{opt}^{B} ($397\pm168 \text{ мгC} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{денb}^{-1}$).



Рис. 3. Распределение РР в поверхностном слое (мгС·м⁻³·день⁻¹) в июле 2019 г.: *а* — измеренная; *б* — вычисленная по судовым данным с использованием уравнения (5) для определения параметра *P*^B_{opt}; *в* — вычисленная по судовым данным с использованием среднего для сезона значения параметра *P*^B_{opt}. Точки — станции, где проводились измерения

Подобное искажение реальной картины было получено при сопоставлении среднесезонных распределений измеренной PP с вычисленной по судовым и спутниковым данным PP (с использованием уравнений (2), (3) и (5)). В выбранный период 2003–2008 гг. экспедиционные исследования охватывали все сезоны года и каждый год проводились примерно в одни и те же сроки (*puc. 4*, см. с. 67). Вычисленные по судовым данным значения PP для зимнего и осеннего сезонов были существенно выше измеренных у северного побережья Самбийского п-ова. Предположительно, в холодный период года адвекция пресных вод с суши наиболее интенсивна (вследствие повышения количества осадков (Гидрометеорология..., 1994; Omstedt et al., 2014)), поэтому таксономический состав фитопланктона особенно заметно влиял на концентрацию Chl *a* в воде.

Наблюдаемый уровень PP — результат взаимодействия фитопланктона с условиями окружающей среды в течение определённого интервала времени. Вероятно, вследствие этого значения PP, вычисленные по осреднённым для двухнедельных периодов спутниковым данным, лучше соответствовали измеренным величинам PP. В частности, зимой для северо-восточной части изучаемого района были характерны относительно высокие величины PP. Такие же результаты были получены при расчёте PP по спутниковым данным. При вычислении PP по результатам натурных измерений повышения PP в северо-восточной части исследуемой акватории обнаружить не удалось. Для весеннего периода для всего района также было получено лучшее соответствие распределения PP, построенной по спутниковым данным, среднемноголетнему распределению измеренной PP.



Puc. 4. Распределение измеренной и вычисленной по судовым и спутниковым данным PP в поверхностном слое (мгС·м⁻³·день⁻¹). Спутниковые данные по SST и концентрации Chl *a* осреднены для двухнедельных периодов

Другой особенностью пространственного распределения PP, построенной по спутниковым данным, стал максимум PP, который во все сезоны отмечался в районе сочленения Самбийского п-ова и Куршской косы на расстоянии около 20 км от берега. Это выступает новым свидетельством того, что форма берега и особенности рельефа дна в совокупности с образованием вихревых структур у северного побережья Самбийского п-ова способствуют повышению PP (Краюшкин и др., 2018; Кудрявцева, Александров, 2019; Gurova, Chubarenko, 2012). Вследствие сравнительно замедленного водообмена в этом районе адвекция биомассы фитопланктона происходит медленнее, и это хорошо отразили спутниковые данные, выбранные для периодов экспедиций.

В нашей работе ошибки расчёта PP, вычисленной на основе данных натурных измерений, обусловлены причинами, в целом представляющимися проблемными для моделей PP (Carr et al., 2006). Среди них недостаточно большое число данных с подробным описанием вертикальных профилей PP и Chl *a* для уточнения вариабельности параметра P_{opt}^{B} , а также большая изменчивость таксономического состава фитопланктона и физико-химических условий фотосинтеза в изучаемом районе. До настоящего времени связь фотосинтетических параметров P_{opt}^{B} (P_{m}^{B}) с биотическими и абиотическими факторами продолжает уточняться на глобальном и региональном уровнях (Лобанова и др., 2017; Bouman et al., 2018; Sathyendranath et al., 2019; Siswanto et al., 2005).

Касательно ошибок вычисления PP на основе спутниковых данных следует отметить, что помимо пигментов на цветовую яркость моря влияет растворённое окрашенное вещество и неорганическая взвесь. Осенью и зимой силовое воздействие ветра и штормов на прибрежную зону наиболее интенсивно (Omstedt et al., 2014; Stont, Bukanova, 2019): абразия подводного берегового склона, взмучивание донных осадков и, как следствие, интенсивное поступление терригенного материала приводят к перераспределению органической и неорганической составляющих взвеси, что может затруднять расчёт концентрации Chl a по данным спутниковых радиометров. Этот эффект отчётливо виден на *рис.* 4: в холодный период года в прибрежной полосе вод шириной 10–20 км от берега отмечается выраженное несоответствие распределения измеренной и рассчитанной на основе спутниковых значений PP. В недавних исследованиях в Балтийском море показано присутствие постоянно высоких значений концентрации неорганической взвеси на расстоянии до 10–15 км от побережий (Bukanova et al., 2018; Kratzer et al., 2020).

Заключение

В работе представлены результаты подбора алгоритма расчёта РР в российском секторе юговосточной части Балтийского моря. По данным измерений PP in situ на буйковых станциях, установленных в море, получено уравнение множественной регрессии, связывающее фото-синтетический параметр P_{opt}^{B} с двумя переменными: SST и концентрацией Chl *a*. Также вы-числены средние значения параметра P_{opt}^{B} для каждого сезона года. Каждый из вариантов полученного параметра подставляли в теоретическое уравнение Стила, описывающее связь фотосинтеза со светом. Для сравнения РР вычисляли по уравнению Платта с использованием величины ΦAP у поверхности моря и сезонных значений α^B и P_m^B , величины которых были взяты из базы данных по биогеохимической провинции, к которой относится Балтийское море. Результаты верификации трёх вариантов расчёта РР по данным измерений РР in situ, а затем по данным измерений PP на палубе судна (имитация условий in situ) показали, что лучший вариант оценки РР — использование алгоритма расчёта на основе теоретического уравнения Стила в комбинации с уравнением множественной регрессии, связывающим пара-метр P_{opt}^{B} с SST и с концентрацией Chl *a* в поверхностном слое. В этом случае различие измеренных и вычисленных по результатам натурных наблюдений значений РР находились в пределах 1–18 %. Эффективность модели составляла 44–57 %. Вычисленные по спутниковым данным величины РР удовлетворительно воспроизводили распределение измеренных в экспедициях величин РР. Предложенный алгоритм может использоваться для расчёта РР в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря с ограничениями применения на глубинах до 10–20 м. В отличие от других моделей РР он не занижает оценки РР в тёплый период года, что имеет большое значение для изучения и предсказания экологической динамики района, влияющей на биохимический цикл углерода.

Математическая обработка данных и верификация алгоритмов расчёта РР выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-50090). Интерпретация полученных результатов проведена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0005. Авторы благодарят А. В. Крека, А. В. Гусева, А. А. Кондрашова за организацию измерений *in situ*.

Литература

- 1. Буканова Т. В., Вазюля С. В., Копелевич О. В., Буренков В. И., Григорьев А. В., Храпко А. Н., Шеберстов С. В., Александров С. В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Балтийское море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. Т. 3. Вып. 2. 450 с.
- 3. *Кобленц-Мишке О. И., Ведерников В. И.* Первичная продукция // Биология океана. М.: Наука, 1977. Т. 2. С. 183–208.
- 4. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Соловьев Д. М. Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 5. *Кудрявцева Е.А., Александров С. В.* Оценка толщины фотического слоя и ослабления видимого света в водах юго-восточной части Балтийского моря с использованием данных диска Секки // Естественные и технические науки. 2017. № 12. С. 178–181.
- 6. *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. https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71.
- 7. Лобанова П. В., Звалинский В. И., Тищенко П. Я. Первичная продукция фитопланктона и концентрация хлорофилла-а в западной части Японского моря по спутниковым и натурным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 135–147. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147.
- 8. Усвоение солнечной энергии в процессе фотосинтеза черноморского и балтийского фитопланктона. М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, 1985. 336 с.
- 9. *Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.* (1997a) A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. P. 1479–1491.
- 10. *Behrenfeld M.J.*, *Falkowski P.G.* (1997b) Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.4319/lo.1997.42.1.0001.
- Bouman H.A., Platt T., Doblin M., Figueiras F.G., Gudmundsson K., Gudfinnsson H.G., Huang B., Hickman A., Hiscock M., Jackson T., Lutz V.A., Mélin F., Rey F., Pepin P., Segura V., Tilstone G., van Dongen-Vogels V., Sathyendranath S. Photosynthesis-irradiance parameters of marine phytoplankton: Synthesis of a global data set // Earth System Science Data. 2018. V. 10. P. 251–266. https://doi. org/10.5194/essd-10-251-2018.
- 12. Bukanova T., Kopelevich O., Vazyulya S., Bubnova E., Sahling I. Suspended matter distribution in the southeastern Baltic Sea from satellite and in situ data // Intern. J. Remote Sensing. 2018. V. 39. P. 9317–9338. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1519290.
- 13. Daneri G., Dellarossa V., Quinones R., Jacob B., Montero P., Ulloa O. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas // Marine Ecology Progress Series. 2000. V. 197. No. 8. P. 41–49. DOI: 10.3354/meps197041.
- 14. Darecki M., Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Woźniak S. B., Bradtke K., Dera J., Woźniak B. Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation // Oceanologia. 2008. V. 50(4). P. 509–538.
- Dogliotti A. I., Lutz V.A., Segura V. Estimation of primary production in the southern Argentine continental shelf and shelf-break regions using field and remote sensing data // Remote Sensing of Environment. 2014. No. 140. P. 497–508. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.021.
- Forget M. H., Sathyendranath S., Platt T., Pommier J., Vis C., Kyewalyaga M. S., Hudon C. Extraction of photosynthesis-irradiance parameters from phytoplankton production data: demonstration in various aquatic systems // J. Plankton Research. 2007. V. 29. P. 249–262. https://doi.org/10.1093/plankt/fbm012.
- 17. *Gurova E.*, *Chubarenko B*. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54(4). P. 631–654. https://doi.org/10.5697/oc.54-4.631.

- 18. *Kaczmarek S., Koblentz-Mishke O.J., Ochocki S., Nakonieczny J., Renk H.* Primary production in the eastern and southern Baltic Sea // Oceanologia. 1997. V. 39(2). P. 117–135.
- 19. *Kratzer S.*, *Kyryliuk D.*, *Brockmann C*. Inorganic suspended matter as an indicator of terrestrial influence in Baltic Sea coastal areas Algorithm development and validation, and ecological relevance // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 237. Art. No. 11609. 17 p. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111609.
- Kudryavtseva E., Aleksandrov S., Bukanova T., Dmitrieva O., Rusanov I. (2019a) Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science. 2019. V. 32. Art. No. 100862. 15 p. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100862.
- 21. *Kudryavtseva E., Bukanova T., Bubnova E.* (2019b) Primary productivity estimates based on the remote sea surface temperature data in the Baltic Sea // Proc. 2018 IEEE/OES Baltic Intern. Symp. (BALTIC). Klaipeda, 2019. 4 p. DOI: 10.1109/BALTIC.2018.8634855.
- Kulk G., Platt T., Dingle G., Jackson T., Jönsson B., Bouman H., Babim M., Brewin R., Doblin M., Estrada M., Figueiras F.G., Furuya K., González-Benítez N., Gudfinnsson H.G., Gudmundsson K., Huang B., Isada T., Kovač Ž., Lut V.A., Marañón E., Raman M., Richardson K., Rozema P.D., van de Poll W.H., Segura V., Tilstone G.H., Uitz J., van Dongen-Vogels V., Yoshikawa T., Sathyendranath Sh. Primary Production, an Index of Climate Change in the Ocean: Satellite-Based Estimates over Two Decades // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 5. Art. No. 826. 26 p. https://doi.org/10.3390/rs12050826.
- 23. Lobanova P., Tilstone G. H., Bashmachnikov I., Brotas V. Accuracy assessment of primary production models with and without photoinhibition using ocean-colour Climate Change Initiative data in the North East Atlantic Ocean // Remote Sensing. 2018. V. 10. Iss. 7. Art. No. 1116. 24 p. https://doi.org/10.3390/rs10071116.
- 24. Longhurst A. Ecological geography of the sea. San Diego: Academic Press, 1998. 398 p.
- Lysiak-Pastuszak E., Carstens M., Leppänen J.-M., Leujak W., Nausch G., Murray C., Andersen J. H. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011: A concise thematic assessment / eds. Pyhälä M., Fleming-Lehtinen V., Laamanen M.; Baltic Sea Environment Proc. No. 143. Helsinki, Finland: HELCOM, 2014. 41 p.
- 26. *Matciak M*. Estimation of the attenuation of visible light in waters of the Gulf of Gdansk with the use of Secchi transparency // Oceanological and Hydrobiological Studies. 1997. V. XXVI4. P. 35–40.
- 27. *Matrai P., Olson E., Suttles S., Hill V.J., Codispoti L.A., Light B., Steele M.* Synthesis of primary production in the Arctic Ocean: I. Surface waters, 1954–2007 // Progress in Oceanography. 2013. V. 110. P. 93–106. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.11.004.
- 28. *Moore J. K., Doney S. C., Kleypas J. C., Glover D. M., Fung I. Y.* An intermediate complexity marine ecosystem model for the global domain // Deep Sea Research. Pt. II. 2002. V. 49. P. 403–462. https://doi. org/10.1016/S0967-0645(01)00108-4.
- 29. *Murray C.J., Muller-Karulis B., Carstensen J., Conley D.J., Gustaffson B.G., Andersen J.H.* Past, present and future eutrophication status of the Baltic Sea // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. No. 2. P. 1–12. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00002.
- 30. *Neumann T., Schernewski G.* Eutrophication in the Baltic Sea and shifts in nitrogen fixation analyzed with a 3D ecosystem model // J. Marine Systems. 2008. V. 74. No. 1–2. P. 592–602. https://doi.org/10.1016/j. jmarsys.2008.05.003.
- 31. *Ołdakowski B., Kowalewski M., Jędrasik J., Szymelfenig M.* Ecohydrody-namic model of the Baltic Sea. Pt. 1. Description of the ProDeMo model // Oceanologia. 2005. V. 47. No. 4. P. 477–516.
- Omstedt A., Elken J., Lehmann A., Leppäranta M., Meier H. E. M., Myrberg K., Rutgersson A. Progress in physical oceanography of the Baltic Sea during the 2003–2014 period // Progress in Oceanography. 2014. V. 128. P. 139–171. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.010.
- 33. Ostrowska M., Majchrowski R., Stoń-Egiert J., Woźniak B., Ficek D., Dera J. Remote sensing of vertical phytoplankton pigment distributions in the Baltic: new mathematical expressions. Part 1: Total chlorophyll a distribution // Oceanologia. 2007. V. 49. No. 4. P. 471–489.
- 34. *Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G.* Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton // J. Marine Research. 1980. V. 38. No. 4. P. 687–701.
- 35. Sathyendranath S., Brewin R.J. W., Brockmann C., Brotas V., Calton B., Chuprin A., Cipollini P., Couto A. B., Dingle J., Doerffer R., Donlon C., Dowell M., Farman A., Grant M., Groom S., Horseman A., Jackson Th., Krasemann H., Lavender S., Martinez-Vicente V., Mazeran C., Mélin F., Moore T.S., Müller D., Regner P., Roy Sh., Steele Ch.J., Steinmetz F., Swinton J., Taberner M., Thompson A., Valente A., Zühlke M., Brando V.E., Feng H., Feldman G., Franz B.A., Frouin R., Gould R. W. Jr., Hooker S. B., Kahru M., Kratzer S., Greg M. B., Muller-Karger F. E., Sosik H. M., Voss K. J., Werdell J., Platt T. An ocean-colour time series for use in climate studies: The experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) // Sensors. 2019. V. 19. Art. No. 4285. 31 p. https://doi.org/10.3390/s19194285.
- Siswanto E., Ishizaka J., Yokouchi K. Estimating chlorophyll-a vertical profiles from satellite data and the implication for primary production in Kuroshio front of the ECS // J. Oceanography. 2005. V. 61. Iss. 3. P. 575–589. DOI: 10.1007/s10872-005-0066-7.

- 37. *Steele J. H.* Environmental control of photosynthesis in the sea // Limnology and Oceanography. 1962. V. 7. P. 137–149.
- Steemann-Nielsen E. The use of radioactive carbon (14C) for measuring organic production in the sea // J. Conseil / Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer. 1952. V. 18. P. 117–140.
- Stont Z. I., Bukanova T. V. General features of air temperature over coastal waters of the south-eastern Baltic Sea for 2004–2017 // Russian J. Earth Sciences. 2019. V. 19. No. 3. Art. No. ES3001. 9 p. DOI: 10.2205/2019ES000657.
- Stramska M., Zuzewicz A. Comparison of primary productivity estimates in the Baltic Sea based on the DESAMBEM algorithm with estimates based on other similar algorithms // Oceanologia. 2013. V. 55. No. 1. P. 77–100. https://doi.org/10.5697/oc.55-1.077.
- 41. *Vant W.N., Budd R. G.* Phytoplankton photosynthesis and growth in contrasting regions of Manukau Harbour, New Zealand // New Zealand J. Marine and Freshwater Research. 1993. V. 27. No. 3. P. 295–307.
- 42. *Wasmund N., Nauch G., Matthäus W.* Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea spatio-temporal development and long-term trends // J. Plankton Research. 1998. No. 20. P. 1099–1117.
- 43. *Woźniak B., Hapter R., Dera J.* Light curves of marine plankton photosynthesis in the Baltic // Oceanologia. 1989. V. 27. P. 61–78.
- Woźniak B., Bradtke K., Darecki M., Dera J., Dudzińska-Nowak J., Dzierzbicka-Glowacka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T. SatBaltyk – a Baltic environmental satellite remote sensing system – an ongoing project in Poland. Pt. 1: assumptions, scope and operating range // Oceanologia. 2011. V. 53. Iss. 4. P. 897– 924. https://doi.org/10.5697/oc.53-4.897.
- Zdun A., Stoń-Egiert J., Ficek D., Ostrowska M. Seasonal and Spatial Changes of Primary Production in the Baltic Sea (Europe) Based on in situ Measurements in the Period of 1993–2018 // Frontiers in Marine Science. 2021. V. 7. Art. No. 604532. 14 p. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.604532.
- Zheng Y., Shen R., Wang Y., Li X., Liu S., Liang S., Chen J. M., Ju W., Zhang L., Yuan W. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation 1982–2017 // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 2725–2746. https://doi.org/10.5194/essd-12-2725-2020.

Verification of algorithms for calculating primary production for the southeastern Baltic Sea from field measurements and satellite data

E.A. Kudryavtseva¹, T.V. Bukanova¹, S.V. Aleksandrov²

 ¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: kudryavtzeva@rambler.ru, tatiana.bukanova@gmail.com
 ² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Atlantic Branch, Kaliningrad 236022, Russia E-mail: hydrobio@mail.ru

The algorithm for calculating primary production (PP) is proposed for the Russian sector of the southeastern part of the Baltic Sea. PP is obtained from the data of monthly *in situ* measurements at a buoy station in 2008–2009. The algorithm includes three components: vertical profile of chlorophyll a(Chl a), the parameter for estimating the distribution of underwater photosynthetically active radiation (PAR), and photosynthetic parameter. We used an empirical equation previously developed for the Baltic Sea by Polish oceanographers to reconstruct the vertical profiles of Chl a from its concentration in the surface layer. The thickness of the euphotic layer was determined from the concentration of Chl a in the surface layer according to an empirical equation obtained for the study area. The photosynthetic parameter was calculated from a multiple regression equation which included water temperature and Chl a concentration as variables. The algorithm was verified on the basis of data from measurements that were carried out in the study area between 2003 and 2020, as well as on satellite data averaged over two-week periods coinciding with the dates of the expeditions. The presented algorithm has a similar performance to other PP models that have been verified for the Baltic Sea. In contrast to them, the PP values calculated by the algorithm in the warm period of the year are not underestimated, which is of great importance for studying and predicting the dynamics of the study area ecosystem. The resulting equations can be used to calculate the PP from satellite data and fill gaps in field observations.

Keywords: primary production, chlorophyll *a*, vertical distribution, *in situ* measurements, algorithm for calculating primary production, satellite data, Baltic Sea

Accepted: 25.07.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-59-74

References

- 1. Bukanova T. V., Vazyulya S. V., Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Grigor'ev A. V., Khrapko A. N., Sheberstov S. V., Aleksandrov S. V., Regional algorithms for analysis of chlorophyll a and suspended matter concentration in the south-eastern Baltic Sea using the satellite ocean color scanner, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 64–73 (in Russian).
- 2. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Baltiiskoe more. Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoi produktivnosti* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Baltic Sea. Hydrochemical conditions and oceanological patterns for the formation of biological productivity), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994, Vol. 3, No. 2, 450 p. (in Russian).
- 3. Koblents-Mishke O.I., Vedernikov V.I., Primary Production, In: *Biologiya okeana* (Biology Oceanography), Moscow: Nauka, 1977, Vol. 2, pp. 183–208 (in Russian).
- 4. Krayushkin E.V., Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Alfer'eva Ya.O., Solov'ev D.M., Formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 214–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 5. Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V., Estimaton of the Euphotic Depth and the Attenuation of Light in Waters of the South-Eastern Baltic Sea with the Use of Secchi Depth, *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, No. 12, pp. 178–181 (in Russian).
- 6. Kudryavtseva E.A., Aleksandrov S.V., Hydrological and Hydrochemical Underpinnings of Primary Production and Division of the Russian Sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea, *Okeanologiya*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 56–71 (in Russian), https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71.
- Lobanova P. V., Zvalinskii V. I., Tishchenko P. Ya., Primary production of phytoplankton and concentration of chlorophyll-a in the western part of the Japan/East Sea from remote sensing and field data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 135–147 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147.
- 8. Usvoenie solnechnoi energii v protsesse fotosinteza chernomorskogo i baltiiskogo fitoplanktona (Light assimilation in the photosynthesis of the Black Sea and Baltic phytoplankton), Moscow: Institut okeanologii im. P. P. Shirshova AN SSSR, 1985, 336 p. (in Russian).
- 9. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. (1997a), A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42, pp. 1479–1491.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. (1997b), Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42, No. 1, pp. 1–20, DOI: 10.4319/ lo.1997.42.1.0001.
- Bouman H.A., Platt T., Doblin M., Figueiras F.G., Gudmundsson K., Gudfinnsson H.G., Huang B., Hickman A., Hiscock M., Jackson T., Lutz V.A., Mélin F., Rey F., Pepin P., Segura V., Tilstone G., van Dongen-Vogels V., Sathyendranath S., Photosynthesis-irradiance parameters of marine phytoplankton: Synthesis of a global data set, *Earth System Science Data*, 2018, Vol. 10, pp. 251–266, https://doi. org/10.5194/essd-10-251-2018.
- Bukanova T., Kopelevich O., Vazyulya S., Bubnova E., Sahling I., Suspended matter distribution in the south-eastern Baltic Sea from satellite and in situ data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 39, pp. 9317– 9338, https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1519290.
- 13. Daneri G., Dellarossa V., Quinones R., Jacob B., Montero P., Ulloa O., Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas, *Marine Ecology Progress Series*, 2000, Vol. 197, No. 8, pp. 41–49, DOI: 10.3354/meps197041.
- Darecki M., Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Woźniak S. B., Bradtke K., Dera J., Woźniak B., Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation, *Oceanologia*, 2008, Vol. 50, No. 4, pp. 509–538.
- 15. Dogliotti A. I., Lutz V.A., Segura V., Estimation of primary production in the southern Argentine continental shelf and shelf-break regions using field and remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 2014, No. 140, pp. 497–508, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.021.

- Forget M. H., Sathyendranath S., Platt T., Pommier J., Vis C., Kyewalyaga M. S., Hudon C., Extraction of photosynthesis-irradiance parameters from phytoplankton production data: demonstration in various aquatic systems, *J. Plankton Research*, 2007, Vol. 29, pp. 249–262, https://doi.org/10.1093/plankt/fbm012.
- 17. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the southeastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54, No. 4, pp. 631–654, https://doi.org/10.5697/oc.54-4.631.
- 18. Kaczmarek S., Koblentz-Mishke O.J., Ochocki S., Nakonieczny J., Renk H., Primary production in the eastern and southern Baltic Sea, *Oceanologia*, 1997, No. 39(2), pp. 117–135.
- 19. Kratzer S., Kyryliuk D., Brockmann C., Inorganic suspended matter as an indicator of terrestrial influence in Baltic Sea coastal areas Algorithm development and validation, and ecological relevance, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 237, Art. No. 11609, 17 p., https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111609.
- 20. Kudryavtseva E., Aleksandrov S., Bukanova T., Dmitrieva O., Rusanov I. (2019a), Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea, *Regional Studies in Marine Science*, 2019, No. 32, Art. No. 100862, 15 p., https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100862.
- Kudryavtseva E., Bukanova T., Bubnova E. (2019b), Primary productivity estimates based on the remote sea surface temperature data in the Baltic Sea, *Proc. 2018 IEEE/OES Baltic Intern. Symp. (BALTIC)*, Klaipeda, 2019, 4 p., DOI: 10.1109/BALTIC.2018.8634855.
- 22. Kulk G., Platt T., Dingle G., Jackson T., Jönsson B., Bouman H., Babim M., Brewin R., Doblin M., Estrada M., Figueiras F.G., Furuya K., González-Benítez N., Gudfinnsson H.G., Gudmundsson K., Huang B., Isada T., Kovač Ž., Lut V.A., Marañón E., Raman M., Richardson K., Rozema P.D., van de Poll W.H., Segura V., Tilstone G.H., Uitz J., van Dongen-Vogels V., Yoshikawa T., Sathyendranath Sh., Primary Production, an Index of Climate Change in the Ocean: Satellite-Based Estimates over Two Decades, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 5, Art. No. 826, 26 p., https://doi. org/10.3390/rs12050826.
- 23. Lobanova P., Tilstone G. H., Bashmachnikov I., Brotas V., Accuracy assessment of primary production models with and without photoinhibition using ocean-colour Climate Change Initiative data in the North East Atlantic Ocean, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Issue 7, Art. No. 1116, 24 p., https://doi.org/10.3390/rs10071116.
- 24. Longhurst A., Ecological geography of the sea, San Diego: Academic Press, 1998, 398 p.
- Łysiak-Pastuszak E., Carstens M., Leppänen J.-M., Leujak W., Nausch G., Murray C., Andersen J. H., *Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011, A concise thematic assessment*, Pyhälä M., Fleming-Lehtinen V., Laamanen M. (eds), Baltic Sea Environment Proc. No. 143, Helsinki, Finland: HELCOM, 2014, 41 p.
- 26. Matciak M., Estimation of the attenuation of visible light in waters of the Gulf of Gdansk with the use of Secchi transparency, *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 1997, Vol. XXVI4, pp. 35–40.
- Matrai P., Olson E., Suttles S., Hill V.J., Codispoti L.A., Light B., Steele M., Synthesis of primary production in the Arctic Ocean: I. Surface waters, 1954–2007, *Progress in Oceanography*, 2013, Vol. 110, pp. 93–106, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.11.004.
- Moore J. K., Doney S. C., Kleypas J. C., Glover D. M., Fung I. Y., An intermediate complexity marine ecosystem model for the global domain, *Deep Sea Research*, Part II, 2002, Vol. 49, No. 1–3, pp. 403–462, https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00108-4.
- 29. Murray C.J., Muller-Karulis B., Carstensen J., Conley D.J., Gustaffson B.G., Andersen J.H., Past, present and future eutrophication status of the Baltic Sea, *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 1–12, https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00002.
- Neumann T., Schernewski G., Eutrophication in the Baltic Sea and shifts in nitrogen fixation analyzed with a 3D ecosystem model, *J. Marine Systems*, 2008, Vol. 74(1–2), pp. 592–602, https://doi.org/10.1016/j. jmarsys.2008.05.003.
- 31. Ołdakowski B., Kowalewski M., Jędrasik J., Szymelfenig M., Ecohydrodynamic model of the Baltic Sea. Part 1. Description of the ProDeMo model, *Oceanologia*, 2005, Vol. 47, No. 4, pp. 477–516.
- Omstedt A., Elken J., Lehmann A., Leppäranta M., Meier H. E. M., Myrberg K., Rutgersson A., Progress in physical oceanography of the Baltic Sea during the 2003–2014 period, *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 128, pp. 139–171, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.010.
- Ostrowska M., Majchrowski R., Stoń-Egiert J., Woźniak B., Ficek D., Dera J., Remote sensing of vertical phytoplankton pigment distributions in the Baltic: new mathematical expressions. Part 1: Total chlorophyll a distribution, *Oceanologia*, 2007, Vol. 49, No. 4, pp. 471–489.
- 34. Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G., Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton, *J. Marine Research*, 1980, Vol. 38, No. 4, pp. 687–701.
- 35. Sathyendranath S., Brewin R.J.W., Brockmann C., Brotas V., Calton B., Chuprin A., Cipollini P., Couto A.B., Dingle J., Doerffer R., Donlon C., Dowell M., Farman A., Grant M., Groom S., Horseman A., Jackson Th., Krasemann H., Lavender S., Martinez-Vicente V., Mazeran C., Mélin F., Moore T.S., Müller D., Regner P., Roy Sh., Steele Ch.J., Steinmetz F., Swinton J., Taberner M.,

Thompson A., Valente A., Zühlke M., Brando V.E., Feng H., Feldman G., Franz B.A., Frouin R., Gould R.W. Jr., Hooker S.B., Kahru M., Kratzer S., Greg M.B., Muller-Karger F.E., Sosik H.M., Voss K.J., Werdell J., Platt T., An ocean-colour time series for use in climate studies: The experience of the Ocean–Colour Climate Change Initiative (OC-CCI), *Sensors*, 2019, Vol. 19, Art. No. 4285, 31 p., https://doi.org/10.3390/s19194285.

- Siswanto E., Ishizaka J., Yokouchi K., Estimating chlorophyll-a vertical profiles from satellite data and the implication for primary production in Kuroshio front of the EC, *J. Oceanography*, 2005, Vol. 61, Issue 3, pp. 575–589, DOI: 10.1007/s10872-005-0066-7.
- 37. Steele J. H., Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnology and Oceanography*, 1962, Vol. 7, pp. 137–149.
- 38. Steemann-Nielsen E., The use of radioactive carbon (14C) for measuring organic production in the sea, *J. Conseil / Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer*, 1952, Vol. 18, pp. 117–140.
- 39. Stont Z. I., Bukanova T. V., General features of air temperature over coastal waters of the south-eastern Baltic Sea for 2004–2017, *Russian J. Earth Sciences*, 2019, Vol. 19, No. 3, Art. No. ES3001, 9 p., DOI: 10.2205/2019ES000657.
- 40. Stramska M., Zuzewicz A., Comparison of primary productivity estimates in the Baltic Sea based on the DESAMBEM algorithm with estimates based on other similar algorithms, *Oceanologia*, 2013, Vol. 55, No. 1, pp. 77–100, https://doi.org/10.5697/oc.55-1.077.
- 41. Vant W. N., Budd R. G., Phytoplankton photosynthesis and growth in contrasting regions of Manukau Harbour, New Zealand, *New Zealand J. Marine and Freshwater Research*, 1993, Vol. 27, No. 3, pp. 295–307.
- 42. Wasmund N., Nauch G., Matthäus W., Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea spatiotemporal development and long-term trends, *J. Plankton Research*, 1998, No. 20, pp. 1099–1117.
- 43. Woźniak B., Hapter R., Dera J., Light curves of marine plankton photosynthesis in the Baltic, *Oceanologia*, 1989, Vol. 27, pp. 61–78.
- Woźniak B., Bradtke K., Darecki M., Dera J., Dudzińska-Nowak J., Dzierzbicka-Glowacka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T., SatBaltyk – a Baltic environmental satellite remote sensing system – an ongoing project in Poland. Part 1: assumptions, scope and operating range, *Oceanologia*, 2011, Vol. 53, Issue 4, pp. 897–924, https://doi.org/10.5697/oc.53-4.897.
- 45. Zdun A., Stoń-Egiert J., Ficek D., Ostrowska M., Seasonal and Spatial Changes of Primary Production in the Baltic Sea (Europe) Based on in situ Measurements in the Period of 1993–2018, *Frontiers in Marine Science*, 2021, Vol. 7, Art. No. 604532, 14 p., https://doi.org/10.3389/fmars.2020.604532.
- 46. Zheng Y., Shen R., Wang Y., Li X., Liu S., Liang S., Chen J. M., Ju W., Zhang L., Yuan W., Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation 1982–2017, *Earth System Science Data*, 2020, Vol. 12, pp. 2725–2746, https://doi.org/10.5194/essd-12-2725-2020.