

*Е. А. Кудрявцева, В. В. Сивков*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКА СЕККИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ  
ФОТИЧЕСКОГО СЛОЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ ПО ДАННЫМ  
ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ IN SITU**

*E. A. Kudryavtzeva, V. V. Sivkov*

**THE USE OF SECCHI DEPTH DATA FOR DETERMINING EUPHOTIC  
DEPTH IN THE SOUTH-EASTERN BALTIC SEA ON THE BASE  
OF MEASURING PRIMARY PRODUCTION IN SITU**

С наибольшей достоверностью глубину фотического слоя можно выявить непосредственными измерениями интенсивности фотосинтеза в водной толще. Гораздо чаще в практике морских исследований используется непрямой гидрооптический метод определения световой границы, до которой потенциально возможен фотосинтез. В данной работе предложен региональный регрессионный алгоритм вычисления толщины фотического слоя, полученный по данным сезонных измерений первичной продукции in situ и относительной прозрачности вод диском Секки в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря.

**Ключевые слова:** *первичная продукция, фотический слой, диск Секки, регрессионное уравнение, Балтийское море.*

Measuring the photosynthesis rate in situ provides much more reliable estimates of the prevailing euphotic depth. A widely used way to evaluate potential zone for photosynthesis in natural waters is to measure the Secchi depth. This paper presents results of our seasonal observations of primary production in situ coupled with a visual measure of water transparency from the South-Eastern Baltic Sea through developed the regional regression algorithm.

**Keywords:** *primary production, euphotic depth, Secchi disk, regression equation, Baltic Sea.*

**Введение**

Свет в море поглощается молекулами воды, частицами взвеси, окрашенными растворенными органическими веществами и планктоном. Количество света, проникающего в воду, снижается с увеличением толщины поглощающего слоя и концентрации растворенных в нем веществ. В связи с этим процессы ассимиляции минеральных веществ и увеличение биомассы фитопланктона могут происходить только в относительно узком поверхностном слое, в котором сила света составляет не менее  $0,002 \dots 0,009 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Глубже интенсивность фотосинтеза клетки становится ниже, чем интенсивность дыхания, размножение и жизнедеятельность автотрофных организмов затухает, они гибнут. Эта глубина известна как компенсационная глубина, а интенсивность света на этой глубине — как компенсационная интенсивность света [18]. В процессе перемешивания по вертикали клетки фитопланктона оказываются выше и ниже компенсационной глубины и облучаются светом средней интенсивности. Глубина, на которой средняя интенсивность света равна компенсационной интенсивности, известна как критическая глубина.

Компенсационная интенсивность света для морского фитопланктона обычно на два порядка ниже средних значений фотосинтетически активной радиации (ФАР, 400–700 нм) на поверхности, поэтому компенсационной глубиной считают глубину, на которой величина радиации составляет 1 % или 0,1 %, наблюдаемой на поверхности [6, 20].

Существуют два способа для определения подводной облученности. Первый состоит в измерении интенсивности света с помощью светочувствительных датчиков (типа Li-Cor, QSP — США; QSM — Швеция). Второй основан на измерении глубины, на которой диск Секки исчезает из вида ( $D$ , м). Это легкий недорогой метод, который до сих пор широко используется в морских исследованиях и различных программах экологического мониторинга как показатель, описывающий состояние окружающей среды.

Связь между оптическими свойствами вод и данными диска Секки выражается через переходный коэффициент  $m$ , величины которого изменяются от 1 до 10, но чаще всего используется коэффициент 3, общий для мутных вод [9, 12]. По сравнению с прямыми измерениями радиации в диапазоне ФАР непрямой метод достаточно груб и приводит существенным ошибкам в измерениях из-за постоянно изменяющихся условий: состояния поверхности моря, высоты солнца над горизонтом, человеческого фактора и др.

Несмотря на все недостатки в отечественных, да и в зарубежных исследованиях, в т.ч. в Балтийском море, прямые измерения ФАР для определения нижней границы фотического слоя выполняются менее часто, чем измерения относительной прозрачности вод диском Секки, не говоря уже о громоздких и трудоемких измерениях интенсивности фотосинтеза в водной толще *in situ*. На примере акваторий, примыкающих к побережью Финляндии, показано, что метод работает с достаточной точностью [13].

В этой статье приводятся результаты наблюдений вертикального распределения первичной продукции фитопланктона *in situ* на поплавках в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря. Сопоставление полученных результатов с данными измерений относительной прозрачности воды позволило рассмотреть сезонные изменения толщины фотического слоя и вывести региональное регрессионное соотношение, характеризующее разнонаправленные изменения величин переходного коэффициента  $m$  и относительной прозрачности вод в зависимости от толщины фотического слоя.

### Материалы и методы

Основной материал для данной работы собран в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря в период с апреля 2008 г. по апрель 2009 г. (рис. 1, а). В этот отрезок времени проводились ежемесячные измерения первичной продукции *in situ*, т.е. на поплавках, установленных в точке 24 глубиной 35 м (рис. 1, б). Согласно классификации Андрулевича, разработанной для Гданьского залива, интервал глубин от 20 до 40 м характеризуется поочередным влиянием относительно мутных прибрежных вод и относительно прозрачных вод открытого моря [7]. Это дает основания считать, что полученные данные относятся к обоим типам вод. Помимо ежемесячных наблюдений на станции 24 в рейсах НИС «Профессор Штокман» в 2006–2008 гг. были выполнены четыре измерения первичной продукции *in situ*, в открытом море (75 рейс — в начале марта, 78 рейс — в июле, 90 рейс — в октябре) и прибрежной зоне (82 рейс — в октябре). Всего получено 16 профилей.

Первичную продукцию фитопланктона изучали радиоуглеродной модификацией скляночного метода [1, 3, 5]. Использовали склянки объемом 310 мл, в которые добавляли 100 мкл рабочего раствора изотопа  $^{14}\text{C}$  бикарбоната активностью 1–5 мкКю. Для определения интенсивности фотосинтеза применяли прозрачный флакон, а для определения скорости темновой ассимиляции  $\text{CO}_2$  использовали темный флакон, покрытый алюминиевой фольгой. Все отобранные с 5 м интервалом пробы в двойной повторности экспонировались в водной толще *in situ* в разных частях акватории от 4 до 24 часов. Пробы фильтровали через капроновые фильтры (ООО «Катехол Хром») с размером пор 0,2 мкм. После фильтрации фильтры смачивали 1-процентным раствором соляной кислоты для удаления остатков изотопа  $^{14}\text{C}$  бикарбоната. Измерения  $\beta$ -излучения фильтров проводили на сцинтилляционных счетчиках Mark-2 в ИГКЭ Росгидромета и РАН и Rackbeta в ИНМИ РАН.

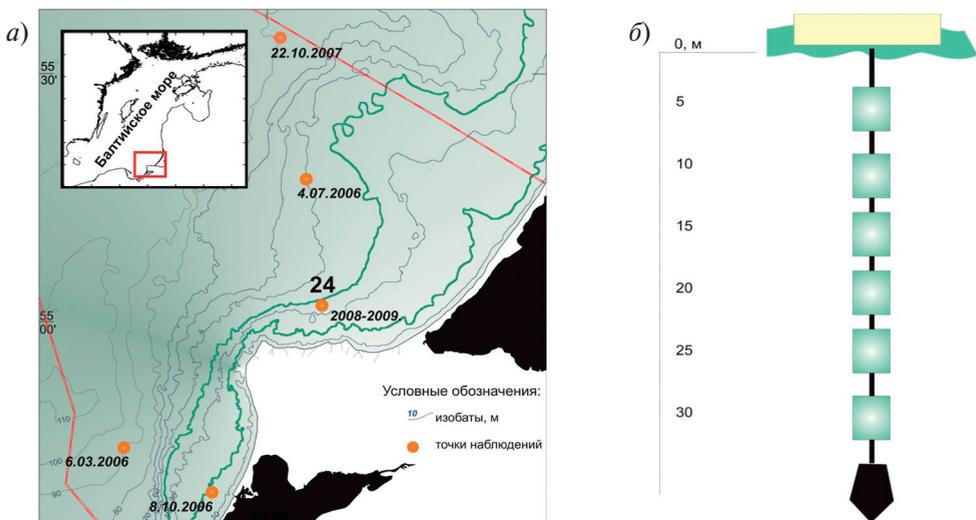


Рис. 1. Район исследований, точки измерений (а) и схема экспозиции проб *in situ* (б).  
Изобаты 20 и 40 м выделены зеленым согласно районированию Гданьского залива [7]

Гидрооптические наблюдения подводной облученности ограничивались измерениями прозрачности воды белым диском Секки. Наземный люксметр ТКА-ЛЮКС (диапазон измерений 400–700 нм) использовался для учета светового потока, пришедшего к поверхности моря в течение дня [4]. Для перевода единиц освещенности в энергетические единицы принималось, что 1 лк приблизительно равен  $6 \cdot 10^6 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$  для солнечного света на поверхности моря [17]. Осредненная за день суммарная облученность в диапазоне ФАР на стандартных горизонтах, а также глубина фотической зоны, рассчитывались математически, путем преобразования известного закона ослабления света в столбе воды Бугера–Ламберта с учетом поправки на альbedo 6 %:

$$I_z = I_0 e^{-kz}, \quad (1)$$

где  $I_z$  — интенсивность радиации, достигшая глубины  $z$ ;  $I_0$  — начальная интенсивность света;  $k$  — показатель вертикального ослабления интенсивности света.

Интегральный показатель вертикального ослабления света для видимого диапазона, описывающий изменения с глубиной абсолютных спектральных значений облученности, является функцией относительной прозрачности воды по диску Секки [2]. Для внутренней части Гданьского залива и Пуцкой лагуны, где прозрачность вод изменяется от 1 до 7,5 м, получено региональное регрессионное соотношение между этими показателями [14]. Однако нами использована иная зависимость между коэффициентом вертикального ослабления света и относительной прозрачностью воды, предложенная Холмсом для мутных прибрежных вод и применимая для более широкого диапазона величин прозрачности воды от 2 до 12 м [9]:

$$k = 1,44/D, \quad (2)$$

где  $D$  — относительная прозрачность воды по диску Секки, м;  $k$  — показатель вертикального ослабления света,  $\text{м}^{-1}$ .

Эффект избирательного спектрального ослабления в Балтийском море небольшое значение по сравнению с чистыми океаническими водами [10, 14].

## Результаты

На станции 24 в 2008–2009 гг. величины первичной продукции изменялись в широких пределах и достигали максимальных значений в поверхностном слое (от  $9 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$  в январе до  $738 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$  в апреле). Эффект светового угнетения фотосинтеза не проявлялся или не было возможности его зафиксировать. Только в мае отмечались приблизительно равные величины первичной продукции у поверхности и на глубине 5 м (соответственно 51 и  $49 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ). Нижняя граница фотического слоя в течение всего года лежала между стандартными горизонтами 15 или 20 м, на следующем стандартом горизонте отбора проб фотосинтез выявлен не был (рис. 2). Наименьших глубин фотический слой достигал во время летнего максимума первичной продукции в июле, а также зимой.

В трех точках наблюдений первичной продукции *in situ*, расположенных в открытом море (район с глубинами  $>40$  м), измерения были проведены во все сезоны, кроме весеннего. В июле и октябре стандартный горизонт 25 м оставался последним, на котором световая ассимиляция углекислоты превышала значения, полученные в темных склянках, в марте — горизонт 20 м. В прибрежном районе, в котором единственное измерение было выполнено в начале октября 2007 г., фотический слой упирался в дно (глубина точки наблюдений 19 м).

В период ежемесячных наблюдений низкие значения относительной прозрачности отмечались чаще, чем высокие. В отличие от толщины фотического слоя, которая на станции 24 изменялась незначительно (в 1,3 раза), прозрачность воды отличалась большей вариабельностью (в 4 раза). Согласно собственным многолетним наблюдениям,

проведенным в 2003–2015 гг., экстремальные значения прозрачности вод в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря достигают 2 и 13 м, т.е. различаются почти в 7 раз (табл. 1). Очевидно, что в наиболее прозрачных водах открытых морских районов свет достигает больших глубин, чем в более мутных прибрежных. Для прибрежного мелководья в течение всего года, а также для периода биологического лета во всех трех выделенных подрайонах, наблюдается минимальная амплитуда относительной прозрачности воды и уровня подповерхностной облученности. Максимальные колебания световых условий характерны для весеннего периода и района с глубинами 20...40 м. Вследствие относительно небольшой изменчивости толщины фотического слоя корреляционная взаимосвязь с прозрачностью воды выявлена не была ( $R^2 = 0,1$ ).

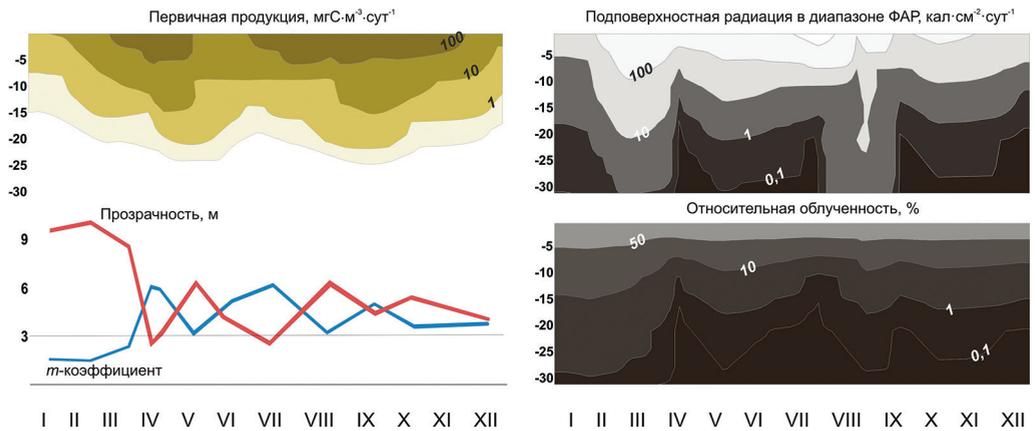


Рис. 2. Сезонная динамика первичной продукции *in situ*, относительной подповерхностной облученности, подводной радиации в диапазоне ФАР, относительной прозрачности воды и *m*-коэффициента

Таблица 1 (начало)

**Среднесезонные величины прозрачности воды и глубины, соответствующие разному уровню подповерхностной облученности в диапазоне ФАР**

Район	Относительная прозрачность <i>D</i> , м				Облученность		«Световые» глубины, м				
		зима	весна	лето	осень	%	кал см <sup>2</sup> ·день <sup>-1</sup>	зима	весна	лето	осень
						100					
0–20 м	<i>n</i>	13	29	50	27			56 ± 37	331 ± 173	399 ± 498	66 ± 45
	среднее	4,2	4,3	3,3	3,5	50		1,9	2	1,5	1,6
	σ	1,4	1,6	0,9	1,6	10		5,6	5,9	4,4	4,8
	min	2,5	2,5	2	1,5	1		11,3	11,8	8,9	9,6
	max	7	7,5	5,5	8	0,1		18,8	17,7	13,3	16
20–40 м	<i>n</i>	15	18	31	18						
	среднее	8,5	6,6	3,9	6,3	50		3,9	3	1,8	2,9
	σ	2,4	2,5	0,7	1,9	10		11,5	9	5,2	8,5
	min	4	2,5	2,5	3	1		22,9	17,9	10,5	17,1
	max	12	13	6	11	0,1		38,3	26,9	15,7	28,5

Район	Относительная прозрачность $D$ , м				Облученность		«Световые» глубины, м				
		зима	весна	лето	осень	%	кал	зима	весна	лето	осень
						100	см <sup>2</sup> · день <sup>1</sup>				
	$n$	12	17	37	17			56 ± 37	331 ± 173	399 ± 498	66 ± 45
> 40 м	среднее	10,9	8,1	4	7,7	50		5	3,7	1,8	3,5
	$\sigma$	1,9	2,1	0,7	1,3	10		14,8	10,9	5,4	10,4
	min	8	4	2	5,5	1		29,6	21,8	10,8	20,9
	max	14	12	5	10	0,1		49,3	38,1	17,6	39,9

**Примечание.**  $n$  — число измерений; среднее — среднее арифметическое;  $\sigma$  — стандартное отклонение; min — минимальное значение; max — максимальная величина.

Вычисленные по результатам наших наблюдений  $m$ -коэффициенты изменялись в 4 раза. Зимой во время продолжительного минимума первичной продукции соотношение между толщиной фотического слоя по данным измерений *in situ* и прозрачностью воды составляло 1,5...2,1. Наоборот, во время весеннего и летнего «цветений» фитопланктона в апреле и июле величины  $m$ -коэффициента были равны 5,7...6. По этим крайним значениям в ряду наблюдений хорошо видно, что применение наиболее часто встречающегося в литературе фиксированного коэффициента 3 для вычисления толщины фотического слоя приводит к занижению оценки толщины фотического слоя в летний период и существенному увеличению его толщины зимой.

### Обсуждение результатов

Наши результаты хорошо согласуются с литературными данными, в которых было показано, что  $m$ -коэффициент является линейной, или степенной, функцией изменений значений относительной прозрачности воды [13]. Преобразования значений относительной прозрачности воды в толщину фотического слоя на основе усредненных коэффициентов, в т.ч. масштабируемых, приводят к переоценке смоделированных значений фотического слоя в относительно прозрачных водах и недооценке их в относительно мутных водах. Применение регрессионного соотношения позволяет учитывать существенную пространственно-временную изменчивость толщины фотического слоя и хорошую подгонку модели ко всему диапазону данных.

Согласно нашим данным, для российского сектора юго-восточной части Балтики применимо следующее статистически значимое региональное регрессионное уравнение, полученное на основании измерений первичной продукции *in situ*:

$$m = 6,76(\pm 0,39) - 0,49(\pm 0,06) D; \tag{3}$$

$$R^2 = 0,83; \quad n = 16; \quad SE = 0,65; \quad F = 67; \quad p = 1 \cdot 10^{-6},$$

где  $m$  — коэффициент для вычисления толщины фотического слоя;  $D$  — глубина видимости диска Секки, м.

Лухтала и Толванен [13] сравнивали результаты определений толщины фотического слоя диском Секки с данными измерений оптическими датчиками глубин проникновения абсолютных величин радиации в диапазоне ФАР. Однако толщина фотического

слоя зависит не только от изменяющихся во времени и пространстве оптических условий фотосинтеза в водной толще и абсолютных величин солнечного излучения, приходящих к поверхности моря, но и от некоторых других факторов, которые можно выявить только с помощью прямых измерений интенсивности фотосинтеза *in situ*.

Зимние месяцы январь и февраль характеризовались худшими за период наблюдений «световыми» условиями для фотосинтеза (осредненная за день радиация в диапазоне ФАР составляла  $20 \pm 1,5 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ ) и наименьшими величинами первичной продукции фитопланктона. Нижней границе фотического слоя, приблизительно расположенной на стандартной глубине 15 м, соответствовал уровень подповерхностной облученности  $2,20 \pm 0,06 \%$  от величины радиации в диапазоне ФАР, пришедшей к поверхности моря. С января в верхнем пятнадцатиметровом слое отмечался конвективный фронт, возникающий при температуре максимальной плотности воды ( $2,4 \dots 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

В конце гидрологической зимы, которая в исследуемом районе приходится на первую половину марта, инсоляция возрастала на порядок (до  $517 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ ). Увеличение интенсивности света, которая увеличивает объем пригодного для фотосинтеза слоя воды, скорее всего является спусковым фактором для активизации весеннего «цветения» фитопланктона. При данном уровне облучения величина радиации в диапазоне ФАР, составляющая 1 % от наблюдаемой на поверхности, на станции 24 достигала глубины 31 м. Величина радиации, составляющая 0,1 % от наблюдаемой на поверхности, согласно расчетам, могла бы достигнуть глубины 41 м.

Однако суточная критическая глубина находилась выше принятых «световых» границ фотического слоя, на глубине, соответствующей 17,47 % радиации в диапазоне ФАР, пришедшей к поверхности моря. Эта глубина совпадала с нижней границей слоя, вовлеченного в конвективное перемешивание при максимальной плотности воды ( $2,4 \dots 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), т.е. в начале марта создавались особые условия, когда несмотря на увеличение облученности и проникновения света на относительно большие глубины вследствие высокой прозрачности воды фотосинтез отмечался только в верхнем слое, вовлеченном в конвективное перемешивание. Из литературы известно и подтверждается наблюдениями, проведенными в последние годы в исследуемом районе, что в конце холодных зим в условиях возникающего при температуре максимальной плотности конвективного перемешивания («*the spring overturn*») преимущественно развиваются мелкоклеточные диатомовые до тех пор, пока верхний слой не стабилизируется [21].

Согласно выполненным вычислениям оптических глубин, в периоды бурных «цветений» фитопланктона в апреле и июле фотосинтез фиксируется на глубинах с минимальным уровнем облученности, всего  $0,13 \pm 0,13 \%$  солнечной радиации в диапазоне ФАР ( $623 \pm 766 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ ). При очень высоких скоростях ассимиляции и отсутствии плотностных градиентов (в июле термоклин лежит значительно глубже зоны фотосинтеза, а в апреле характеризовался либо очень слабыми градиентами — 2009 г., либо отсутствовал — 2008 г.) живые клетки фитопланктона в процессе перемешивания могут опускаться на глубины с минимальными количествами света.

Наконец, хотелось бы отметить результаты, полученные в мае, которые являются примером влияния гидрологической структуры вод на толщину фотического слоя. В мае верхняя граница термоклина находилась на глубине 20 м, над которой отмечались

максимальные по вертикальному профилю концентрации хлорофилла *a* и величины биомассы фитопланктона, также данная глубина являлась последним горизонтом, на котором была зафиксирована величина первичной продукции ( $0,05 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ), на границе чувствительности радиоуглеродного метода. Хотя при уровне облучения в день наблюдений ( $299 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ ) величина радиации в диапазоне ФАР, составляющая 1 % от наблюдаемой на поверхности, на станции 24 достигала глубины 24,9 м, на глубине 20 м она была равна 2,46 %. Таким образом, определение толщины фотического слоя по «световой» глубине 1 % давало ее увеличение на 5 м.

Для исследуемого района в мае в целом характерны экстремальные величины облученности и существенное снижение интенсивности фотосинтеза вследствие азотного голодания водорослей. С ухудшением физиологического состояния оседающие клетки фитопланктона скапливаются у верхней границы термоклина. По-видимому, на некоторое время они сохраняют жизнеспособность. Как и зимой, когда развитие фитопланктона ограничивается слабой освещенностью и нестабильностью вод, во время весенне-летнего минимума первичной продукции толщина фотического слоя сокращается и могла бы быть еще меньше, если бы не термоклин.

Согласно литературным данным, полученным путем измерений скорости фотосинтеза *in situ* в 1979–1983 гг., толщина фотического слоя в глубоководной части Гданьского бассейна изменялась от 10 до 18 м [15]. Принципиально, наши данные согласуются с результатами польских исследователей в том, что минимальная толщина фотического слоя характерна для зимы. Однако наши измерения дают большую протяженность слоя фотосинтеза. Это расхождение отчасти можно связать с многолетними изменениями, произошедшими в экосистеме моря со времени предшествующих исследований. Известно, что воды Гданьского бассейна, как и всего Балтийского моря, относятся ко 2 типу оптически сложных вод с высокими концентрациями растворенного органического вещества («желтое вещество»), неорганической взвеси и хлорофилла *a*, присутствие которых во многом определяется стоком крупных рек [11]. В 1980-х гг. Гданьский залив находился под максимальным антропогенным давлением, ежегодный уровень первичной продукции соответствовал эвтрофному уровню [16]. В эти годы среднегодовая прозрачность вод снизилась до 4,7 м по сравнению с уровнем 1970-х гг., когда среднегодовая прозрачность воды составляла 7,6 м [19]. Увеличение среднегодовой прозрачности вод в открытых районах Гданьского бассейна (по нашим наблюдениям, до 7,7 м), способствующее увеличению пригодного для фотосинтеза объема воды, явилось следствием принятых по снижению загрязнения моря мер [8].

Толщина фотического слоя является ключевым показателем состояния морской среды, отличающимся сложной пространственно-временной изменчивостью, зависящей не только от энергетических характеристик светового поля в водной толще, но и от гидрологической структуры вод и стадии сезонной сукцессии фитопланктона. Использование предложенного в данной работе регионального регрессионного алгоритма позволяет подбирать переходный коэффициент для определения толщины фотического слоя по данным измерений прозрачности вод диском Секки для любых месяцев и участков акватории российского сектора юго-восточной части Балтийского моря с учетом не только интенсивности солнечного излучения и оптических свойств вод, но сукцессионных изменений в планктонном сообществе.

## Литература

1. Кузнецов С.И., Дубинина И.А. Методы изучения водных микроорганизмов. — М.: Наука, 1989. — 288 с.
2. Малинин В.Н. Общая океанология. Ч. 1. Физические процессы. — СПб.: РГГМУ, 1998. — 348 с.
3. Сорокин Ю.И. К оценке адекватности радиоуглеродного метода измерения первичной продукции // Океанология. 1987. Т. 27. № 4. — С. 678–682.
4. Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И. Методика измерения фотосинтетически активной радиации. — М.: Наука, 1967. — 144 с.
5. Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 168 с.
6. Anderson G.C. Subsurface chlorophyll maximum in the Northeast Pacific Ocean // Limnol. And Oceanogr. 1969. Vol. 14. № 3. — P. 386–391.
7. Andrulewicz E., Kruk-Dowgiallo L., Osowiecki A. An expert judgement approach to designating ecosystem typology and assessing the health of the Gulf of Gdansk // Managing the Baltic Sea. Coastline Reports. 2004. — P. 53–61.
8. HELCOM. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011. A concise thematic assessment // Baltic Sea Environment Proceeding. 2014. № 143. — 41 p.
9. Holmes R.W. The Secchi disk in turbid coastal waters // Limnol. Oceanogr. 1970. Vol. 15. — P. 688–694.
10. Kaczmarek S., Woźniak B. The application of the optical classification of waters in Baltic Sea (Case 2 Waters) // Oceanologia. 1995. Vol. 37(2). — P. 285–297.
11. Kratzer S., Håkansson B., Sahlin C. Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data // Ambio. 2003. Vol. 32. — P. 577–585.
12. Koenings J.P., Edmundson J.A. Secchi disk and photometer estimates of light regimes in Alaskan lakes: Effects of yellow color and turbidity // Limnol. Oceanogr. 1991. Vol. 36. — P. 91–105.
13. Luhtala H., Tolvanen H. Optimizing the use of Secchi depth as a proxy for euphotic depth in coastal waters: an empirical study from the Baltic sea // International Journal of Geo-Information. 2013. — P. 1153–1168.
14. Matciak M. Estimation of the attenuation of visible light in waters of the Gulf of Gdansk with the use of Secchi transparency // Oceanological Studies. 1997. Vol. XXVI4. — P. 35–40.
15. Renk H. Primary production in the Southern Baltic in 1979–1983 // Oceanologia. 1990. Vol. 29. — P. 51–75.
16. Renk H. Primary production in the Southern Baltic // Studia i Materiały MIR. 2000. Ser. A. № 35.
17. Strickland J.D.H. Solar radiation penetrating the Ocean. A review of requirements, data and methods of measurement with particular reference to photosynthetic productivity // Journal of the fisheries research board of Canada. 1958. Vol. 15, № 3. — P. 453–493.
18. Sverdrup H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer. 1953. Vol. 18. — P. 287–295.
19. Trzosiska A. Water transparency in the polish zone of the Baltic Sea // Oceanologia. 1992. Vol. 33. — P. 203–209.
20. Vollenweider R.A. A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments // Handbook IBP. — Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1969. № 12. — 213 p.
21. Wasmund N., Nauch G., Matthäus W. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea—spatial-temporal development and long-term trends // Journal of Plankton Research. 1998. № 20. — P. 1099–1117.