

УДК 581.526.325:581.132 (262.5)

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ФИТОПЛАНКТНОМ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ СЕВАСТОПОЛЯ

Джулай А. А.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского НАН Украины, Севастополь, artem.july@gmail.com

Оценены межгодовые и внутригодовые изменения концентрации хлорофилла *a*, относительного содержания вспомогательных пигментов, величин удельных коэффициентов и формы спектров поглощения света фитопланктоном поверхностных вод в районе Севастополя в период с 2009 по 2012 г. Получены степенные зависимости поглощения света пигментами фитопланктона от концентрации хлорофилла *a* для отдельных сезонов.

Ключевые слова: фитопланктон, хлорофилл *a*, пигментный индекс, поглощение света фитопланктоном, Черное море, Севастопольская бухта.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность био-оптических исследований, прежде всего, связана с тем, что эффективность поглощения света определяет эффективность фотосинтеза и, следовательно, продуктивность фитопланктона [1].

Цель данной работы состояла в сравнении сезонной и межгодовой изменчивости содержания пигментов фитопланктона в поверхностном слое, коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона и формы их спектров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор проб проводился с февраля 2009 по февраль 2012 г. раз в две недели в поверхностном слое на трех станциях, схема расположения которых показана на рисунке 1: станция 1 расположена в двухмильной зоне от берега; станция 2 – вблизи Константиновского равелина, станция 3 – в Сухарной балке. В процессе работы измеряли концентрацию хлорофилла *a* (в сумме с феопигментами) (C_a) и поглощение света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$).



Рис. 1. Схема расположения исследуемых станций в Севастопольской бухте

1 – двухмильная зона от берега (44°37'26'' с. ш., 33°26'05'' в. д.); 2 – вблизи Константиновского равелина (44°37'26'' с. ш., 33°30'46'' в. д.); 3 – в Сухарной балке (44°37'01'' с. ш., 33°34'20'' в. д.).

Определение содержания хлорофилла *a* спектрофотометрическим методом [2]. Пробы фитопланктона объемом от 500 до 1500 мл осаждали на стекловолкнистые фильтры GF/F (Whatman) диаметром 25 мм фильтрацией при вакууме не более 0,2 атмосфер. Пигменты экстрагировали в 90% водном растворе ацетона в течение 18 часов в холодильнике при температуре +3 °С. Затем экстракт осветляли центрифугированием при скорости 3000 оборотов в минуту в течение 15 минут. Оптическую плотность ацетоновых экстрактов определяли на двухлучевом спектрофотометре Specord M40 (Carl Zeiss Jena). C_a рассчитывали по формуле [2]:

$$C_a = (11,85 \times OD_{664} - 1,54 \times OD_{647} - 0,08 \times OD_{630}) \times (V_{эк}/V_{пр} \times L_k), \quad (1)$$

где OD – оптическая плотность экстрактов на указанной длине волны с учетом поправки на неспецифическое поглощение на длине волны 750 нм, $V_{эк}$ – объем экстракта (мл), $V_{пр}$ – объем профильтрованной пробы (л), L_k – длина кюветы (см).

В ацетоновых экстрактах измеряли спектры оптической плотности в диапазоне длин волн от 400 до 750 нм, что позволило определить величину пигментного индекса (ПИ) – отношение между оптическими плотностями в максимумах спектра поглощения вблизи длин волн 430 и 663 нм соответственно ($ПИ = OD_{430}/OD_{663}$).

Определение коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона. Спектральные измерения выполнены по стандартной методике «количественного определения на увлажненных фильтрах» («Quantitative Filter Technique») [3, 4].

Как и в предыдущих измерениях, пробы фитопланктона объемом от 500 до 1500 мл фильтровали через стекловолкнистые фильтры GF/F (Whatman) диаметром 25 мм при вакууме не более 0,2 атмосфер. Оптические измерения проводили сразу же после фильтрации на двулучевом спектрофотометре Specord-M40 (Carl Zeiss Jena) в диапазоне длин волн λ от 400 до 750 нм. Оптическую плотность взвеси, собранной на фильтре, $OD_{fp}(\lambda)$ измеряли, предварительно увлажнив фильтр ультрафильтратом морской воды. Для сравнения использовали аналогично увлажненный чистый фильтр. В процессе сканирования (~ 2 минуты) влажность фильтра практически не изменялась. Пигменты фитопланктона экстрагировали по методике Тассан и Феррари [5]. Затем измеряли оптическую плотность обесцвеченной взвеси $OD_{fd}(\lambda)$. Аналогичным образом был обработан и фильтр сравнения.

Для перехода от значений оптической плотности взвеси на фильтре, $OD_{fp}(\lambda)$ и $OD_{fd}(\lambda)$, к величинам оптической плотности в суспензии, $OD_p(\lambda)$ и $OD_d(\lambda)$, использовали уравнение [6]:

$$OD_{p/d}(\lambda) = a \times OD_f(\lambda) + b \times [OD_f(\lambda)]^2, \quad (2)$$

где $a = 0,392$ и $b = 0,655$ – коэффициенты для фильтров GF/F.

Затем рассчитывали коэффициенты поглощения света пигментами фитопланктона по формулам:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda), \text{ м}^{-1}, \quad (3)$$

$$a_p(\lambda) = 2,3 \times OD_p(\lambda) / l_g, \text{ м}^{-1} \quad (4)$$

$$a_d(\lambda) = 2,3 \times OD_d(\lambda) / l_g, \text{ м}^{-1} \quad (5)$$

$$a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda) / C_a, \text{ м}^2 \text{ мгХл}^{-1} \quad (6)$$

$$\overline{a_{ph}} = \int_{400}^{700} a_{ph}(\lambda) d\lambda / 300, \text{ м}^{-1} \quad (7)$$

В выражениях (4) и (5): 2,3 – коэффициент для перехода от десятичного логарифма к натуральному; l_g – геометрическая длина пути, $l_g = V_f / S$ (м); V_f – объем профильтрованной пробы (м³); S – рабочая площадь фильтра (м²); $a_{ph}(\lambda)$ – коэффициент поглощения света пигментами фитопланктона (м⁻¹); $a_p(\lambda)$ – коэффициент поглощения света взвесью (м⁻¹); $a_d(\lambda)$ – коэффициент поглощения света обесцвеченной взвесью (м⁻¹). Рассчитывали удельные (нормированные на содержание C_a) коэффициенты поглощения света пигментами фитопланктона – $a_{ph}^*(\lambda)$ и средние по спектру (в пределах видимого диапазона – 400–700 нм) коэффициенты поглощения света – $\overline{a_{ph}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сведения о статистических характеристиках исследованных параметров приведены в таблице 1. В таблице представлены пределы изменений и среднегодовые величины исследуемых параметров. Большие значения среднего квадратичного отклонения связаны с широким внутригодовым колебанием исследуемых величин, которое вызвано значительными сезонными различиями.

Таблица 1

Пределы изменений (верхняя строка) и средние значения (нижняя строка)
исследованных параметров в период с февраля 2009 по февраль 2012
(в скобках указана величина среднего квадратичного отклонения)

Год	Стан-ция	t, °C	Zs, м	S,‰	C _a , мг м ⁻³	$a_{ph}^*(440)$, м ² мгХл ⁻¹	$a_{ph}^*(678)$, м ² мгХл ⁻¹	$\overline{a_{ph}^*}$, м ² мгХл ⁻¹	R	ПИ	
2009	1	8,1–	11,0–	-	0,3–2,2	0,038–0,076	0,019–0,027	0,015–	1,8–	3,1–	
		23,0	17,0		1,0			0,030	3,3	4,0	
		14,0	12,6		(0,7)			0,024	2,4	3,5	
		(6,2)	(2,1)				(0,005)	(0,4)	(0,3)		
	2	5,2–	4,0–7,5	-	2,6–	0,027–0,068	0,015–0,031	0,009–	1,7–	2,7–	
		23,5	5,6 (1,0)		11,7			0,030	2,3	3,7	
		13,8			4,4			0,017	2,0	3,0	
		(7,0)		(2,8)			(0,006)	(0,2)	(0,4)		
	3	7,5–	2,5–5,5	-	3,0–	0,028–0,062	0,015–0,025	0,012–	1,8–	2,8–	
24,0		3,9 (1,0)	10,8		0,028			3,0	3,6		
14,2			4,6		0,018			2,2	3,1		
	(6,7)		(2,3)			(0,005)	(0,4)	(0,3)			

Окончание таблицы 1

Год	Станция	t, °C	Zs, м	S, ‰	C _a , мг м ⁻³	a _{ph} [*] (440), м ⁻² мгХл ⁻¹	a _{ph} [*] (678), м ⁻² мгХл ⁻¹	a _{ph} [*] , м ⁻² мгХл ⁻¹	R	ПИ
2010	1	7,9–26,5 16,4 (6,5)	6,0–18,0 13,4 (3,0)	-	0,3–1,6 0,8 (0,4)	0,037–0,096 0,061 (0,021)	0,013–0,034 0,024 (0,006)	0,017–0,045 0,028 (0,010)	1,9–3,5 2,6 (0,5)	3,0–7,4 4,6 (1,5)
	2	6,5–27,0 17,2 (7,0)	3,5–12,0 6,7 (2,6)	-	1,2–8,7 3,2 (2,2)	0,021–0,068 0,050 (0,014)	0,013–0,027 0,022 (0,005)	0,010–0,030 0,022 (0,006)	1,7–2,6 2,2 (0,3)	2,5–4,2 3,4 (0,5)
	3	6,0–27,4 17,8 (7,0)	1,5–4,5 3,5 (0,8)	-	1,2–5,8 3,7 (1,7)	0,038–0,088 0,059 (0,014)	0,016–0,025 0,021 (0,004)	0,014–0,036 0,025 (0,006)	2,2–3,7 2,8 (0,5)	2,8–3,9 3,5 (0,3)
2011	1	7,5–24,5 14,9 (6,1)	3,5–23,0 14,0 (5,5)	17,4–18,0 17,8 (0,1)	0,3–1,4 1,0 (0,3)	0,035–0,093 0,053 (0,016)	0,014–0,024 0,020 (0,003)	0,016–0,036 0,022 (0,006)	2,1–4,1 2,7 (0,5)	2,9–7,1 3,9 (1,0)
	2	5,8–25,5 15,5 (7,1)	3,0–8,5 5,7 (1,9)	17,4–17,9 17,7 (0,1)	1,0–10,6 3,4 (2,5)	0,018–0,085 0,045 (0,019)	0,010–0,028 0,019 (0,005)	0,008–0,034 0,019 (0,008)	1,7–3,1 3,1 (0,4)	2,2–4,0 3,1 (0,5)
	3	6,5–26,0 15,7 (7,4)	2,0–7,5 3,9 (1,4)	17,3–17,8 17,6 (0,2)	2,5–12,5 5,4 (2,8)	0,015–0,082 0,037 (0,020)	0,010–0,026 0,015 (0,004)	0,007–0,032 0,015 (0,008)	1,4–3,3 2,3 (0,6)	2,3–4,2 3,0 (0,5)

Примечание к таблице: C_a – концентрация хлорофилла *a* в сумме с феопигментами; a_{ph}^{*}(440) и a_{ph}^{*}(678) – величины удельных (нормированных на концентрацию хлорофилла *a* в сумме с феопигментами) коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона на 440 и 678 нм; a_{ph}^{*} – средние по спектру (в пределах видимого диапазона – 400–700 нм) коэффициенты поглощения света, нормированные на C_a; R – отношение поглощения света пигментами фитопланктона на 440 и 678 нм; ПИ – пигментный индекс; t – поверхностная температура воды; Zs – относительная прозрачность воды, оцененная по диску Секки; S – поверхностная соленость воды.

На рисунке 2 представлено изменение по сезонам средних за исследованный период величин концентрации хлорофилла *a* (2009–2012 гг.), наблюдавшееся на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя. Содержание хлорофилла *a* в Севастопольской бухте превышало его содержание в открытой части моря у берегов Севастополя практически на порядок. Концентрация хлорофилла *a* изменялась по сезонам в широком диапазоне. Зимние величины превышали летние на 70–90 %. Однако, несмотря на высокую внутригодовую вариабельность, среднегодовая величина C_a на станции 1, которую условно приняли за фоновую станцию, в течение трех лет изменялась слабо (~ на

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ФИТОПЛАНКТОНОМ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ СЕВАСТОПОЛЯ

20 %) и составила $\sim 1,0 \text{ мг/м}^{-3}$. Максимальная величина C_a , наблюдаемая в зимний период (февраль), составила в 2009 году 2,2, в 2010 – 1,6, а в 2011 – 1,4 мг/м^{-3} ; а минимальная величина составила $\sim 0,3 \text{ мг/м}^{-3}$, причем в 2009 минимум C_a наблюдался в июне, в 2010 – в июле, а в 2011 – в августе. На станциях 2 и 3 среднегодовая величина C_a варьировала в течение трех лет в широком диапазоне (табл. 1). Несмотря на значительную вариабельность концентрации хлорофилла в бухте, динамика его изменения на всех трех станциях имела U-образную форму: максимум в холодный период года, и минимум – в теплый (рис. 2).

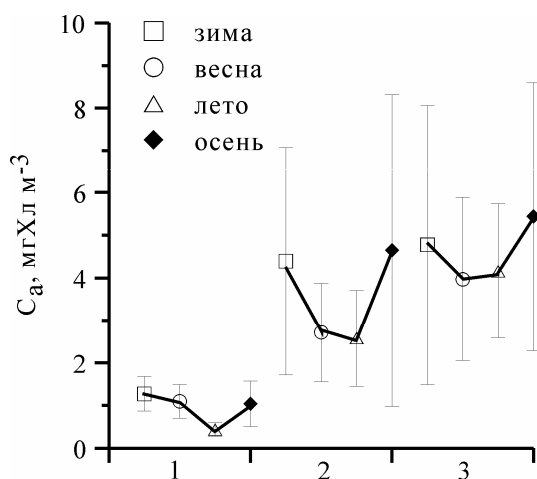


Рис. 2. Изменение усредненных за три года (2009–2012 гг.) величин концентрации хлорофилла *a* (в сумме с феопигментами) (C_a) по сезонам на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

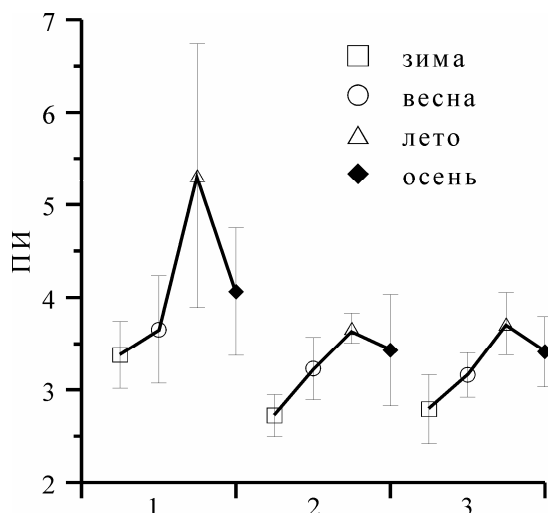


Рис. 3. Изменение усредненных за три года (2009–2012 гг.) величин пигментного индекса (ПИ) по сезонам на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

Для оценки относительного содержания вспомогательных пигментов в фитопланктоне использовали величину пигментного индекса (ПИ). На всех станциях наблюдался одинаковый характер изменения пигментного индекса: с

минимальными значениями в зимнее время и максимальными – в летнее (рис. 3). Данные, полученные на фоновой станции (станция 1) отличались от данных, полученных в бухте (станции 2 и 3) большими величинами ПИ в течение всего периода наблюдений (2,8–7,4) (табл. 1). В бухте величины ПИ варьировали от 2,2 до 5,3 (табл. 1). На фоновой станции внутри сезонные колебания ПИ были выражены более ярко, чем в бухте.

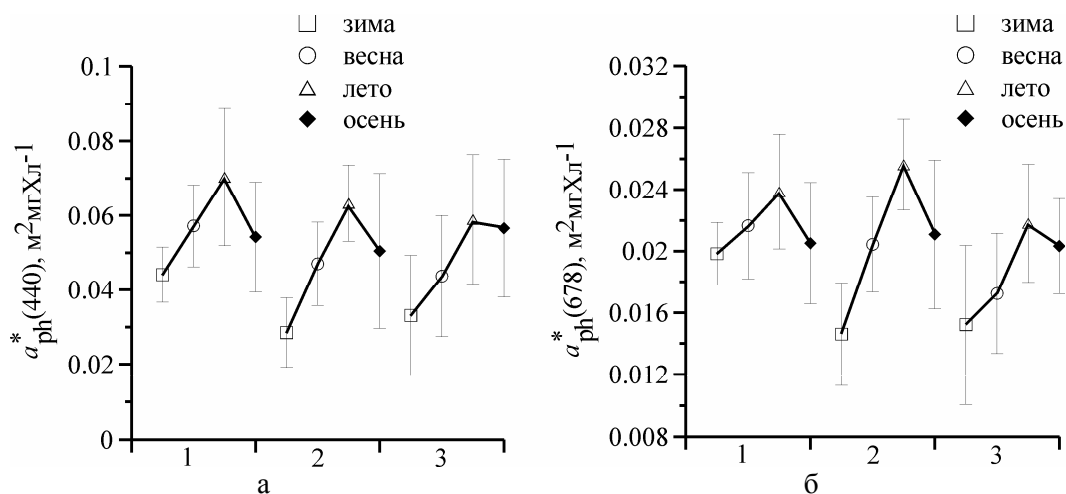


Рис. 4. Изменение усредненных за три года (2009–2012 гг.) величин удельных (нормированных на концентрацию хлорофилла a) коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона на длинах волн, соответствующих максимумам в синей – $a_{ph}^*(440)$ (а) и красной – $a_{ph}^*(678)$ (б) областях спектра по сезонам на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

Изменение относительного содержания вспомогательных пигментов в летний период привело к увеличению удельных коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона в максимуме, расположенном в синей части спектра ($a_{ph}^*(440)$) (рис. 4), где свет поглощается не только хлорофиллом a , но и вспомогательными пигментами [7]. Максимум на длине волны ~ 678 нм соответствует поглощению света хлорофиллом a и продуктами его распада. Помимо двух основных максимумов поглощения света (на длинах волн ~ 440 и ~ 678 нм), на всех спектрах (рис. 5) наблюдалось «плечо» на длине волны ~ 465 нм, соответствующее поглощению вспомогательными пигментами. На фоновой станции данное «плечо» было выражено заметнее, чем на станциях, расположенных в бухте. Причем летом 2010 года величины $a_{ph}^*(465)$ были на всех станциях больше, чем в другие годы, что, вероятно, связано с более высоким содержанием вспомогательных пигментов.

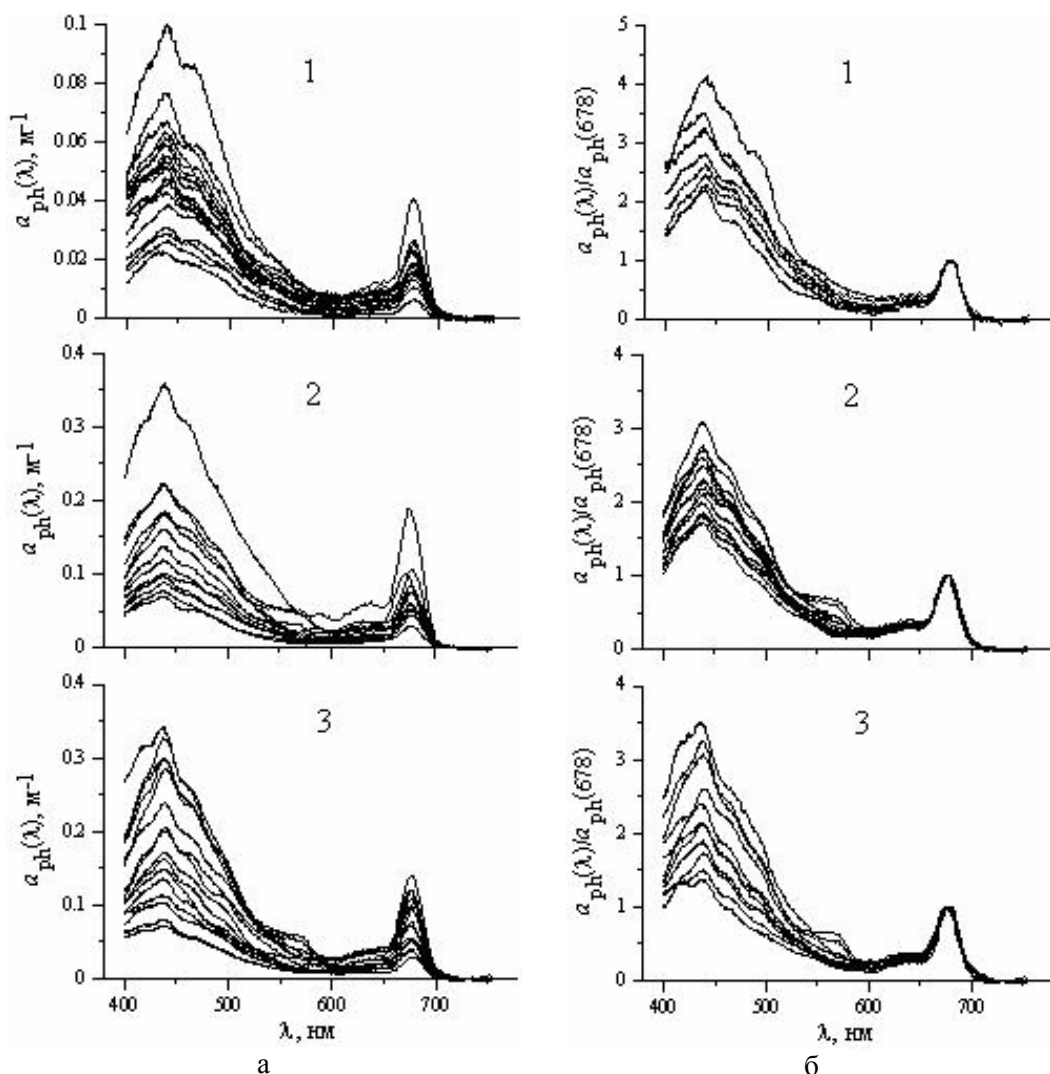


Рис. 5. Спектральное распределение коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона (а) и нормированных величин (б) на длине волны, соответствующей максимуму в красной области спектра ($a_{ph}(678)$) от длины волны в течение трех лет (2009–2012 гг.) на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

Изменение формы спектров поглощения света пигментами фитопланктона может быть оценено по отношению удельных коэффициентов поглощения света $a_{ph}^*(440)$ и $a_{ph}^*(678)$ – R (рис. 6). Получено, что среднегодовая величина R на всех станциях в 2010 году превышала примерно на 11–15 % величины R 2009 года (табл. 1), что, вероятно, обусловлено увеличением относительного содержания вспомогательных пигментов в клетках микроводорослей в летний период.

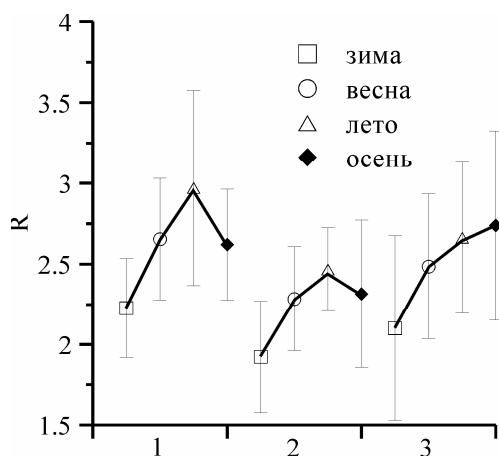


Рис. 6. Изменение усредненных за три года (2009–2012 гг.) величин отношения поглощения света пигментами фитопланктона на длинах волн, соответствующих максимумам в синей ($a_{ph}(440)$) и красной ($a_{ph}(678)$) областях спектра по сезонам на трех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

В связи с отмеченной внутригодовой вариабельностью исследуемых характеристик, были построены зависимости между $\overline{a_{ph}}$ и концентрацией хлорофилла a по сезонам (рис. 7). В общем виде уравнение параметризации имеет следующий вид:

$$a_{ph}(\lambda) = A \times C_a^B, \quad (8)$$

Коэффициент A в уравнении 8 соответствует поглощению света при единичной концентрации хлорофилла a .

Получены уравнения параметризации связи $\overline{a_{ph}}$ и C_a за три года (2009–2012 гг.) по сезонам в целом для всех станций (9 – зима, 10 – весна, 11 – лето, 12 – осень) (рис. 7):

$$\overline{a_{ph}} = 0,021 \times C_a^{0,61}, r^2 = 0,76 \quad (9)$$

$$\overline{a_{ph}} = 0,023 \times C_a^{0,71}, r^2 = 0,86 \quad (10)$$

$$\overline{a_{ph}} = 0,028 \times C_a^{0,88}, r^2 = 0,94 \quad (11)$$

$$\overline{a_{ph}} = 0,026 \times C_a^{0,83}, r^2 = 0,90, \quad (12)$$

Эти зависимости могут быть использованы для оценки общего количества поглощенных квантов поверхностным фитопланктоном по данным C_a .

Для всего массива данных получены связи между коэффициентами поглощения света пигментами фитопланктона на длинах волн, соответствующих максимумам в синей ($a_{ph}(440)$) и красной областях спектра ($a_{ph}(678)$) и концентрацией хлорофилла a (рис. 8):

$$a_{ph}(440) = 0,056 \times C_a^{0,72}, r^2 = 0,77 \quad (13)$$

$$a_{ph}(678) = 0,022 \times C_a^{0,84}, r^2 = 0,91 \quad (14)$$

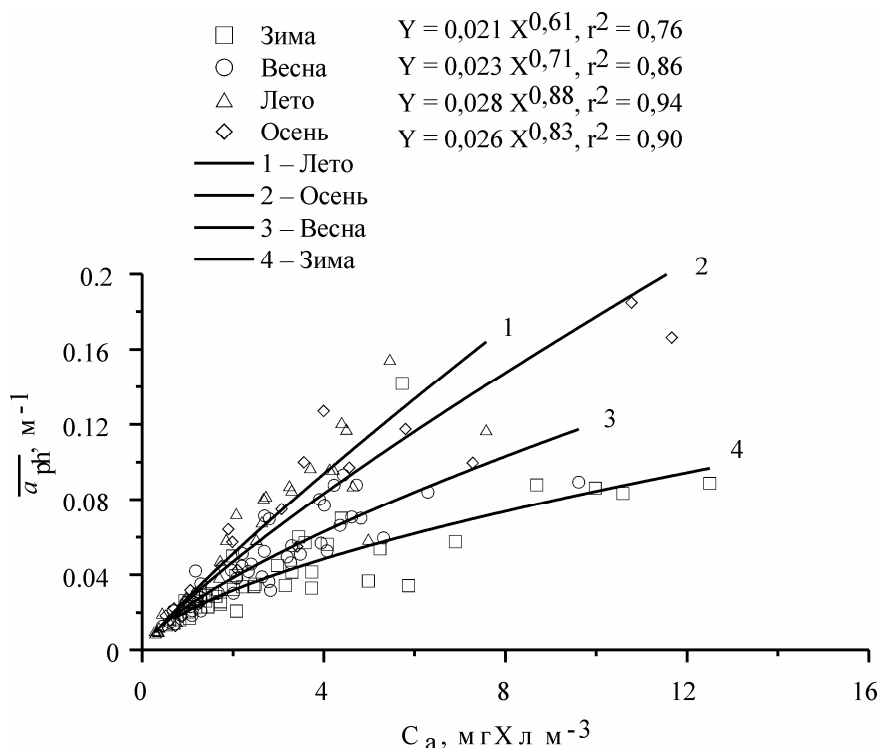


Рис. 7. Зависимость средних по спектру (в пределах видимого диапазона – 400–700 нм) коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона ($\overline{a_{ph}}$) от концентрации хлорофилла a (в сумме с феопигментами) (C_a) за три года (2009–2012 гг.) по сезонам на всех станциях в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя (1 – лето, 2 – осень, 3 – весна, 4 – зима)

ОБСУЖДЕНИЕ

Повышенное содержание хлорофилла a в бухте (станции 2 и 3) практически на порядок по сравнению с фоновой станцией связано с влиянием бытовых стоков и стока реки Черная, несущего воды, богатые биогенными веществами [8]. Наличие более пресных речных вод можно проследить по уменьшению солености от 17,8 до 17,6‰ при движении от станции 3 к станции 1 (табл. 1). На станциях, расположенных в бухте, наблюдается большая вариабельность C_a внутри года, чем на фоновой станции. Вероятно, это связано с ветровой деятельностью, которая сопровождается горизонтальной адвекцией вод, приводящей в зависимости от направления ветра либо к проникновению более «бедных» (содержащих меньше биогенных веществ) морских вод в бухту либо к выносу «богатых» (содержащих больше биогенных веществ) вод из бухты [8]. Фоновая станция, вследствие своего удаленного расположения от берега, в меньшей степени подвержена влиянию речного и бытовых стоков, распространяемых при движении водных масс.

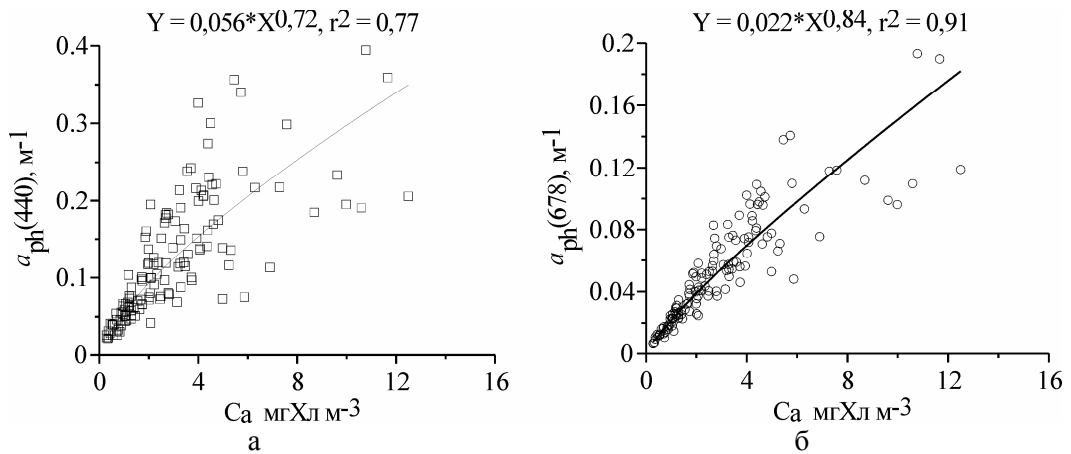


Рис. 8. Зависимость коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона на длинах волн, соответствующих максимумам в синей – $a_{ph}(440)$ (а) и красной – $a_{ph}(678)$ (б) областях спектра от концентрации хлорофилла a (в сумме с феопигментами) (C_a) за три года (2009–2012 гг.) в целом для всех станций в прибрежных поверхностных водах Черного моря в районе Севастополя

В исследованный период отмечено значительное различие метеорологических условий между годами. Так, например, летом (август) 2010 года температура воды была на 3–4 градуса выше, чем в 2009 и 2011 гг. В это время (август 2010 г.) относительное содержание вспомогательных пигментов в фитопланктоне на всех станциях превышало значения, полученные летом 2009 и 2011 гг. При этом следует отметить, что в течение всего периода исследований на фоновой станции величины ПИ почти в 2 раза превышали значения ПИ в бухте. Вероятно, это связано с различными условиями существования фитопланктона. На фоновой станции глубина видимости белого диска Секки всегда превышала значения на станциях в бухте (табл. 1). В условиях более высокой прозрачности вод освещенность верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) выше (при равных ВКС и падающей на поверхность фотосинтетически активной радиации (ФАР)), что приводит к повышению относительного содержания вспомогательных пигментов в клетках фитопланктона, а именно доля фотопротекторных пигментов увеличивается.

Также на большой вклад вспомогательных пигментов в общее поглощение за пределами бухты указывает более четко выраженное «плечо» на спектрах поглощения света (рис. 5). Можно предположить, что изменение доли вспомогательных пигментов в исследуемый период в районе Севастополя в большей мере было связано с изменением световых условий существования фитопланктонного сообщества верхнего перемешанного слоя, которые формируются под влиянием физических параметров среды [1].

В максимуме, расположенном в длинноволновой части спектра (длины волн ~ 678 нм), где поглощение света обусловлено только хлорофиллом a и продуктом его распада – феофитином, удельное поглощение света зависит только от «эффекта

упаковки» пигментов внутри клетки. «Эффект упаковки» проявляется в снижении поглощения света фитопланктоном, вызванное «самозатенением» пигментов внутри клетки. «Эффект упаковки» зависит от размерной структуры фитопланктонного сообщества, внутриклеточной концентрации пигментов и их упаковки внутри клетки. Изменения удельного поглощения в максимуме, расположенном в коротковолновой части спектра (длины волн ~ 440 нм) связаны с суммарным влиянием, как «эффекта упаковки», так и содержания вспомогательных пигментов. В результате вклада вспомогательных пигментов «эффект упаковки» сильнее проявляется на длине волны ~ 440 нм, чем на длине волны ~ 678 нм, что приводит к уменьшению величины $a_{ph}^*(440)$ и, как следствие, уменьшению величины R . Более сильное уменьшение $a_{ph}^*(440)$ по сравнению с $a_{ph}^*(678)$ приводит к «сглаживанию» спектра поглощения света пигментами фитопланктона. На рисунке 6 видно, что величина R больше на фоновой станции, чем в бухте. Это, вероятно, связано с большим содержанием вспомогательных пигментов в бухте.

Наблюдалась бóльшая внутригодовая вариабельность исследуемых биооптических характеристик, по сравнению с межгодовым изменением. Внутри года величины менялись на 70–90 %, а между годами – 20–50 %. Широкая внутригодовая вариабельность связана с сезонными изменениями исследуемых характеристик, зависящих от условий среды – в большей степени от световых условий обитания поверхностного фитопланктона.

Средние по спектру коэффициенты поглощения света ($\overline{a_{ph}}$) определяются в основном поглощением в синей области спектра ($a_{ph}(440)$). Увеличение $\overline{a_{ph}}$ прослеживается по коэффициентам A уравнений параметризации (9)–(12). В зимний период величина $\overline{a_{ph}}$ минимальна. Она увеличивается к лету, когда и достигает максимальных значений (рис. 8). Значения $\overline{a_{ph}}$ в зимний и летний периоды отличались на 25 %; переходные периоды: зима-весна, весна-лето и лето-осень – на 9, 18 и 7 % соответственно; весна-осень отличались на 12 %. Увеличение $\overline{a_{ph}}$ связано с ростом солнечной инсоляции и, как следствие, с увеличением поглощения света вспомогательными пигментами, защищающими клетку от избыточной энергии.

ВЫВОДЫ

1) Сравнительный анализ показал, что концентрация основного фотосинтетически активного пигмента – хлорофилла a , относительное содержание вспомогательных пигментов, величины удельных коэффициентов поглощения света фитопланктоном изменяются в течение года в большей степени (на 50–80 %), чем между годами (на 10–40 %).

2) Межгодовые отличия проявились в увеличении относительного содержания вспомогательных пигментов, удельных коэффициентов поглощения света летом 2010 г., что связано с метеорологическими особенностями этого года (аномально жаркое лето).

3) Полученные степенные зависимости поглощения света от концентрации хлорофилла a могут быть использованы для оценки первичной продукции.

Список литературы

1. Чурилова Т. Я. Пигменты микроводорослей / Т. Я. Чурилова, З. З. Финенко, А. И. Акимов // Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. – Севастополь: ЭКОСИ-гидрофизика, 2008. – С. 301–319.
2. Jeffrey S.W. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton / S. W. Jeffrey and G. F. Humphrey // Biochem. Physiol. Pflanzen. – 1975. – Vol. 167. – P. 191–194.
3. Yentsch C. S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean / C. S. Yentsch // Limnol. Oceanogr. – 1962. – Vol. 7. – P. 207–217.
4. Mitchell B. G. Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light limited phytoplankton / B. G. Mitchell, D. A. Kiefer // Deep-Sea Res. – 1988. – Vol. 35, № 5. – P. 639–663.
5. Tassan S. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters / S. Tassan and G. M. Ferrari // Limnol Oceanogr. – 1995. – Vol. 40. – P. 1358–1368.
6. Mitchell B. G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) / B. G. Mitchell / Ocean Optics X (Ed. R. Spinrad). – SPIE Bellingham, Washington. – 1990. – P. 137–148.
7. Jeffrey S. W. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods / S. W. Jeffrey, R. F. C. Mantoura, S. W. Wright. – UNESCO publishing, 1997. – 661 p.
8. Иванов В. А. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов, Е. И. Овсяный, Л. Н. Репетин и др. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006 – 90 с.

Джулай А. О. Міжрічна мінливість вмісту пігментів та поглинання світла фітопланктоном у прибережних водах Чорного моря в районі Севастополя // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2012. Вип. 7. С. 179–190.

Оцінені міжрічні і внутрішньорічні зміни концентрації хлорофілу *a*, відносного вмісту допоміжних пігментів, величин питомих коефіцієнтів і форми спектрів поглинання світла фітопланктоном поверхневих вод в районі Севастополя в період з 2009 по 2012 р.

Отримані статичні залежності поглинання світла пігментами фітопланктону від концентрації хлорофілу *a* для окремих сезонів.

Ключові слова: фітопланктон, хлорофіл *a*, пігментний індекс, поглинання світла фітопланктоном, Чорне море, Севастопольська бухта.

Dzhulay A. A. Interannual variability of pigment concentration and light absorption by phytoplankton in the coastal waters of the Black Sea near Sevastopol // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2012. Iss. 7. P. 179–190.

Interannual and intra-annual variations of chlorophyll *a* concentration, the relative abundance of accessory pigments, indexes of the specific coefficients and spectrum shape of light absorption by phytoplankton in surface waters near Sevastopol since 2009 to 2012 were analyzed.

The power-law dependence of light absorption by phytoplankton pigments on chlorophyll *a* concentration for particular seasons was obtained.

Key words: phytoplankton, chlorophyll *a*, pigment index, light absorption by phytoplankton, The Black Sea, Sevastopol bay.