

Г.П. Берсенева, Г.А. Толкаченко, О.В. Мартынов

Летняя динамика пигментов фитопланктона и ее связь с оптическими параметрами в шельфовых водах Черного моря (2001–2002 гг.)

Рассматривается пространственно-временная изменчивость содержания хлорофилла в прибрежной зоне Черного моря (пос. Кацивели) за летний период 2001 и 2002 гг. Приведены характерные типы вертикальных профилей пигментов. Проанализированы соотношения между концентрацией хлорофилла и оптическими параметрами: относительной прозрачностью воды, коэффициентом яркости моря, эффективной длиной волны выходящего из моря излучения и показателем вертикального ослабления света. Приведены уравнения связи биологических параметров с оптическими характеристиками воды.

Введение

Одна из задач дистанционного определения характеристик морской среды связана с оценкой продуктивности вод и определением концентрации хлорофилла по спектру восходящего излучения. Наиболее активной компонентой морской воды, определяющей ее оптические свойства, является взвесь. Она состоит из минеральных и органических веществ. Последние представлены живыми (фитопланктон, бактерии) и мертвыми (детрит) формами.

В свою очередь, оптические свойства фитопланктона определяются набором пигментов, количественный и качественный состав которых меняется в зависимости от абиотических условий среды обитания и таксономического состава фитопланктонного сообщества. Такая многофакторная зависимость приводит к неоднозначной оценке концентрации хлорофилла по результатам спутникового зондирования. В то же время учет связей между оптическими и биологическими характеристиками может существенно повысить достоверность интерпретации спутниковых данных. Региональные особенности состава и пространственно-временного распределения морской взвеси вызывают необходимость экспериментального определения характеристик этих связей и их параметров для отдельных акваторий.

В данной работе приведен анализ результатов совместных комплексных исследований оптических и биологических характеристик прибрежных вод Черного моря, проводившихся МГИ и ИнБЮМом НАН Украины в летний период 2001 и 2002 гг.

Аппаратура и методы измерений

Работы проводились в районе океанографической платформы МГИ, расположенной вблизи пос. Кацивели на Южном берегу Крыма. Время измерений — с 7 по 26 августа 2001 г. и с 27 июля по 15 августа 2002 г. Платформа расположена в точке с координатами 44°23'38" с.ш., 33°59'00" в.д. на удалении 600 м от берега. Глубина дна в районе платформы составляет 30 м.

© Г.П. Берсенева, Г.А. Толкаченко, О.В. Мартынов, 2006

Данные о распределении содержания хлорофилла по вертикали и в поверхностном слое получены на прилегающих к платформе участках акватории как непосредственно с платформы, так и на меридиональных разрезах, выполненных с катера. С платформы пробы фитопланктона отбирали 5-литровым батометром с 6-7 горизонтов до глубины 25 м дважды в день – в 11 и в 14 ч. На разрезах станции располагались примерно через 1 км. Их протяженность в 2001 г. составляла 11 км, в 2002 г. – 6 км.

Для определения концентрации пигментов пробы воды объемом 250 – 300 мл фильтровали через стекловолоконные фильтры (*Whatman Gf/F*) диаметром 24 мм при вакууме не более 0,3 атм. Фильтры с пробами хранили в сосуде Дьюара со сжиженным азотом при температуре -190°С. Концентрацию пигментов (хлорофилла и феофитина) определяли в лабораторных условиях ИнБЮМа флуориметрическим методом [1].

На разрезах проводили измерения относительной прозрачности и цвета воды, спектрального коэффициента яркости моря, подводной облученности и вертикальных профилей температуры. Кроме этого, осуществлялся отбор проб на поверхности моря для определения спектров поглощения взвешенным веществом и растворенной органикой [2].

Показатель вертикального ослабления дневного света определяли по результатам измерений подводной облученности сверху на длине волны 525 нм на различных горизонтах (0; 5; 10; 15; 20; 25 и 30 м) с помощью подводного фотометра ПИГО [3]. Коррекция изменений облученности поверхности моря во время измерений производилась с помощью палубного фотометра. Измерения относительной прозрачности воды Z_0 и цвета моря $N_{\text{цв}}$ выполняли с помощью стандартного белого диска и шкалы цвета морских вод (шкала Фореля – Уле). Спектральные коэффициенты яркости моря определяли с помощью разработанного в МГИ дифференциального фотометра «Спектр» [4]. В приборе реализована схема измерений спектральной яркости восходящего излучения, нормированного на величину падающей на поверхность моря солнечной радиации. Измерения этим прибором в 2001 г. проводили на разрезах, а в 2002 г. – только с платформы.

По результатам измерений подводной облученности на глубинах рассчитывали показатели вертикального ослабления нисходящего солнечного излучения α (м^{-1}) при длине волны 525 нм:

$$\alpha = 1/(Z_1 - Z_2) \lg(F_1/F_2), \quad (1)$$

где F_1 и F_2 – облученность на глубинах Z_1 и Z_2 соответственно.

Результаты измерений

Гидрометеорологические условия эксперимента. За период экспериментов 2001 и 2002 гг. измерения проводились как в типичной для данного региона спокойной гидрометеообстановке, так и в не свойственных ему для этого времени года условиях штормов, сильных ветров и связанных с ними изменениях направления течений [5].

В летний период Черное море обычно находится в зоне действия обширного Азорского антициклона. Средняя скорость ветра в районе Южного берега Крыма, согласно многолетним наблюдениям, составляет в это время 2-3 м/с.

Антициклонической атмосферной циркуляции над Черным морем соответствует малооблачная ситуация, средний балл облачности у южной оконечности Крыма в это время равен 2,7.

Такие условия наблюдались в начальный период эксперимента (июль 2001 г.). Скорость ветра в этот период находилась в пределах 2–4 м/с, облачность была несколько выше среднемноголетней, доходя в среднем за день до 5 баллов. Август 2001 г. характеризовался частыми ветрами и штормами.

В июле – августе 2002 г. метеорологическая обстановка была типичной для этого времени года. С 8 по 15 августа сказывалось влияние малоподвижного циклона, вызвавшего необычные наводнения в восточной Европе [5]. В эти дни скорость ветра в районе проведения работ доходила до 14 м/с. Облачность также была несколько выше среднемноголетней, доходя до 5 баллов в среднем за день.

Пигменты фитопланктона. В 2001 г. суммарное содержание хлорофилла и феофитина (C_{a+f}), а также оптических параметров определяли только в поверхностном слое моря как вблизи платформы, так и при удалении от нее. Далее под термином «хлорофилл» будет подразумеваться сумма хлорофилла и феофитина. Вблизи платформы концентрация пигментов изменялась в пределах $0,73 - 0,86 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, т.е. была практически постоянной. При удалении от платформы на расстояние до 10 – 11 км изменения этой величины также не превышали 10%. Лишь на разрезе, выполненном 7 августа 2001 г., при удалении от платформы на 5,5 – 7,5 км было выявлено пятно с повышенной концентрацией хлорофилла ($1,44 - 2,94 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). Затем при дальнейшем продвижении в открытое море содержание хлорофилла снизилось до $0,42 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ и далее оставалось на этом уровне.

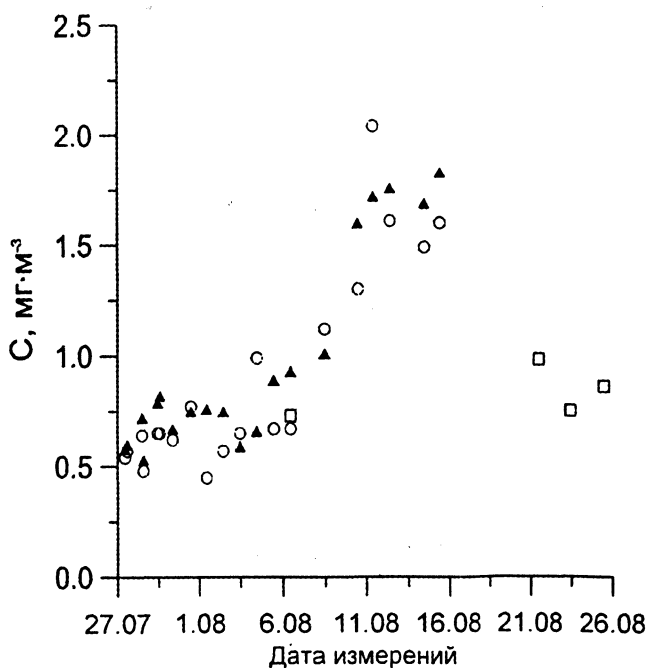
В июле и начале августа 2002 г. концентрация пигментов на поверхности вблизи платформы была несколько ниже августовских значений 2001 г. и изменялась в пределах $0,48 - 0,69 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ со средним значением $0,59 \pm 0,069 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (табл.1). После штормов (с 8 августа 2002 г.) наблюдалось резкое увеличение величины C_{a+f} до значений $1,12 - 2,04 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис.1), что значительно превышало данные предыдущего года (с 7 по 26 августа 2001 г. диапазон изменения составил $0,73 - 0,98 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). Изменчивость по разрезам находилась в тех же пределах, и только 14 августа 2002 г. в конце штормового периода концентрация пигментов по разрезу увеличилась на 20%.

Суммарное содержание пигментов по исследованному слою 0 – 20 м в 2002 г. значительно изменялось. До 10 августа оно находилось в пределах $10,7 - 20,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$, а затем повысилось до $26,0 - 36,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл.1).

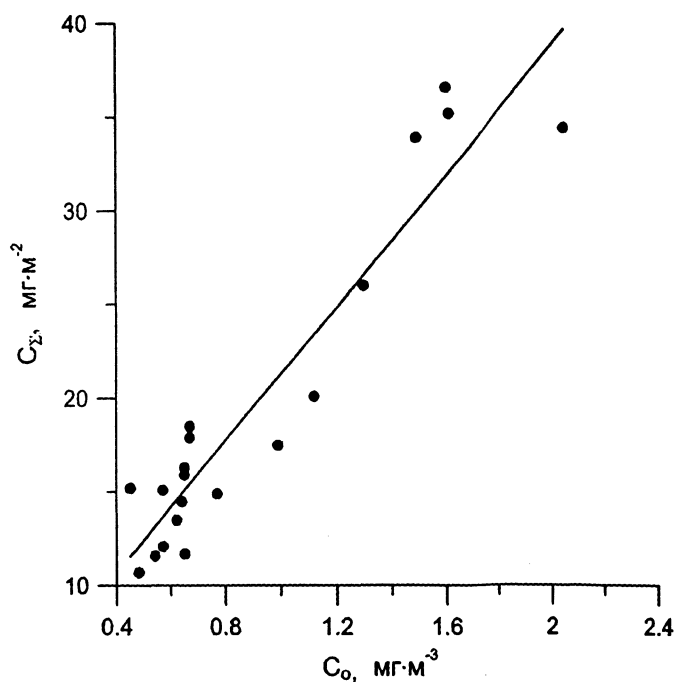
Если концентрация хлорофилла в поверхностном слое увеличилась в 5 раз, то во всем исследованном – в 3,4 раза. Средние концентрации хлорофилла по слою были близки к значениям на поверхности моря и лишь в нескольких случаях превышали их. Между содержанием хлорофилла на поверхности моря и в слое 0 – 20 м наблюдалась линейная зависимость (рис. 2), которая выражалась уравнением

$$C_{\Sigma} = 17,66 C_0 + 3,62 \quad (2)$$

при $n = 20$, $\sigma = 2,88$, $R = 0,94$.



Р и с. 1. Изменение во времени C_0 в 2001 г. (квадраты) и в 2002 г. (кружки), а также $C_{\text{хс}}$ в 2002 г. (треугольники)



Р и с. 2. Зависимость между концентрацией хлорофилла в поверхностном и эвфотическом слоях

Отметим, что во время экспериментов отношение средневзвешенного по слою хлорофилла (C_{xc}) к поверхностному (C_0) в 2002 г. изменялось от 0,67 до 1,69 и в среднем составляло $1,15 \pm 0,24$ (табл.1).

Относительное содержание феопигментов, которое характеризует физиологическое состояние клеток водорослей, находилось в поверхностном слое в августе 2001 г. в пределах 10 – 20%, а в июле – августе 2002 г. – несколько выше, 16 – 26% (табл.1). При измерении вертикального распределения этого показателя отмечены станции как с увеличением его содержания на нижних горизонтах (до 29 – 33%), так и с уменьшением (до 13 – 23%).

Т а б л и ц а 1

Биооптические характеристики воды прибрежной зоны в районе Кацивели

Дата исследований	Время отбора проб	C_0	C_{Σ}	C_{xc}	$C_{\Phi}, \%$	C_{xc}/C_0	$Z_0, м$	$N_{\text{ф}}$
		мг·м ⁻³	мг·м ⁻²	мг·м ⁻³				
2001 г.								
7 августа	11.20	0,73	Нет свед.	Нет свед.	20	Нет свед.	10	5,5
22 августа	11.40	0,98	<<	<<	10	<<	9,5	6
24 августа	10.45	0,75	<<	<<	12	<<	12	6
26 августа	11.30	0,86	<<	<<	10	<<	10	6,5
Среднее значение		0,83	<<	<<	13	<<	10,13	6
Стандартное отклонение		0,12	<<	<<	4,76	<<	0,63	0,41
2002 г.								
27 июля	11.00	0,54	11,6	0,58	26	1,07	11	5
	14.00	0,57	12,1	0,6	28	1,05	11	5
28 июля	11.00	0,64	14,5	0,72	16	1,12	11	5,5
	14.00	0,48	10,7	0,53	29	1,1	11	5
29 июля	11.00	0,65	15,9	0,79	18	1,22	13,5	5,5
	14.00	0,65	16,3	0,82	22	1,26	13	5,5
30 июля	11.00	0,62	13,5	0,67	22	1,08	11	5,5
31 июля	11.00	0,77	14,9	0,75	23	1	12	6
1 августа	11.00	0,45	15,2	0,76	21	1,69	13	5
2 августа	11.00	0,57	15,1	0,75	26	1,32	12	6
3 августа	11.00	0,65	11,7	0,59	18	0,91	12	5
4 августа	11.00	0,99	17,5	0,66	25	0,67	11	6
5 августа	11.00	0,67	17,9	0,89	24	1,33	11	5,5
6 августа	11.00	0,67	18,5	0,93	28	1,33	11	5,5
8 августа	11.00	1,12	20,1	1,01	24	0,91	11,5	5,5
10 августа	11.00	1,3	26	1,6	24	1,23	11,5	6
11 августа	11.00	2,04	34,4	1,72	24	0,84	9	6
12 августа	11.00	1,61	35,2	1,76	22	1,09	10	7
14 августа	11.00	1,49	33,9	1,69	16	1,13	8	7
15 августа	11.00	1,6	36,6	1,83	21	1,61	10	6
Среднее значение		0,9	19,58	0,98	22,85	1,15	11,2	5,68
Стандартное отклонение		0,45	8,641	0,45	0,38	0,24	1,30	0,59

Вертикальные профили пигментов. В 2002 г. наблюдалось несколько типов вертикальных профилей пигментов (рис. 3). В конце июля профили имели сглаженный характер. Концентрация хлорофилла повышалась от $0,48 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ на поверхности моря до $0,87 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ в слое 16 – 20 м. В период с 1 по 6 августа отмечена наиболее выраженная вертикальная неоднородность распределения хлорофилла. От поверхности до глубины 12 м наблюдался стабильный слой, где концентрация хлорофилла C_{a+f} в среднем составляла $0,66 \pm 0,10 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис.3, а). В слое 16 – 20 м на большинстве станций наблюдалось повышение концентрации пигментов до $0,9 - 1,2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. С 8 августа, когда на поверхности концентрация хлорофилла резко возросла, значения глубинного максимума также повысились до $2,04 - 2,07 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис.3, а). Его положение совпадало со слоем температурного скачка (рис.3, б). Таким образом, при любых концентрациях хлорофилла в поверхностном слое его максимальные значения находились на нижних горизонтах 16 – 20 м (рис.4). Среди вертикальных профилей пигментов можно выделить три типа: профили с четко выраженным максимумом на глубине 16 – 20 м (рис.4, а,б); с двумя максимумами (рис.4, в,г); с размытым максимумом на глубине 12 – 20 м (рис.4, д,е).

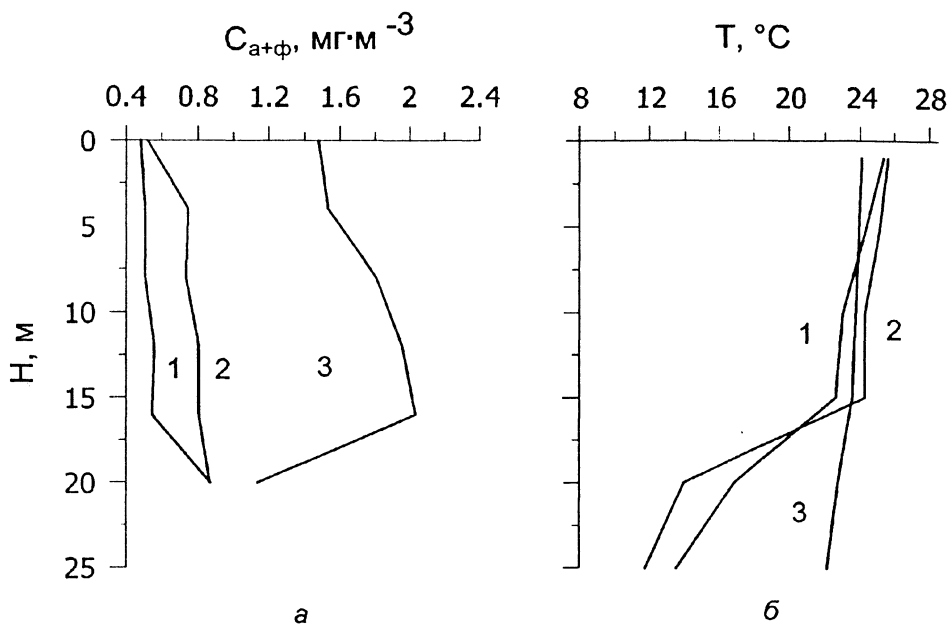
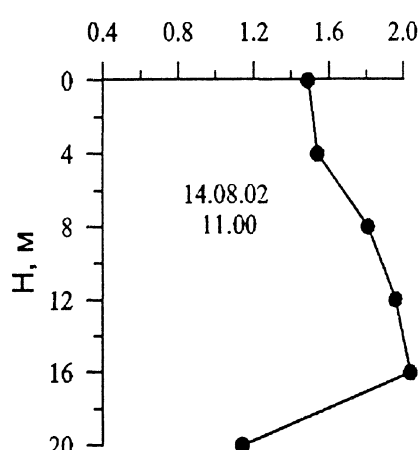
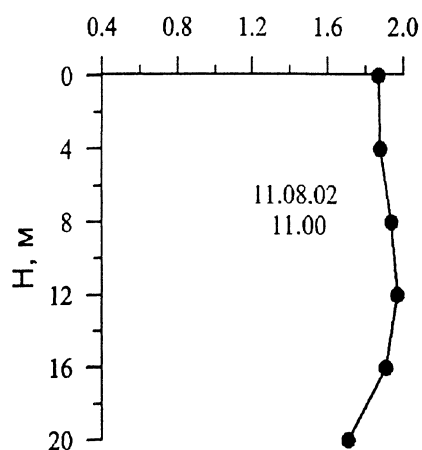
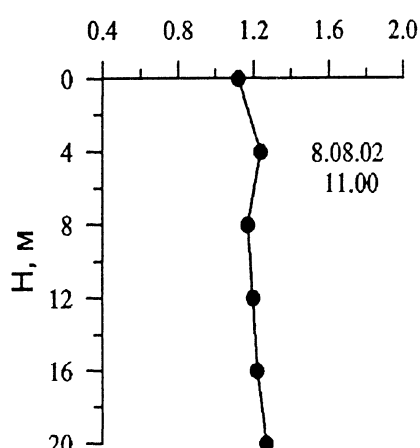
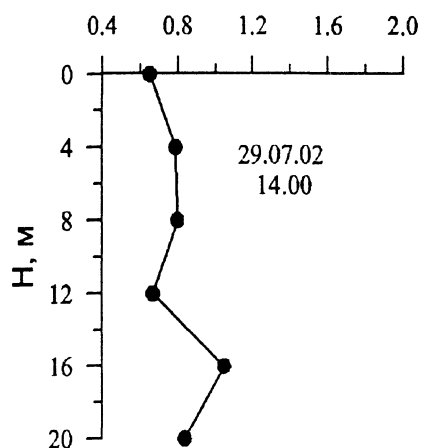
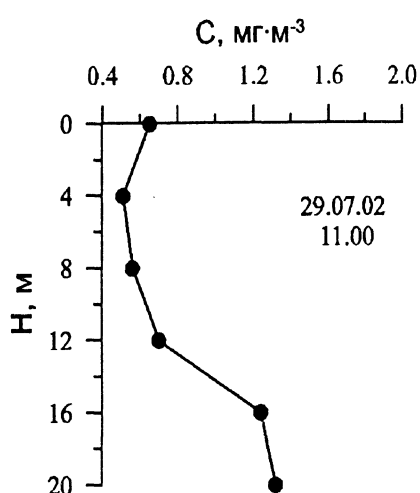
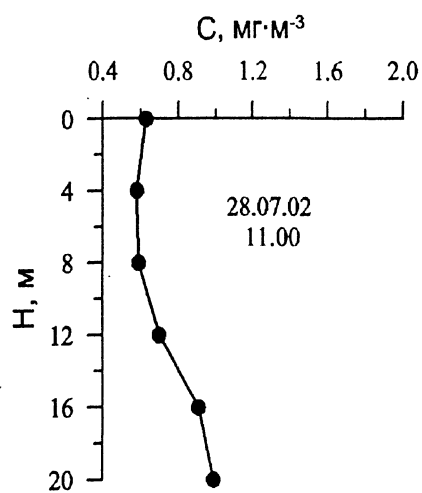
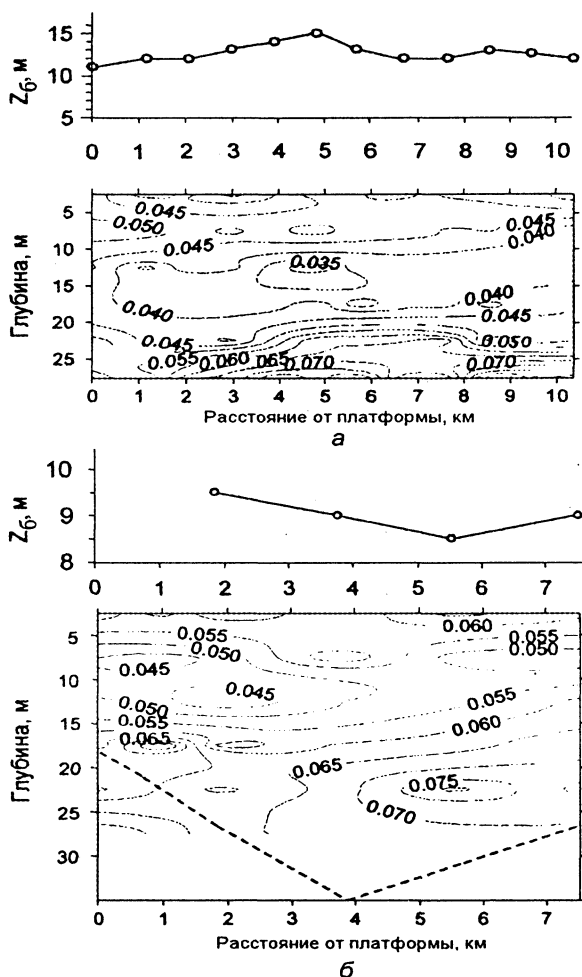


Рис. 3. Вертикальные профили суммы пигментов (а) и температуры (б) в 2002 г.: 1 – 28 июля; 2 – 31 июля; 3 – 14 августа



Р и с. 4. Вертикальные профили суммы пигментов ($C_{a+\phi}$) на отдельных станциях

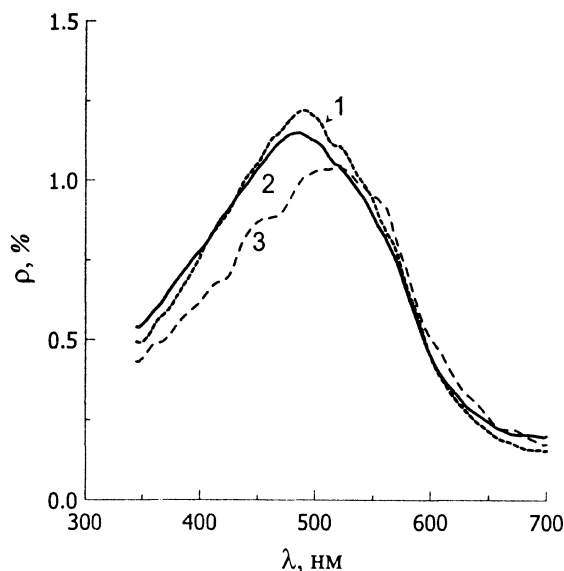
Оптические характеристики. Изучение пространственных структур гидрооптических характеристик проводили на основе анализа профилей показателя вертикального ослабления света α на семи меридиональных разрезах. При построении разрезов станции проецировались на меридиан, проходящий через платформу. На рис. 5 показано вертикальное распределение α на двух разрезах. Вертикальную оптическую структуру вод на разрезах 7 и 22 августа 2001 г. в целом можно охарактеризовать как трехслойную: верхний, приблизительно 5-метровый слой с величинами $\alpha = 0,045 - 0,065 \text{ м}^{-1}$; промежуточный слой 5 – 15 м прозрачных вод, где $\alpha = 0,030 - 0,045 \text{ м}^{-1}$; нижний слой 15 – 30 м наиболее мутных вод, в которых величины α на глубинах более 20 м превышали, как правило, $0,060 \text{ м}^{-1}$ и достигали на ряде станций значений $0,080 - 0,090 \text{ м}^{-1}$. Высокие значения α в нижнем слое связаны с наличием на глубинах 20 – 30 м слоя скачка, на верхней границе которого обычно наблюдаются повышенные концентрации фитопланктона.



Р и с. 5. Распределение показателя вертикального ослабления нисходящего солнечного излучения α и прозрачности воды по белому диску $Z_{0.5}$ на разрезах 7 и 22 августа 2001 г. Штриховой линией показано положение верхней границы термоклина

22 августа на разрезе измерялась температура воды до глубины 40 м. На основе этих данных на рис. 5, б показано положение верхней границы термоклина. Видно, как с подъемом термоклина вблизи платформы поднялся и слой мутности, над которым находились более прозрачные воды.

4, 14 и 15 августа 2002 г. было выполнено три меридиональных разреза длиной до 6 км. Два из них (4 и 15 августа) показали слабую изменчивость биооптических характеристик. В частности, концентрация пигментов фитопланктона изменялась на разрезе не более чем на 10%. Изменения показателей поглощения также были невелики [2]. 14 августа изменчивость на разрезе была более значительной. По-видимому, после шторма интенсивное ветровое воздействие привело к возникновению перемежающихся течений, вызвавших пространственную неоднородность распределения фитопланктона.



Р и с. 6. Спектры коэффициента яркости моря по данным 2002 г.: 1 – 28 июля; 2 – 29 июля; 3 – 14 августа

$= 1,49 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, что отразилось в существенном изменении спектральной характеристики коэффициента яркости. Приведенные на рис. 6 спектры отличаются длиной волны максимальных значений $\rho(\lambda)$, значениями максимумов и крутизной спада спектральных характеристик от максимума в коротковолновую часть спектра. Эти параметры позволяют составить общее представление о процессах поглощения и рассеяния света в морской воде. Так, например, для спектров 1 и 2, измеренных при близких значениях концентраций хлорофилла, максимумы расположены на близких длинах волн (487 и 482 нм соответственно). Для более прозрачных вод 29 июля ($Z_6 = 13,5 \text{ м}$, $N_{\text{ув}} = 5,5$) значения $\rho_{\text{макс}} = 1,13\%$ (спектр 2) несколько ниже, чем у спектра 1 ($Z_6 = 11 \text{ м}$, $N_{\text{ув}} = 5,5$; $\rho_{\text{макс}} = 1,18\%$), что, вероятно, вызвано более низкими показателями обратного рассеяния на частицах взвеси. Вместе с тем крутизна спада спек-

По наблюдениям 2002 г., изменения концентрации хлорофилла отражались в вариациях спектрального хода коэффициента яркости моря. На рис. 6 представлены спектры коэффициентов яркости для различных значений концентрации пигментов фитопланктона. Спектры, измеренные 28.07.02 г. в 11 ч 35 мин и 29.07.02 г. в 10 ч 40 мин при $C_0 = 0,64 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ и $C_0 = 0,65 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно, близки по форме. После шторма (измерение спектра 14.08.02 г. в 12 ч 37 мин) резко изменилась концентрация хлорофилла до $C_0 =$

тральных значений ρ в синей области спектра I по сравнению со спектрами 2 и 3 существенно выше. Это, по-видимому, вызвано более сильным поглощением света растворенными в воде органическими веществами. Уменьшение спектрального коэффициента яркости моря 14 августа ($Z_6 = 8$ м, $N_{\text{ув}} = 7$, $\rho_{\text{макс}} = 0,91\%$, $\lambda_{\text{макс}} = 512$ нм) по сравнению с измерениями 28 и 29 июля связано с увеличением ослабления света растворенной органикой, пигментами фитопланктона и частицами взвеси при резком повышении их концентрации после шторма. Можно отметить, что при увеличении концентрации хлорофилла от 0,64 до 1,49 мг·м⁻³ происходило смещение максимумов спектров коэффициента яркости в сторону длинных волн от 482 до 512 нм (рис. 6).

Связь концентрации пигментов с оптическими параметрами воды. Концентрация хлорофилла обычно хорошо коррелирует с прозрачностью и цветом морской воды [6]. В 2001 г. наиболее прозрачные воды ($\langle Z_6 \rangle = 12,4$ м) наблюдались 7 августа при содержании хлорофилла 0,73 мг·м⁻³. Наименьшая прозрачность ($\langle Z_6 \rangle = 9,1$ м) была отмечена 22 августа при $C_{\text{а+ф}} = 1,67$ мг·м⁻³. Диапазон изменений прозрачности и цвета воды в районе океанографической платформы за весь период измерений составил: $Z_6 = 8,5\text{--}14,5$ м, $N_{\text{ув}} = 5\text{--}7,5$ балла при изменении содержания хлорофилла в поверхностном слое от 2,04 до 0,48 мг·м⁻³. Отметим, что в последние годы, согласно наблюдениям на платформе, такие величины Z_6 и $N_{\text{ув}}$ были характерны для летнего периода. До 22 августа 2001 г. с увеличением относительной прозрачности Z_6 уменьшался балл цветности $N_{\text{ув}}$. После 22 августа наблюдались случаи, когда с повышением прозрачности воды происходило увеличение балла цветности. В 2002 г. такие ситуации не наблюдались.

Выявлены связи относительной прозрачности как с поверхностной концентрацией хлорофилла (рис.7, а), так и с суммарной по слою (рис.7, б). Эти параметры связаны между собой линейной регрессией и описываются уравнениями:

$$C_0 = 31,03 \cdot 1/Z_6 - 1,89 \quad (3)$$

при $n = 24$, $\sigma = 0,27$, $R = 0,80$,

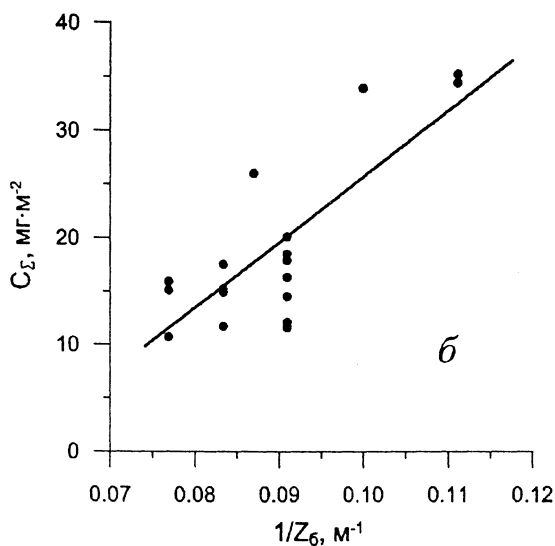
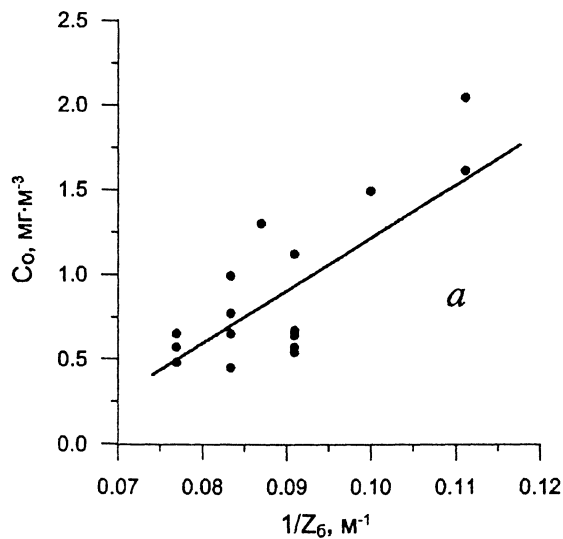
$$C_{\Sigma} = 611,25 \cdot 1/Z_6 - 35,47 \quad (4)$$

при $n = 20$, $\sigma = 4,6$, $R = 0,85$.

По данным спектральных измерений коэффициента яркости моря и приведенных в табл.1 значений концентраций пигментов фитопланктона оценена возможность определения концентраций хлорофилла с использованием эффективной длины волны выходящего из водной толщи излучения. В работе [7] по данным измерений в водах Черного и Средиземного морей и Атлантического океана приведена формула:

$$\lg C_0 = -25,36 + 5,09 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{эфф}} \quad (5)$$

при $n = 74$, $R = 0,91$, $460 \leq \lambda_{\text{эфф}} \leq 520$.



Р и с. 7. Зависимость концентраций хлорофилла в поверхностном – а и во всем исследованном (0 – 20 м) – б слое от глубины видимости белого диска

Для прибрежных черноморских вод нами были получены следующие регрессионные уравнения:

$$\lg C_0 = 0,033 \lambda_{\text{эфф}} - 16,52 \quad (6)$$

при $n = 17$, $\sigma = 0,42$, $R = 0,68$,

$$\lg C_{\Sigma} = 0,031 \lambda_{\text{эфф}} - 13,86 \quad (7)$$

при $n = 24$, $\sigma = 0,11$, $R = 0,75$,

$$\lg C_{cx} = 0,033 \lambda_{эфф} - 16,47 \quad (8)$$

при $n = 17$, $\sigma = 0,17$, $R = 0,76$.

Расчет значений C_0 , C_Σ и C_{xc} по формулам (5) и (6) для приведенных на рис. 6 спектров в сравнении с измеренными величинами и их сопоставление с оценками концентраций хлорофилла C_0 по формуле работы [7] показаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Сопоставление расчетных значений концентраций хлорофилла с результатами измерений

Номер спектров	C_0 , мг·м ⁻³		C_Σ , мг·м ⁻²		C_{xc} , мг·м ⁻³		C_0 [7], мг·м ⁻²
	измерение	расчет	измерение	расчет	измерение	расчет	
1	0,64	0,67	14,5	15,3	0,72	0,75	0,55
2	0,65	0,35	15,9	9,24	0,79	0,41	0,34
3	1,49	1,27	33,9	26,4	1,69	1,37	1,32

Видно, что оценки концентраций хлорофилла в поверхностном слое по эффективной длине волны коэффициента яркости приводят к приблизительно одинаковым результатам. Различие значений коэффициентов в эмпирических уравнениях (5) и (6), возможно, вызвано региональными особенностями оптических характеристик морской воды и малым объемом выборки в наших экспериментах.

Обсуждение

Формирование и особенности планктонного сообщества в прибрежной зоне моря обусловлены антропогенным влиянием, гидрометеорологической ситуацией и динамикой вод. Летний период по погодным условиям является наиболее подходящим временем года для установления межгодовых колебаний биологических параметров [8]. Он характеризуется низким содержанием биогенных элементов в верхних слоях эвфотической зоны и невысокой пространственной изменчивостью продукционных характеристик фитопланктона [9].

В 2002 г. наблюдались изменчивость концентрации хлорофилла от 0,5 до 2,04 мг·м⁻³ и дальнейший спад до 1,5 мг·м⁻³. Хотя данные по хлорофиллу в конце августа 2002 г. превосходили значения показателей предыдущего года, в средних величинах этого параметра за весь период измерений в течение двух лет значительной разницы не отмечено.

Зафиксированные нами 1 – 6 августа 2002 г. повышенные концентрации хлорофилла по вертикали совпадали со слоем температурного скачка на глубине 16 – 20 м (рис.3). Измерения показателя вертикального ослабления нисходящего солнечного излучения в 2001 г. также подтвердили наличие на глубине температурного скачка наиболее мутных вод с повышенной концентрацией хлорофилла. Происхождение подповерхностного промежуточного слоя прозрачных вод связано с блокирующим действием термоклина, ограничивающего вынос биогенных элементов из глубинных вод в поверхностные слои. В результате этого над термоклином возникает дефицит питательных

веществ, лимитирующий развитие фитопланктона. При смене «спокойной» гидрометеорологической обстановки на штормовую отмечено резкое увеличение содержания хлорофилла до $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. При штормовых условиях возможны и другие ситуации. Так, в результате сильного шторма в сентябре 1996 г. активное перемешивание вод привело к размыванию слоя термоклина и образованию гомотермии. При этом типичное для лета вертикальное распределение с глубинным максимумом сменилось на однородное распределение пигментов по слою, где величины концентраций составляли $0,7 - 0,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ [10]. Повышение содержания хлорофилла может быть связано не только с вертикальным перемешиванием, но и с горизонтальным переносом водных масс и появлением в районе платформы «чужеродных» богатых вод.

Биомассу фитопланктона по всему эвфотическому слою характеризует средневзвешенная по слою концентрация хлорофилла. В зависимости от вертикального распределения пигментов отношение этой величины к поверхностной концентрации может меняться. Так, например, согласно [9], отношение $C_{\text{хс}}$ к C_0 для летнего периода (май – сентябрь) в открытых водах Черного моря превышало значение 2. Такие величины были вызваны стабильной стратификацией вод в центральных районах моря. В нашем случае под влиянием шторма в районе океанографической платформы из-за небольшой глубины дна стратификация вод была нарушена, что привело к снижению отношения $C_{\text{хс}}/C_0$ до $1,15 \pm 0,24$.

Полученные в экспериментах 2001–2002 гг. величины относительного содержания феопигментов оказались несколько ниже летних значений, зафиксированных в этом районе в предыдущие годы – в августе 1993 г. и в июне 1998 г. [10]. Это может объясняться, с одной стороны, применением жидкого азота для хранения фильтров, приводящим к уменьшению артефакта при определении феофитина; с другой, – улучшенным физиологическим состоянием фитопланктона в исследованный период, поскольку феофитин, как продукт разрушения хлорофилла, характеризует процент разрушенных и отмерших клеток фитопланктона. В отличие от типичного вертикального распределения содержания феофитина в августе 2002 г. не отмечалось увеличение этого параметра на нижних горизонтах, что может быть вызвано переносом клеток водорослей и детрита в верхние слои моря в условиях шторма.

За короткий период изменений концентрации хлорофилла от $0,48$ до $2,04 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ на поверхности моря и от $10,7$ до $36,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ – в слое $0 - 20 \text{ м}$ были зафиксированы изменения относительной прозрачности от $13,5$ до 8 м (табл. 1). Это позволило оценить характер зависимости концентраций хлорофилла в поверхностном слое и на глубине от прозрачности воды. Как видно (рис. 7), изменения концентрации пигментов фитопланктона в поверхностном слое и осредненной по слою $0 - 20 \text{ м}$ происходили в противофазе с прозрачностью вод.

Одной из интегральных характеристик спектров яркости является эффективная длина волны выходящего из моря излучения $\lambda_{\text{эф}}$ [7]. В диапазоне спектра $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ эта величина обратно пропорциональна средней энергии квантов спектрального потока излучения. Существенным достоинством $\lambda_{\text{эф}}$ является ее тесная связь с параметрами подводного светового поля, которые, в свою очередь, зависят от концентраций растворенных и взвешенных в воде

веществ. Кроме того, величина $\lambda_{\text{эф}}$ слабо зависит от условий освещения моря и оптических характеристик приводного слоя атмосферы. Диапазон изменчивости этого параметра в период экспедиции 2002 г. составлял 489 – 512 нм при изменчивости концентраций хлорофилла от 0,45 до 2,04 мг·м⁻³.

Полученные нами соотношения между $\lambda_{\text{эф}}$ и концентрацией хлорофилла следует считать предварительными ввиду использования малого объема экспериментального материала. Однако высокие значения коэффициентов корреляции ($R \geq 0,68$) показывают принципиальную возможность использования $\lambda_{\text{эф}}$ для определения концентраций хлорофилла по измерениям $\rho(\lambda)$.

Изменение во времени показателя поглощения света взвешенным веществом отражает общую изменчивость показателя поглощения в морской воде. Это увеличение определялось поглощением живой компоненты взвешенного вещества – фитопланктона. В работе [2] получена зависимость показателя поглощения света от концентрации хлорофилла в широком диапазоне изменчивости этого параметра – от 0,45 до 2,04 мг·м⁻³. Она описывается степенными уравнениями как для красной, так и для синей области спектра. Однако в синей области эффективность поглощения света увеличивается в большей степени, чем в красной.

В поглощение света морской водой вносят свой вклад фитопланктон и детрит. В исследованном районе за весь период измерений доля неживой фракции в суммарном поглощении была соизмерима с фитопланктоном и изменялась в пределах 14,6 – 40% [2]. Ранее отмечалось, что у берегов Крыма большую часть года доля детрита не превышала 20% и лишь в период зимне-весеннего цветения фитопланктона вклад детрита достигал более высоких значений (50 – 60%) [11]. Повышение значений этого параметра до 40% в наших исследованиях было связано с перемешиванием вод во время шторма.

Измерения по разрезам проводили для оценки пространственной неоднородности биооптических свойств моря и возможной неадекватности данных, полученных на платформе и со спутника в прибрежной зоне. В период шторма вариации концентраций хлорофилла вдоль разрезов увеличились до 20%. По-видимому, интенсивное ветровое воздействие приводило к возникновению перемежающихся течений, вызвавших неоднородность распределения фитопланктона. В относительно спокойных условиях отличия в содержании пигментов по разрезу были небольшими (10%). Таким образом, измерения на платформе могут быть использованы для сопоставления со спутниковыми измерениями на расстоянии от берега в несколько километров.

Данные, полученные в настоящей работе, охватывают значительный диапазон изменений биооптических свойств моря. В дальнейшем они будут использоваться для количественных сопоставлений с картами концентраций хлорофилла, снятыми космическими сканерами *MERIS*, *MODIS* и *SeaWiFS* [12].

Выводы

1. Несмотря на значительное варьирование концентраций хлорофилла, в средних величинах этого параметра за весь период измерений в течение двух лет значительной разницы не отмечено.

2. Вертикальные профили пигментов разделяются на три типа: с четко выраженным максимумом на глубине 16 – 20 м, с двумя максимумами на глубинах 4 и 16 м и с одним размытым максимумом на глубине 12 – 20 м.

3. За время экспериментов при изменении концентраций хлорофилла от 0,45 до 2,04 мг·м⁻³ в поверхностном слое и суммарной – от 10,7 до 36,6 мг·м⁻² во всем исследованном слое зафиксирован диапазон уменьшения прозрачности вод по белому диску от 14 до 8 м. Связь C с $1/Z_6$ линейна с высокими значениями коэффициента корреляции.

4. В относительно спокойных гидрометеорологических условиях отличия в содержании пигментов по разрезу на расстоянии до 11 км были невелики – около 10%. Следовательно, измерения на платформе могут быть использованы для сопоставления со спутниковыми данными, полученными на расстоянии от берега в несколько километров.

5. Спектры коэффициентов яркости моря, измеренные при различных величинах $C_{\text{хл}}$, отличаются длиной волны максимальных значений $\rho(\lambda)$, значениями максимумов и крутизной спада спектральных характеристик от максимума в коротковолновую часть спектра. При увеличении концентрации пигментов фитопланктона от 0,45 до 2,04 мг·м⁻³ происходит смещение максимумов спектров коэффициента яркости в сторону длинных волн – от 482 до 512 нм.

6. По спектральным значениям коэффициента яркости моря была оценена возможность определения концентраций хлорофилла с использованием эффективной длины волны выходящего из водной толщи излучения. Получены регрессионные уравнения связи между $\lambda_{\text{эфф}}$ и C . Их проверка на натурных данных показала принципиальную возможность использования $\lambda_{\text{эфф}}$ для определения концентраций хлорофилла в прибрежных водах Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнев О.А., Берсенева Г.П. Флуориметрический метод определения концентрации хлорофилла «а» и феофитина «а» в фитопланктоне // Гидробиологический журнал. – 1986. – 22. № 2. – С.89–95.
2. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П. Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль–август 2002 г.) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 4. – С. 39–50.
3. Вайнерман Б.А. Измерение фотосинтетически активной радиации в океане // Световые поля в океане. – М.: Изд-во ИОАН, 1980. – С. 39–49.
4. Маньковский В.И. Связь глубины видимости белого диска с биооптическими характеристиками вод Черного моря // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 149–152.
5. Коротаев Г.К., Ли М., Мартынов О.В. и др. Международный подспутниковый эксперимент на платформе в Кацивели // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 3. – С. 28–38.
6. Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин В.И. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов. – Севастополь, 1996. – 32 с. (Препринт / НАН Украины. МГИ).
7. Урденко В.А., Халтурин В.И., Афонин Е.И. Эмпирические связи между гидрооптическими и биологическими характеристиками и параметрами светового поля // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. – Берлин: Изд-во ИКИ АН ГДР, 1985. – С.209–249.

8. Ведерников В.И. Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Черном море в весенний и летний периоды // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы. – М.: Наука, 1991. – С. 128–147.
9. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны в глубоководных районах Черного моря // Океанология. – 1997. – 37, № 3. – С. 414–423.
10. Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я. Хлорофилл «а» и оптические характеристики фитопланктона в шельфовых водах Черного моря у побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 2. – С. 44–58.
11. Чурилова Т.Я. Поглощение света фитопланктоном и детритом в Черном море в весенний период // Океанология. – 2001. – 41, № 5. – С. 719–727.
12. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Толкаченко Г.А. и др. Опыт совместного анализа синхронных *in situ* и спутниковых измерений биооптических характеристик в прибрежной зоне Черного моря (Кацивели – 2001) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – Вып. 2(7). – С. 100–110.

Институт биологии южных морей НАН Украины,
Севастополь
Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 21.01.05
После доработки 03.03.05

ABSTRACT Spatial and temporal variability of chlorophyll content in the Black Sea coastal zone (Katsiveli) in summer 2001–2002 is considered. Typical vertical chlorophyll profiles are shown. Relations between the chlorophyll concentration and the optical parameters, namely Secchi depth, sea reflectance effective wavelength of the upwelling radiance and the vertical attenuation coefficient, are analyzed. The equations of relations between the biological parameters and the seawater optical features are represented.