

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.463.5

Многолетняя и сезонная изменчивость распределения прозрачности в поверхностных водах северо-западной части Черного моря

А.С. Кукушкин*

*Морской гидрофизический институт НАН Украины
99011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2, Украина*

Поступила в редакцию 10.07.2012 г.

По данным многолетних наблюдений показателя ослабления направленного света (ПОС) и глубины видимости белого диска рассмотрены основные особенности распределения прозрачности в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в годовом цикле. Получены статистические оценки сезонных и внутрисезонных изменений ПОС в районах, различающихся по степени влияния на их гидрофизические характеристики речного стока и вод открытой части моря, и отмечено хорошее их соответствие с изменениями содержания компонентов взвешенного органического вещества. Рассчитаны сезонные значения ПОС по концентрации хлорофилла *a*, основанные на использовании регрессионной зависимости между этими одновременно измеренными параметрами. Показано, что многолетние (1978–2010 гг.) сезонные изменения ПОС (измеренные и рассчитанные) и связанные с ними изменения концентрации хлорофилла *a* зависят от изменчивости объема речного стока, масштабов его распространения на северо-западном шельфе и региональных гидрометеорологических условий.

Ключевые слова: показатель ослабления направленного света, хлорофилл *a*, речной сток, гидрометеорологические условия, изменчивость; beam attenuation coefficient, chlorophyll *a*, river run-off, hydrometeorological conditions, variability.

Введение

Северо-западная часть Черного моря (СЗЧМ) с многочисленными рекреационными центрами на побережье, районами рыболовства и воспроизводства рыбных запасов подвергается интенсивному загрязнению береговыми стоками (речные и промышленно-бытовые стоки, смыв удобрений с полей и др.). Прозрачность воды, помимо традиционно используемых гидрологических и гидрохимических характеристик вод, может служить хорошим индикатором распространения загрязненных береговых стоков в море из-за больших различий в концентрациях взвешенных и растворенных веществ в этих стоках и морских водах, сохраняющихся на значительных удалениях от берега [1]. Поэтому изучение оптического режима вод в прибрежной и шельфовой зонах Черного моря в условиях их прогрессирующего загрязнения и эвтрофикации представляет несомненный интерес.

По результатам анализа полученных в отдельных съемках оптических, биологических и гидрологических данных [2–6] были рассмотрены структура поля прозрачности и особенности ее формирования в поверхностном слое СЗЧМ в различные се-

зоны года. Внутрисезонная и межгодовая изменчивость распределения прозрачности оценивалась только качественно. В работе [7] для районов СЗЧМ, различных по степени влияния на их гидрофизические характеристики стока рек и вод открытого моря, были получены статистические оценки сезонных изменений показателя ослабления направленного света (ПОС) в зимне-весенний период. Также было показано, что содержание взвешенного вещества, в основном определяющее прозрачность воды, зависит от объемов стока речных вод, масштабов их распространения на северо-западном шельфе и региональных гидрометеорологических условий, которые, в свою очередь, зависят от крупномасштабных атмосферных процессов. Межгодовые изменения ПОС в зимне-весенний период оценивались по немногочисленным данным, полученным только в районе влияния рек (северный и западный районы СЗЧМ). Статистические характеристики ПОС и его внутрисезонные и межгодовые изменения в летне-осенний период не рассматривались.

Цель настоящей статьи, продолжающей проведенные в работе [7] исследования, заключается в обобщении и анализе результатов многолетних исследований распределения прозрачности, ее сезонной, внутрисезонной и межгодовой изменчивости в поверхностном слое (0–5 м) вод СЗЧМ, а также установлении основных факторов, определяющих эту изменчивость.

* Александр Сергеевич Кукушкин (kukushkinas@mail.ru).

Материалы и методы

В качестве основной характеристики прозрачности и ее изменчивости использован показатель ослабления направленного света (увеличение его значения обозначает понижение прозрачности, а уменьшение — ее повышение). Использованы также данные банка Морского гидрофизического института НАН Украины по наблюдениям ПОС и глубины видимости белого диска (Z_6), полученные в 33 экспедициях в 1978–1995 гг. Количество проанализированных наблюдений: ПОС — 623 станции и 3800 миль буксировки, Z_6 — 343 станции. Кроме того, использованы данные по наблюдениям Z_6 , полученные в 1925–1989 гг. в Каркинитском заливе (для зимнего периода проанализировано 116 измерений, для весеннего — 230, для летнего — 290, для осеннего — 59) [6]. Для увеличения массива данных по ПОС, примененных для построения осредненных за весь период наблюдений сезонных карт его распределений в СЗЧМ (кроме Каркинитского залива), измеренные в отдельных экспедициях значения Z_6 были пересчитаны в значения ПОС(ϵ) по формуле $\epsilon = 3,8/Z_6 - 0,05$ для длины волны 422 нм [8]. Сопоставление измеренных и рассчитанных по Z_6 величин ПОС показало их хорошее совпадение [3–5].

Для анализа также использовали результаты измерений концентрации хлорофилла a ($C_{\text{хл}}$) в 37 экспедициях на 421 станции и среднемесячные значения его концентраций по результатам наблюдений с помощью радиометра CZCS за 1978–1986 гг. (данные были любезно переданы автору В.В. Суслиным) и SeaWiFS за 1998–2010 гг. [9].

В исследованиях использовали буксируемый измерительный комплекс МГИ-2201, измеряющий ПОС и температуру на глубине 4–5 м, зондирующие логарифмический фотометр-прозрачномер и автоколлимационный спектральный зонд-прозрачномер [3]. Эти приборы — однотипные, что позволило корректно сравнивать полученные ими данные. Результаты измерений ПОС (при десятичном основании логарифма) анализировали в максимуме пропускания светового фильтра 420–430 нм. Относительную прозрачность определяли с помощью диска Секки.

Для построения карт сезонных распределений средних значений ПОС и концентрации хлорофилла a СЗЧМ была разбита на прямоугольники со сторонами, равными 15' по широте и 20' по долготе. Практически их форма приближалась к квадратам со стороной 15 миль. По данным измерений, выполненных в каждом сезоне в этих квадратах, находились средние значения ПОС и концентрации хлорофилла a , относящиеся к центру квадрата, для которого они вычислялись. Эти центры, обозначенные на картах жирными точками, дают представление о пространственном расположении станций, данные которых использовались для построения этих карт.

Результаты и обсуждение

Особенности распределения прозрачности рассмотрены для районов СЗЧМ, различных по степе-

ни влияния на их гидрофизические характеристики стока рек и вод открытого моря (рис. 1).

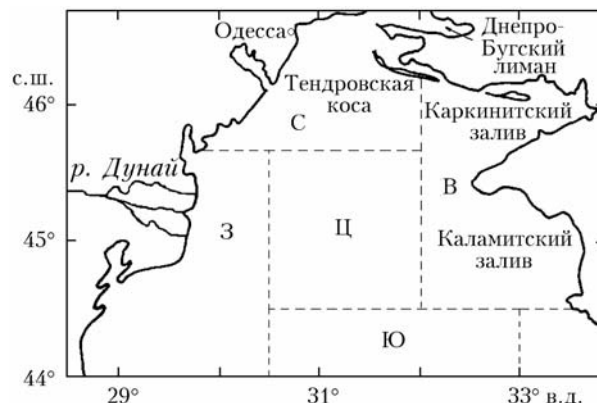


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: западный (З), северный (С), центральный (Ц), восточный (В) и южный (Ю)

Распределения сезонных значений ПОС показаны на рис. 2 и 3.

Западный и северный районы СЗЧМ. В этих районах расположена зона трансформированных речных вод. Здесь во все сезоны наблюдались низкая прозрачность и повышенные концентрации взвешенного вещества по сравнению с другими районами СЗЧМ [1, 3–5]. В зимний период (январь–март) речной сток обычно минимален и граница этой зоны, определенная по изохалине 17‰ и ПОС — $0,5\text{--}0,6\text{ м}^{-1}$, располагалась почти параллельно западному берегу на расстоянии 12–25 миль от него (рис. 2, а). Прозрачность вод в западном и северном районах изменялась от очень низкой (ПОС равен $2\text{--}5\text{ м}^{-1}$) вблизи устьевых участков Дуная и Днепро-Бугского лимана до достаточно высокой ($0,2\text{--}0,35\text{ м}^{-1}$) (табл. 1).

Такая относительно высокая прозрачность наблюдалась, например, в декабре 1986 г., когда зона трансформации была прижата к западному и северному берегам и значительная часть СЗЧМ находилась под влиянием вод открытой части моря [3]. Прозрачность вод в северном районе (ПОС равен $(0,86 \pm 0,44)\text{ м}^{-1}$) несколько ниже, чем в западном ($(0,6 \pm 0,3)\text{ м}^{-1}$). Это, возможно, связано с волновым взмучиванием донных осадков в более мелководном северном районе во время зимних штормов. Внутри-сезонная изменчивость значений ПОС, в качестве оценки которой использован коэффициент вариации в процентах, в этих районах довольно высокая (51%). Содержание компонентов взвешенного органического вещества (ВОВ) по сравнению с другими районами здесь повышенное (пределы изменения концентрации хлорофилла — $0,8\text{--}3,5\text{ мг/м}^3$) (рис. 2, в).

В весенний период (апрель — первая половина июня) размеры зоны влияния речного стока увеличивались. При этом прозрачность в западном районе несколько понизилась (ПОС увеличился до $(0,81 \pm 0,37)\text{ м}^{-1}$), а в северном даже немного повысилась (ПОС равен $(0,74 \pm 0,35)\text{ м}^{-1}$) (рис. 2, б). Изменчивость ПОС в обоих районах незначительно уменьшилась. В то же время содержание ВОВ заметно увеличилось [3]. Так, концентрация хлорофилла

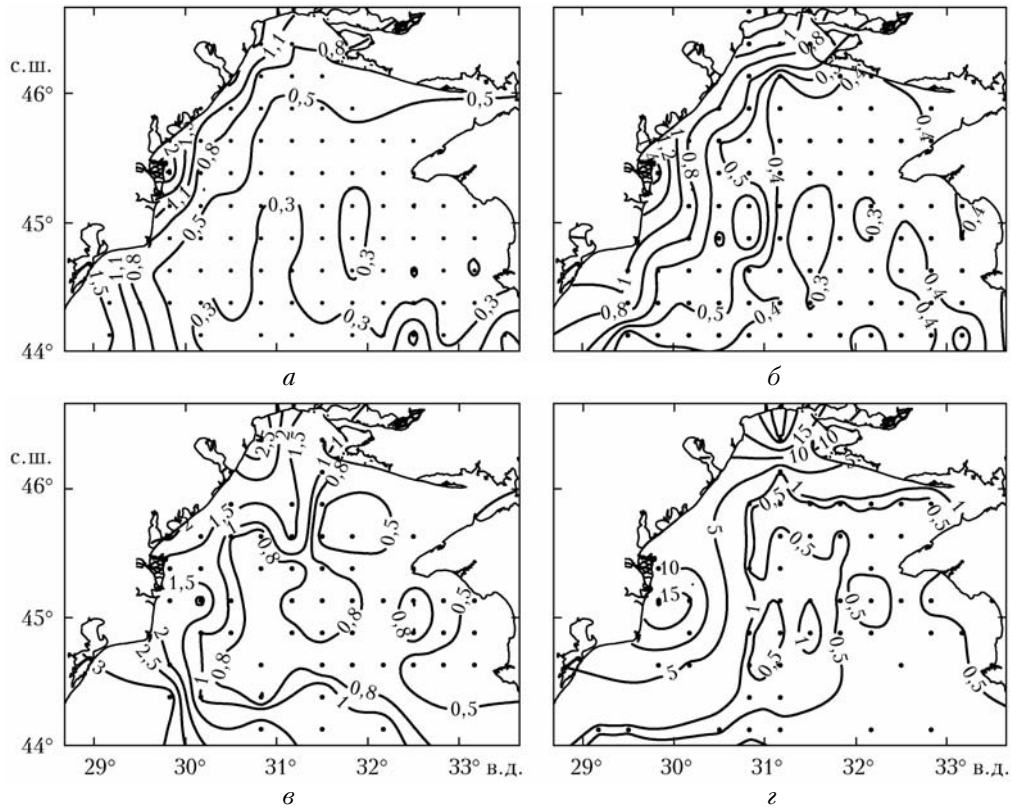


Рис. 2. Распределение ПОС (м^{-1}) (а, б) и концентрации хлорофилла а ($\text{мг}/\text{м}^3$) (в, г) в поверхностном слое СЗЧМ в зимний (а, в) и весенний (б, г) периоды

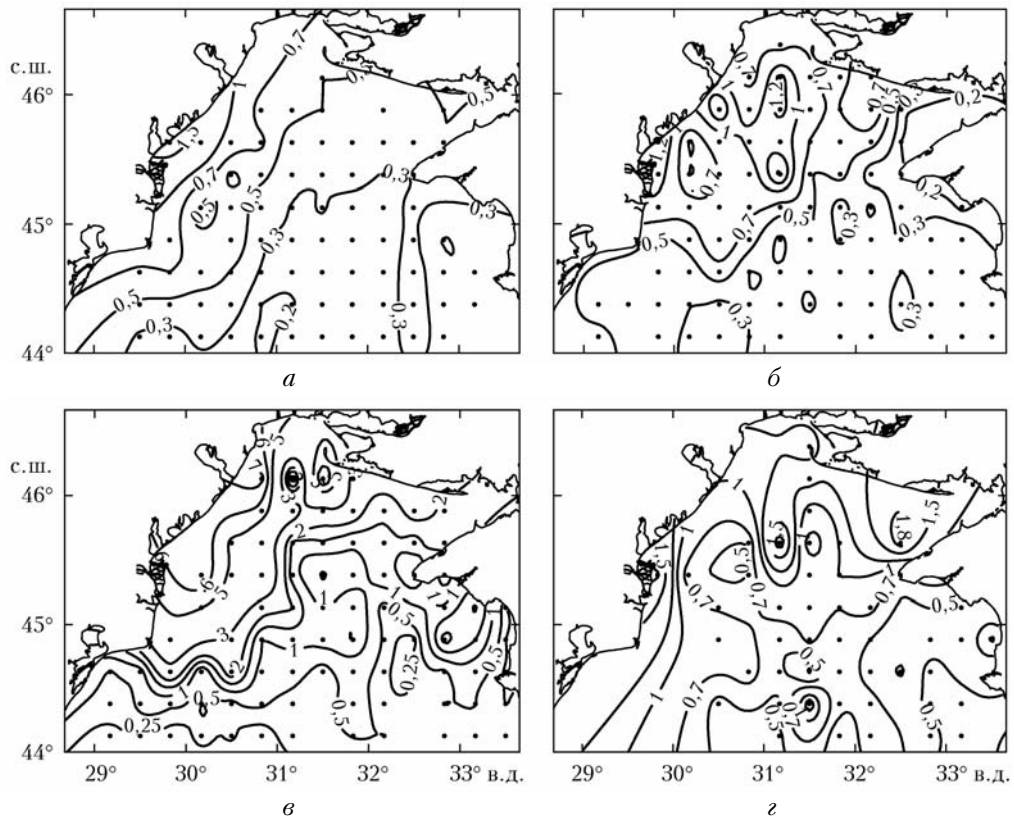


Рис. 3. ПОС (м^{-1}) (а, б) и концентрации хлорофилла а ($\text{мг}/\text{м}^3$) (в, г) в поверхностном слое СЗЧМ в летний (а, в) и осенний (б, г) периоды

Таблица 1

Сезонные изменения диапазонов изменения (\min , \max , м^{-1}), математического ожидания (M , м^{-1}), среднего квадратического отклонения (σ , м^{-1}) и коэффициента вариации (v , %) показателя ослабления света в различных районах СЗЧМ

Сезон	Величина	Район				
		западный	северный	центральный	восточный	южный
Зима	\min	0,35	0,2	0,18	0,17	0,21
	\max	5,0	1,96	0,89	0,48	0,43
	M	0,6	0,86	0,38	0,32	0,35
	σ	0,3	0,44	0,11	0,08	0,05
	v	50	51	28	25	14
	N/n	3/79	2/21	3/86	4/60	3/21
Весна	\min	0,3	0,36	0,19	0,23	0,23
	\max	1,8	1,3	0,82	0,58	0,56
	M	0,81	0,74	0,36	0,4	0,35
	σ	0,37	0,35	0,12	0,08	0,1
	v	46	47	34	21	27
	N/n	5/18	2/15	7/100	5/34	5/38
Лето	\min	0,23	0,5	0,09	0,19	0,13
	\max	1,46	1,28	1,52	0,74	0,86
	M	0,7	0,86	0,47	0,48	0,32
	σ	0,38	0,27	0,31	0,17	0,19
	v	54	31	65	35	59
	N/n	7/54	5/12	9/143	5/41	5/52
Осень	\min	0,1	0,25	0,08	0,16	0,08
	\max	0,7	0,69	0,92	0,63	1,0
	M	0,37	0,48	0,34	0,31	0,38
	σ	0,2	0,17	0,18	0,12	0,21
	v	32	35	54	39	55
	N/n	5/41	3/6	6/81	6/23	6/51

Примечание. N – количество рейсов, n – количество станций.

(рис. 2, z) и взвешенного органического углерода увеличилась в 5–10 раз (особенно в предустьевых районах Дуная и Днепро-Бугского лимана).

В летний период (июнь–сентябрь) в зависимости от объемов речного стока и ветровых условий, обуславливающих характер циркуляции в СЗЧМ, в этих районах находились в разной степени трансформированные речные воды [10]. Значение ПОС в этих водах, равное в западном районе ($0,7 \pm 0,38$) м^{-1} , в северном – ($0,86 \pm 0,27$) м^{-1} , было близким к ПОС в этих районах в весенний период (рис. 3, a и табл. 1). Внутрисезонная изменчивость ПОС в западном районе, как и в зимне-весенний период, осталась высокой (54%), а в северном – уменьшилась до 31%. Концентрация хлорофилла a (рис. 3, b) несколько понизилась по сравнению с его концентрацией в весенний период, но все же была достаточно высокой: в западном районе она равнялась ($3,2 \pm 2,4$) $\text{мг}/\text{м}^3$, в северном – ($3,1 \pm 2,3$) $\text{мг}/\text{м}^3$. Также несколько понизилось содержание компонентов ВОВ (примерно в 2,5–3 раза) [4].

В осенний период (октябрь–декабрь) среднее значение ПОС ($0,37 \pm 0,12$) м^{-1} и его изменчивость, особенно в западном районе, заметно повысились и значительно отличались от значений ПОС в других районах СЗЧМ (рис. 3, b). Также заметно уменьшилась концентрация хлорофилла a (рис. 3, z) и ВОВ [5].

Анализ рассчитанных по многолетним данным среднемесячных значений ПОС (табл. 2) позволяет более наглядно проследить характер их внутрисезонных и внутригодовых изменений.

Кроме того, для каждого месяца были рассчитаны средние квадратические отклонения и коэффициенты вариации (табл. 2). Наиболее статистически обеспечены результаты, полученные в марте, апреле, июле, сентябре и ноябре, когда в различные

Таблица 2

Внутригодовые изменения диапазонов изменения (\min , \max , м^{-1}), математического ожидания (M , м^{-1}), среднего квадратического отклонения (σ , м^{-1}) и коэффициента вариации (v , %) показателя ослабления света в различных районах СЗЧМ

Район	Величина	Месяц									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Западный	\min	0,35	0,3	0,58	0,4	0,35	–	0,23	–	0,24	0,1
	\max	5,0	1,2	1,8	1,5	1,2	–	1,46	–	0,65	0,7
	M	0,61	0,66	0,95	0,87	0,84	–	0,64	0,54	0,38	0,34
	σ	0,3	0,28	0,4	0,39	0,29	–	0,36	–	0,1	0,17
	v	49	42	42	45	34	–	57	–	26	49
	N/n	3/79	3/9	2/9	1/11	3/5	–	3/38	1/1	3/27	3/10
Северный	\min	0,2	0,37	0,36	–	0,62	–	0,5	–	0,25	–
	\max	1,96	0,43	1,3	–	0,74	–	1,28	–	0,69	–
	M	0,86	0,4	0,91	–	0,68	1,0	0,89	0,53	0,48	–
	σ	0,44	0,02	0,31	–	0,06	0	0,3	–	0,17	–
	v	51	6	33	–	9	0	33	–	35	–
	N/n	2/21	1/5	1/10	–	1/2	1/1	3/9	1/1	3/6	–
Центральный	\min	0,18	0,19	0,2	0,22	0,25	0,09	0,15	0,31	0,17	0,08
	\max	0,89	0,75	0,82	1,2	0,76	1,2	1,52	0,92	0,68	0,3
	M	0,38	0,36	0,36	0,38	0,48	0,46	0,51	0,54	0,27	0,21
	σ	0,11	0,1	0,16	0,19	0,12	0,38	0,38	0,16	0,09	0,09
	v	28	28	46	50	26	82	74	30	34	41
	N/n	3/86	4/74	3/26	1/37	3/26	2/11	3/69	2/25	3/35	2/21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Восточный	min	0,17	0,3	0,23	0,28	0,45	0,33	0,19	0,34	0,16	0,17
	max	0,48	0,58	0,41	0,42	0,74	0,7	0,5	0,63	0,35	0,17
	<i>M</i>	0,32	0,43	0,3	0,33	0,58	0,42	0,25	0,43	0,21	0,29
	σ	0,08	0,05	0,08	0,06	0,09	0,17	0,1	0,09	0,04	0,07
	<i>v</i>	25	12	27	18,6	14,5	40	40	20	19	25
	<i>N/n</i>	4/60	3/25	2/9	1/3	1/26	1/4	2/8	3/10	3/10	2/4
Южный	min	0,21	0,25	0,23	—	0,17	0,2	0,11	0,31	0,22	0,08
	max	0,43	0,56	0,4	—	0,86	0,37	0,3	1,0	0,37	0,3
	<i>M</i>	0,35	0,38	0,29	—	0,54	0,27	0,19	0,55	0,28	0,22
	σ	0,05	0,09	0,07	—	0,17	0,05	0,05	0,19	0,05	0,1
	<i>v</i>	14	24	24	—	32	19,5	24	34	16	46
	<i>N/n</i>	2/21	3/25	2/13	—	2/16	1/9	3/27	2/23	3/12	2/16

Примечание. *N* — количество рейсов, *n* — количество станций.

годы было выполнено не менее трех экспедиций. Результаты расчетов, полученные по материалам одной экспедиции (июнь, август), могут заметно отличаться от среднемесячных значений ПОС из-за его межгодовой изменчивости.

В западном районе повышенные значения ПОС (пониженная прозрачность), равные $0,61-0,95 \text{ м}^{-1}$, наблюдались в позднелетний (март), весенний (май) и в летний периоды. При этом изменчивость ПОС была достаточно высокой (34–57%). В конце года (ноябрь, декабрь) ПОС заметно уменьшился (прозрачность повысилась) и был равен $0,34-0,38 \text{ м}^{-1}$, а его изменчивость понизилась. В северном районе характер изменчивости ПОС примерно такой же, как и в западном районе. Относительно низкое его значение ($(0,4 \pm 0,02) \text{ м}^{-1}$) в апреле получено по результатам измерений в единственной экспедиции на станциях, расположенных на южном участке этого района, где в это время не наблюдались трансформированные речные воды и весеннее цветение фитопланктона [3]. Высокие значения ПОС (низкая прозрачность) в сентябре объяснялись распространением мутных вод из предустьевого района Днестровского лимана в 1985 г. [4]. В западном и северном районах получены одновершинные распределения среднемесячных значений ПОС. Это, видимо, объясняется характером сезонной изменчивости объемов речного стока, при котором максимальные его величины наблюдаются весной. В летний период трансформированные речные воды, как правило, распространяются по всей акватории этих районов [4, 10], создавая благоприятные условия для развития фитопланктона.

В центральном районе СЗЧМ, где влияние речного стока могло наблюдаться только в период с мая по октябрь [10], значения ПОС в зимний и весенний сезоны (следовательно и прозрачность) практически не изменились (см. рис. 2, б, табл. 1 и 2) и были близки к его значениям в открытом море. Незначительное его повышение (понижение прозрачности) в конце весеннего половодья (вторая половина мая — первая половина июня) в основном обусловлено повышением содержания ВОВ за счет более интенсивного развития фитопланктона.

В летний период прозрачность вод в районе в среднем несколько ниже (ПОС равен $(0,47 \pm 0,31) \text{ м}^{-1}$), чем в весенний период ($(0,36 \pm 0,12) \text{ м}^{-1}$). Это связа-

но с развитием фитопланктона (особенно его мелко-размерных видов кокколитофорид и перидиниевых) в обеспеченных биогенными элементами трансформированных речных водах, поступивших в этот район (см. рис. 3, б). Изменчивость размеров зоны влияния этих вод обусловила достаточно высокую внутрисезонную (65%) и межгодовую изменчивость распределения ПОС и содержания ВОВ по сравнению с их изменчивостью в западном и северном районах.

В осенний период прозрачность в среднем несколько повысилась (ПОС уменьшился в конце года до значений $(0,21-0,27) \text{ м}^{-1}$) по сравнению с прозрачностью в летний период, что объяснялось более низким содержанием ВОВ [5]. При этом изменчивость ПОС оставалась высокой (54%).

Для центрального района также характерна одновершинная кривая изменения среднемесячных значений ПОС. Однако в отличие от западного и северного районов максимальные значения ПОС на этой кривой сдвинуты в летне-раннеосенний период. В этот период трансформированные речные воды могут распространяться на значительную часть центрального района [10], создавая благоприятные условия для продуцирования фитопланктона.

Восточный район СЗЧМ. В зимне-весенний период он не подвержен влиянию трансформированных речных вод (за исключением его северного участка). Здесь ПОС зимой ($(0,32 \pm 0,08) \text{ м}^{-1}$) и весной ($(0,4 \pm 0,08) \text{ м}^{-1}$) был ниже, а прозрачность выше, чем в западном и северном районах, а его изменчивость была незначительной (21–25%). Зарегистрированное весеннее повышение ПОС (понижение прозрачности) было связано с более интенсивным весенним продуцированием фитопланктона. При этом концентрации компонентов ВОВ увеличились весной в 1,5–2 раза. В летне-осенний период значения ПОС в районе были близки к таковым в центральном районе, а их изменчивость заметно ниже (35–39%).

Южный район СЗЧМ. Для этого района, находящегося под влиянием вод открытого моря, характерны незначительная изменчивость ПОС в зимне-весенний период (14–27%) и значительная его изменчивость в летне-осенний период (55–59%).

В восточном и южном районах СЗЧМ характер внутригодовой изменчивости среднемесячных значений ПОС заметно изменился по сравнению с другими

районами. На распределении среднемесячных значений ПОС (см. табл. 2) выделяются три максимума – весенний (апрель), летний (июль) и осенний (октябрь), обусловленные относительно высоким содержанием компонентов ВОВ и хлорофилла *a* [3–5]. Весенний (менее выраженный) и осенний максимумы ПОС совпадают с сезонными циклами развития фитопланктона в этих районах СЗЧМ [11, 12]. Июльский максимум ПОС (особенно в южном районе) обусловлен аномально высокими концентрациями хлорофилла *a*, отмеченными в июле 1992 г. из-за летнего «цветения» кокколитофорид и динофлагеллят [13].

Каркинитский залив, входящий в восточный район СЗЧМ (см. рис. 1), испытывает высокую и все возрастающую антропогенную нагрузку в связи с расположенными на берегах залива крупными промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, а также в связи с интенсификацией работ по поиску и добыче газа и нефти в самом заливе.

Пространственно-временная изменчивость прозрачности в заливе, в качестве характеристики которой использована глубина видимости белого диска, достаточно подробно рассмотрена в работе [6]. Основные результаты проведенного в этой работе анализа следующие. (Для удобства сравнения данных по прозрачности вод в Каркинитском заливе (Z_6 , м) и основных районах СЗЧМ (ПОС, м^{-1}) в скобках приведены рассчитанные по Z_6 значения ПОС).

В северном районе залива, периодически подверженном влиянию трансформированных речных вод, средняя прозрачность во все сезоны была достаточно низкой – 8–9,1 м (ПОС равен (0,48–0,42) м^{-1}).

В центральном районе, в меньшей степени подверженном влиянию трансформированных речных вод (по сравнению с северным районом) и имеющем водообмен с северо-западным шельфом, средняя прозрачность вод и ее изменчивость в зимний, весенний и летний периоды были выше, чем в северном районе. Значения Z_6 находились в пределах 10,3–12,3 м (0,37–0,31 м^{-1}). Осенью средняя прозрачность заметно понизилась до 5,4 м (0,7 м^{-1}).

В восточном районе, удаленном от влияния трансформированных речных вод и имеющем очень ограниченный водообмен с северо-западным шельфом, в весенне-летний период наблюдались наиболее низкая прозрачность: весной – 6,2 м (0,6 м^{-1}); летом – 5,5 м (0,69 м^{-1}), и невысокая изменчивость.

Совместный анализ внутригодовых изменений прозрачности и биооптических параметров (концентрация хлорофилла *a*, показатели рассеяния и поглощения света) в северном, центральном и восточном районах показал, что на изменчивость прозрачности основное влияние, видимо, оказывают гидрофизические и гидробиологические процессы, происходящие непосредственно в самих районах.

Межгодовая изменчивость распределений ПОС отмечалась в работах [3–5, 7] по результатам наблюдений в отдельных экспедициях. Пределы изменения наблюдаемых значений ПОС в отдельные месяцы (см. табл. 2) также хорошо это иллюстрируют. Однако неравномерное (по годам и сезонам) распределение немногочисленных данных о значе-

ниях ПОС ограничивало возможности анализа их сезонных межгодовых изменений. Компенсировать отсутствие этих данных можно путем использования корреляционной связи между одновременно измеренными в поверхностном слое значениями концентрации хлорофилла *a* ($C_{\text{хл}}$), представленными для периода 1979–1995 гг. достаточно полно, и значениями ПОС (ϵ). Для этого рассчитывались уравнения линейной регрессии вида $\epsilon = aC_{\text{хл}} + b$. Степень связи между выбранными N парами ϵ и $C_{\text{хл}}$ оценивалась по коэффициенту корреляции r , его достоверности p и стандартной ошибке регрессии σ [14]. В результате были получены следующие сезонные уравнения:

– для зимнего периода $\epsilon = 0,43C_{\text{хл}} + 0,14$ ($r = 0,89$; $\sigma = 0,14$; $N = 51$);

– для весеннего $\epsilon = 0,37C_{\text{хл}} + 0,11$ ($r = 0,83$; $\sigma = 0,13$; $N = 54$);

– для летнего $\epsilon = 0,12C_{\text{хл}} + 0,2$ ($r = 0,86$; $\sigma = 0,12$; $N = 121$);

– для осеннего $\epsilon = 0,11C_{\text{хл}} + 0,17$ ($r = 0,68$; $\sigma = 0,08$; $N = 64$).

Значения коэффициентов корреляции r (0,68–0,89) для приведенных зависимостей оказались достоверными при высоком уровне значимости ($p < 0,001$). Использование для расчетов ПОС спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a*, полученных с помощью радиометра CZCS в 1979–1986 гг., позволило восполнить недостаток ее судовых наблюдений в этот период. Сравнение среднемесячных концентраций хлорофилла *a*, полученных в результате судовых и спутниковых наблюдений в одних и тех же районах, показало их удовлетворительное сходство (различие составляло 10–30%). Различия измеренных и рассчитанных значений ПОС в одинаковых районах в основном находилось в пределах 10–20%. Результаты измерений и расчетов значений ПОС в различные годы приведены на рис. 4, где объединены сезонные данные в районе влияния рек (западном и северном), а на рис. 5 – в расширенном до 32°30' в.д. центральном районе.

В работах [7, 15] по результатам анализа данных в отдельных съемках было показано, что на распределения прозрачности и взвешенного вещества в СЗЧМ в зимне-весенний период влияют региональные гидрометеорологические условия и объемы стока рек, аномалии которых, в свою очередь, обусловлены изменчивостью глобальных климатических сигналов межгодового масштаба (северного и южного колебаний) в различные периоды события Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) или его отсутствия. Влияние изменчивости индексов этих колебаний на формирование погодно-климатических аномалий в Европейском регионе заключается в следующем.

В годы развитого события ЭНЮК в зимний период ослабляется циклоническая активность над Центральной и Южной Европой. Устойчивая антициклональная погода, характеризующаяся пониженными осадками и температурой воздуха, приводит к снижению объемов стоков рек и уменьшению площади зоны их влияния на характеристики вод в СЗЧМ.

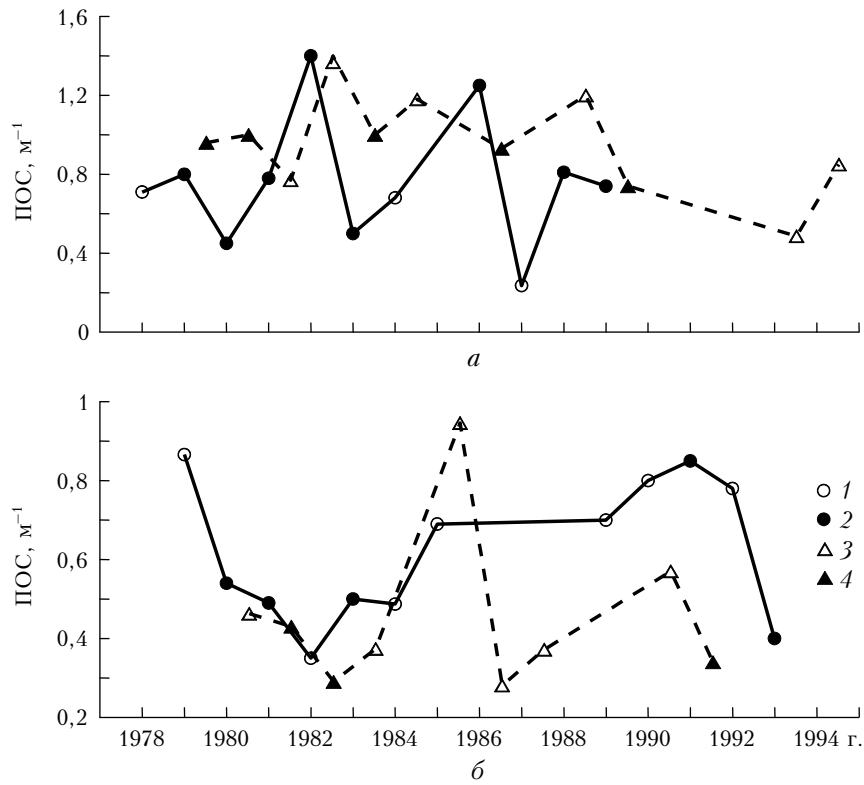


Рис. 4. Межгодовые изменения измеренных (1, 3) и рассчитанных (2, 4) средних значений ПОС в зимний (1, 2) и весенний (3, 4) (а), летний (1, 2) и осенний (3, 4) (б) периоды в поверхностном слое в западном и северном районах СЗЧМ

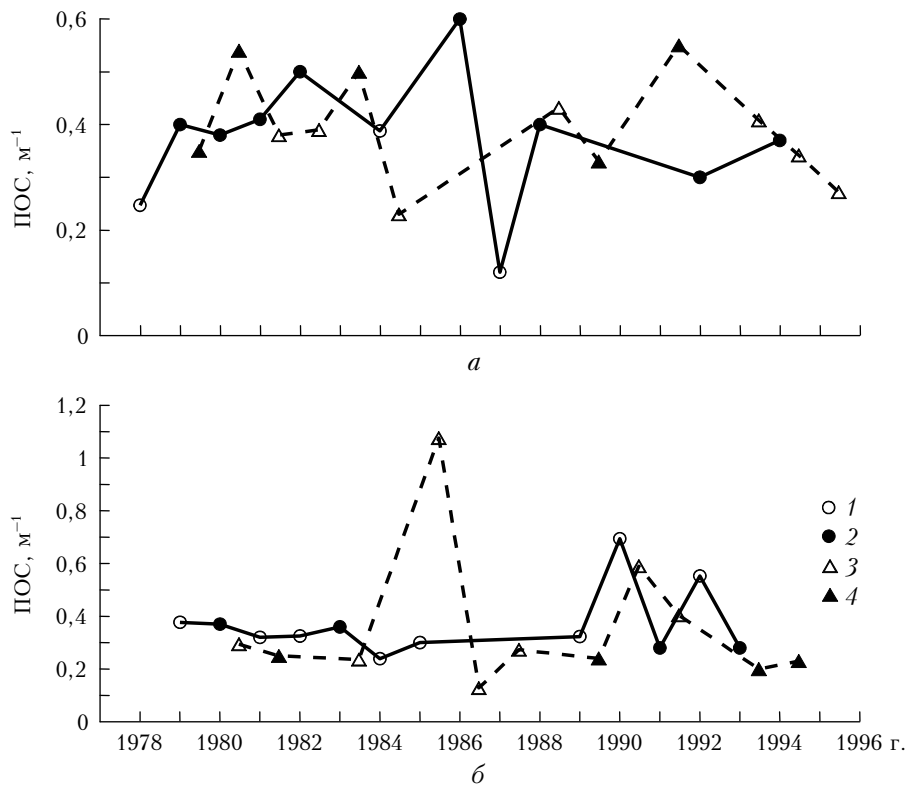


Рис. 5. Межгодовые изменения измеренных (1, 3) и рассчитанных (2, 4) средних значений ПОС в зимний (1, 2) и весенний (3, 4) (а), летний (1, 2) и осенний (3, 4) (б) периоды в поверхностном слое в центральном районе СЗЧМ

Пониженная температура воды ухудшает условия продуцирования фитопланктона, что приводит к понижению содержания ВОВ.

В нормальные зимы (отсутствие Эль-Ниньо) усиливается циклоническая активность над площадями водосборов рек. Наблюдается увеличение речных стоков и площади зоны их влияния на воды СЗЧМ. В зоне трансформации речных вод происходит более интенсивное продуцирование фитопланктона, приводящее к повышению содержания ВОВ. После теплой зимы весеннее продуцирование фитопланктона было менее интенсивным, чем зимнее.

Анализ межгодовых изменений ПОС в зимне-весенний период (рис. 4, а и 5, а), проведенный с использованием аномалий (отклонений от средних значений, выраженных в терминах квадратичных отклонений σ) объема стока Дуная и температуры воздуха [7] (рис. 6), показал следующее.

Период 1978–1982 гг. характеризовался отсутствием события ЭНЮК, умеренно теплыми зимами (кроме холодной зимы 1980 г.) [16] и положительными аномалиями стока Дуная. Такие условия способствовали достаточно интенсивному развитию фитопланктона в зимне-весенний период в районе влияния рек. Концентрация хлорофилла *a* и рассчитанные значения ПОС были выше средних значений (кроме 1980 г.). В центральном районе величины ПОС были близки к их средним значениям (см. табл. 1, рис. 5, а). Высокие значения ПОС (низкая прозрачность) в этом районе были получены весной 1980 и зимой 1982 гг., когда по спутниковым данным наблюдались повышенные значения концентрации хлорофилла *a*.

В 1984–1988 гг. (кроме 1987 г.) событие ЭНЮК также отсутствовало. Сток Дуная в зимний период был ниже среднего, а в весенний – выше среднего.

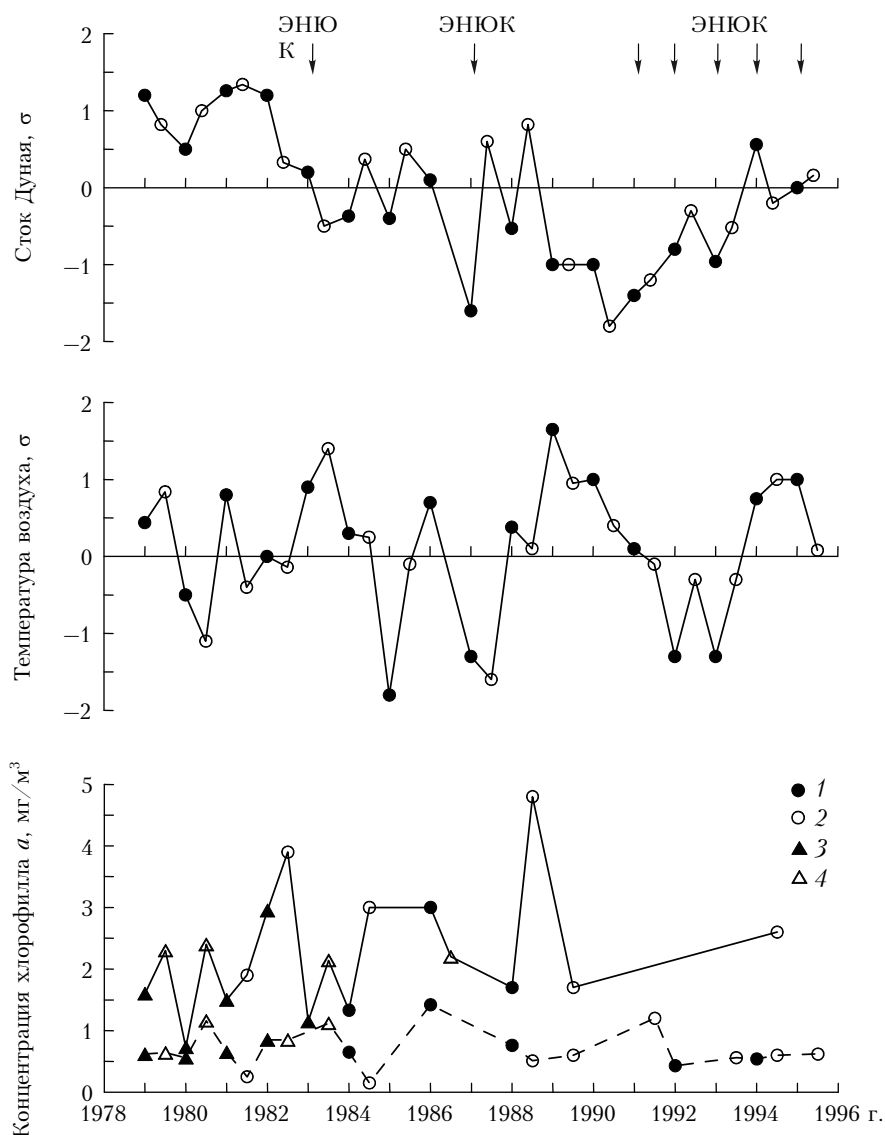


Рис. 6. Межгодовые изменения средних значений аномалий объема стока р. Дунай, температуры воздуха и средней концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое в западном (сплошная линия) и центральном (штриховая линия) районах по данным судовых (1, 2) и спутниковых (3, 4) наблюдений в зимний (1, 3) и весенний (2, 4) периоды

Высокие значения ПОС (низкая прозрачность) в обоих районах в зимне-весенний период в 1986 г., видимо, объяснялись интенсивной вегетацией фитопланктона в январе этого года во время теплой зимы [17]. В 1984 и 1988 гг. при одинаковых примерно метеоусловиях (температура воздуха и сток Дуная находились в пределах нормы) в западном районе весной были зарегистрированы более интенсивное продуцирование фитопланктона (высокие значения концентрации хлорофилла *a* на рис. 6) и более высокие значения ПОС (более низкая прозрачность), чем зимой. В центральном районе в эти годы в зимне-весенний период концентрации хлорофилла *a* и ПОС были близки к их средним значениям. И только весной 1984 г. были зарегистрированы низкие значения ПОС (высокая прозрачность) и ниже средней концентрации хлорофилла *a*.

В годы Эль-Ниньо (1983, 1987, 1991–1995 гг.) отметим следующее. Эль-Ниньо 1983 г. относилось к летне-осеннему типу, региональные проявления которого отличаются от типичных условий при ЭНЮК [15]. Зима в этом году была умеренно теплой, а сток Дуная незначительно отличался от его средних значений. В зимний период в районе влияния рек концентрации хлорофилла *a* (по спутниковым данным) и ПОС были ниже средних. В центральном районе весной эти концентрации были выше средних концентраций. В 1987 г. зима была холодной, сток Дуная – небольшим, а ПОС очень низким, что свидетельствовало о высокой прозрачности воды на северо-западном шельфе (см. рис. 4, *a* и 5, *a*).

В период 1991–1995 гг., характеризуемый долгоживущим событием ЭНЮК с несколькими фазами развития и затухания, выделялись холодные зимы 1992 и 1993 гг., когда сток Дуная был низким. Зимнее и весеннее продуцирование фитопланктона в эти годы было слабым, что объясняет относительно низкие значения ПОС (высокую прозрачность) весной. Более теплые зима и весна 1994 г., положительные значения аномалии стока Дуная зимой и близкие к среднему значению стока весной способствовали более интенсивному продуцированию фитопланктона и увеличению значений ПОС (понижению прозрачности вод) в зоне трансформации (см. рис. 4, *a*). В то же время в центральном районе значения ПОС в весенний период 1994 и 1995 гг. уменьшились (см. рис. 5, *a*) (прозрачность повысилась) по сравнению с апрелем 1993 г. В основном это объяснялось условиями развития фитопланктона, а также поступлением в район в 1995 г. более прозрачных вод открытого моря [3].

В летний период (особенно в районе влияния рек) можно выделить два временных интервала – 1979–1982, 1983–1992 гг., различающиеся характером изменчивости ПОС (см. рис. 4, *b* и 5, *b*). Для первого интервала характерно уменьшение значений ПОС (повышение прозрачности), которое хорошо коррелировало с понижением концентрации хлорофилла *a*. Средняя летняя температура воздуха в эти годы постепенно понижалась, и в 1982 г. лето было умеренно холодным [16]. В течение 1983–1992 гг. наблюдалось увеличение ПОС. Его максимальные значения

отмечены в начале 90-х гг., когда летняя температура была выше климатической, а также наблюдалось повышенное содержание хлорофилла *a* (1992 г. отмечен как аномальный в связи с интенсивным развитием мелкоразмерных клеток водорослей – кокколитофорид и мелких жгутиковых [13]). В центральном районе повышенные значения ПОС были зарегистрированы в 1990 г., когда летом в СЗЧМ наблюдалась антициклоническая циркуляция, выносящая из западного района в центральный более мутные обогатненные биогенными элементами трансформированные речные воды, что способствовало интенсивному развитию фитопланктона [4].

В осенний период характер изменчивости ПОС в западном (см. рис. 4, *b*) и центральном (рис. 5, *b*) районах был такой же, как в летний период. Исключение составляло максимальное его значение, измеренное в 1985 г., когда также была зарегистрирована высокая концентрация хлорофилла *a*, обусловленная интенсивным развитием фитопланктона в связи с поступлением в центральный район шельфа трансформированных речных вод [5].

Отметим также, что холодные зима и лето в этом году не способствовали активному продуцированию фитопланктона и истощению запасов биогенных элементов. Минимальное значение ПОС (высокая прозрачность) были получены в декабре 1986 г. во время события ЭНЮК, когда температура воздуха была ниже климатической. Повышенное значение ПОС (пониженная прозрачность), наблюдаемое в конце сентября–октябре 1990 г., видимо, было связано с понижением прозрачности в этот период во всем Черном море. Кроме того, в центральном районе, как было отмечено выше, в летний период зарегистрированы активное развитие фитопланктона, а также появление белесого цвета вод, не определяемого по шкале цветности [4]. Заметное уменьшение рассчитанных значений ПОС в 1993 и 1994 гг. было получено в южной части центрального района, находящегося под влиянием вод открытого моря.

Сведения о наблюдениях прозрачности вод в СЗЧМ в период после 1995 г. нам неизвестны. В то же время сейчас доступны данные о концентрации хлорофилла *a*, полученные в 1998–2010 гг. с помощью сканера цвета Sea WiFS [9]. Поэтому, используя полученные выше зависимости между концентрациями хлорофилла *a* и ПОС, можно рассчитать оценки возможных величин ПОС в районах СЗЧМ в этот период. Сравнение сезонных значений концентрации хлорофилла *a*, полученных по результатам судовых измерений (1981–1995 гг.) и наблюдений сканерами CZCS (1979–1986 гг.) и Sea WiFS (1998–2010 гг.), показало их удовлетворительное сходство (различие составляло 10–30%). Также хорошо совпадал характер внутрigoдовых (межсезонных) изменений этих концентраций. Удовлетворительные результаты таких сравнений являются хорошим основанием для расчетов ПОС в эти годы.

На рис. 7 показаны аномалии межгодовых сезонных изменений ПОС в западном и центральном районах СЗЧМ в зимне-весенний период.

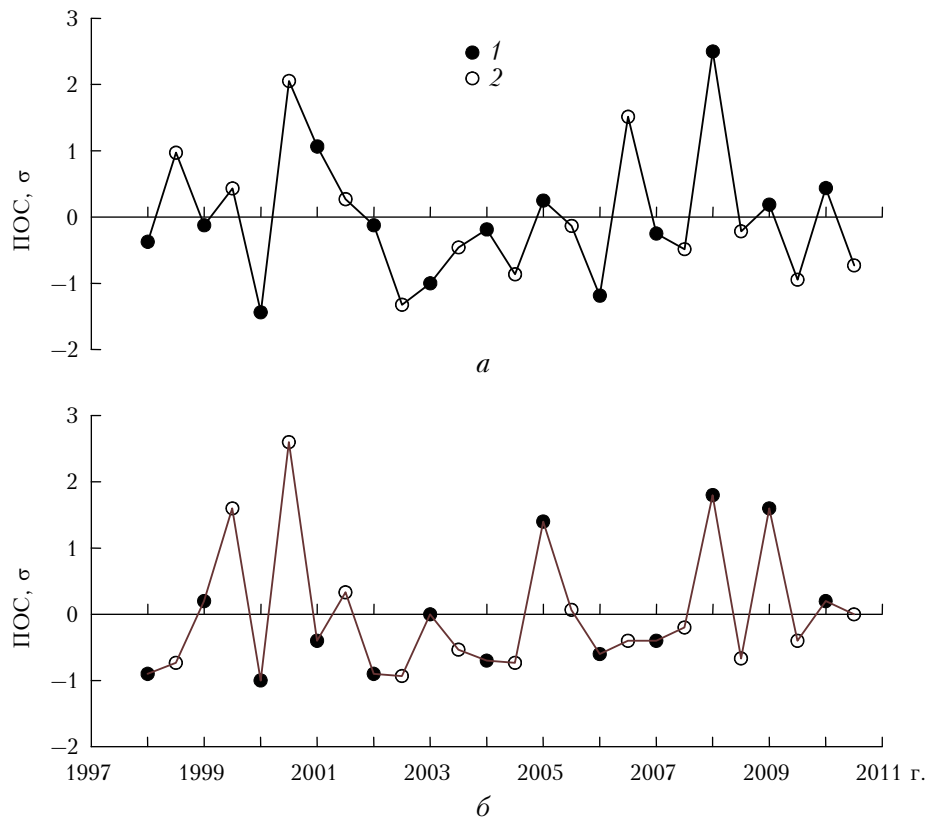


Рис. 7. Межгодовые изменения средних значений аномалий ПОС, рассчитанных по данным спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое в западном (*a*) и центральном (*б*) районах СЗЧМ в зимний (1) и весенний (2) периоды

Предварительный краткий анализ этих изменений выявил наличие некоторых особенностей, которые также были отмечены при анализе межгодовой изменчивости ПОС в период 1978–1995 гг. Так, в 1998–2000 гг., как и в 1979–1981 гг. (при примерно одинаковом объеме стока Дуная, температурных условиях и отсутствии события Эль-Ниньо), в обоих районах СЗЧМ в весенний период получены повышенные значения ПОС (пониженная прозрачность). В 2000 г. (как и в 1980 г.) зима была холодной и значения ПОС заметно понизились (прозрачность была более высокой). Также низкие значения ПОС отмечены в зимне-весенний период в течение 2002–2004 гг.

В эти годы, как и в 1992-м и 1993-м, было зарегистрировано событие Эль-Ниньо с наиболее развитой фазой зимой 2003 г. и в СЗЧМ отмечены низкая температура воды и ниже среднего объем стока Дуная. Такие условия характерны для холодной зимы, что не способствует интенсивному зимне-весеннему цветению фитопланктона. Низкие значения ПОС и концентрации хлорофилла *a* в западном и центральном районах зимой 2006 г. во время Эль-Ниньо 2006–2007 гг. (сток Дуная был несколько выше среднего), видимо, объяснялись низкой температурой воды (ниже климатической). Подобная ситуация была зарегистрирована во время события Эль-Ниньо зимой 1987 г. Заметное увеличение ПОС (понижение прозрачности) весной 2006 г.

было связано с весенним прогревом воды, способствовавшим ускоренному развитию фитопланктона и увеличению $S_{\text{хл}}$. Обратная картина (зимой значения ПОС выше средних значений, весной – ниже) была получена в обоих районах в 2008 и 2009 гг. (зимы теплые, сток Дуная выше среднего). Подобные изменения ПОС и метеоусловий отмечались в 1982 и 1986 гг.

Заключение

В результате проведенного анализа многолетних (1978–1995 гг.) оптических данных (ПОС и Z_6), характеризующих прозрачность воды, изучены основные особенности их распределений и изменчивости в районах СЗЧМ, различающихся по степени влияния на их гидрофизические характеристики стока рек и вод открытого моря.

В западном и северном районах, постоянно в течение года находящихся под влиянием речного стока, наблюдались более высокие значения ПОС (более низкая прозрачность) по сравнению с другими районами, обусловленные повышенным содержанием взвешенного вещества. Повышенные значения ПОС (пониженная прозрачность) отмечены в весенне-летний период, пониженные – в осенний период. Такие изменения ПОС связаны с сезонной изменчивостью объемов речного стока, в значительной степени определяющей условия продуцирования фитопланктона.

В центральном районе повышенные значения ПОС (пониженная прозрачность) наблюдались в летне-раннеосенний период, когда трансформированные речные воды могли распространяться на значительную часть района, создавая благоприятные условия для продуцирования фитопланктона. В остальные месяцы года, когда влияние речного стока отсутствовало, были отмечены более низкие значения ПОС (более высокая прозрачность).

На восточный (за исключением его северного участка и Каркинитского залива) и южный районы влияли воды открытого моря, в основном определяя изменчивость прозрачности вод в этих районах. Для внутригодовых изменений прозрачности характерны три максимума ПОС (низкой прозрачности) – весенний (апрель), летний (июль) и осенний (октябрь). Весенний и осенний максимумы совпадали с сезонными циклами развития фитопланктона в этих районах. Летний максимум ПОС был обусловлен аномально высокой концентрацией хлорофилла *a* в июле 1992 г.

Использование регрессионной зависимости между одновременно измеренными значениями ПОС и концентрации хлорофилла *a* позволило по данным судовых и спутниковых наблюдений ее концентрации рассчитать сезонные значения ПОС в период отсутствия их наблюдений в течение 1978–2010 гг. Межгодовые сезонные изменения ПОС в этот период в значительной степени определялись условиями продуцирования фитопланктона. В районе влияния рек на эти условия влияли изменения объема речного стока, обогащенного биогенными элементами, и температурный режим, которые, в свою очередь, зависели от погодных-климатических условий в Европейском регионе. В центральном районе продуцирование фитопланктона в зимне-весенний период в основном определялось температурным режимом, а в летне-осенний на его продуцирование также оказывали влияние поступающие в район трансформированные речные воды, масштабы распространения которых зависели от характера циркуляции вод в СЗЧМ.

1. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Исследование распространения речных вод в северо-западной части Черного моря в весенний гидрологический сезон // Метеорол. и гидрол. 2000. № 8. С. 93–101.
2. Агафонов Е.А., Каминский С.Т., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Пространственная структура и изменчивость полей течений, показателя ослабления света и температуры в поверхностном слое северо-западной части Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 1998. № 4. С. 57–69.
3. Кукушкин А.С., Агафонов Е.А., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Изменчивость прозрачности и содержания

взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 870–881.

4. Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Изменчивость распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в летний период // Океанология. 2006. Т. 46, № 6. С. 834–845.
5. Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Особенности распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в осенний период // Океанология. 2008. Т. 48, № 3. С. 333–344.
6. Кукушкин А.С. Сезонная изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 181–189.
7. Кукушкин А.С., Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н. Особенности формирования поля прозрачности в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в зимне-весенний период // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 730–736.
8. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. С. 82–85.
9. URL: <http://blackseacolor.com>
10. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наук. думка, 1970. 328 с.
11. Демидов А.Б. Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология. 2008. Т. 48, № 5. С. 718–733.
12. Планктон Черного моря / Под ред. А.В. Ковалева, З.З. Финенко. Киев: Наук. думка, 1993. 280 с.
13. Yilmaz A., Yunev O., Vedernikov V., Moncheva S., Bologa A., Cociasu A., Ediger D. Unusual temporal variations in the spatial distribution of chlorophyll-*a* in the Black Sea during 1990–1996 // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea / Ed. L.I. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. V. 1. P. 105–120.
14. Румишинский Л.З. Элементы теории вероятности. М.: Наука, 1970. 256 с.
15. Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. О связи крупномасштабных атмосферных процессов с изменчивостью прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в зимний период // Метеорол. и гидрол. 2004. № 12. С. 52–62.
16. Титов В.Б. Влияние многолетней изменчивости климатических условий на гидрологическую структуру и межгодовое обновление холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 2003. Т. 43, № 2. С. 176–184.
17. Юнев О.А. Пространственное распределение хлорофилла *a* и феофитина *a* в западной части моря в зимний период // Океанология. 1989. Т. 29, № 3. С. 480–485.

A.S. Kukushkin. Long-term and seasonal variability of transparency distribution in surface waters of the north-western Black Sea.

Using long-term observational data on beam attenuation coefficient (BAC) and depth of visibility of Secchi Disk, the main peculiarities of annual cycle of transparency distribution in surface water layer of the north-western Black Sea were considered. Statistical estimations of seasonal and intra-seasonal variations of BAC in the areas which differ in the degree of influence on their hydrophysical characteristics of river and open-sea water flow were obtained, and their good agreement with variations of content of suspended matter components was noted. Seasonal values of BAC on chlorophyll *a* concentration were calculated, based on the use of regressive dependence between these parameters being measured simultaneously. It is shown that long-term (1978–2010) seasonal variations of BAC (measured and calculated) and, connected with them, variations of chlorophyll *a* concentration depend on variability of the river flow capacity, coverage of its distribution on the north western shelf and regional hydrometeorological conditions.

Многолетняя и сезонная изменчивость распределения прозрачности в поверхностных водах...

5. Оптика атмосферы и океана, № 2.