

УДК 551.463.5

## Сезонная изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива

А.С. Кукушкин\*

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

Поступила в редакцию 25.04.2011 г.

По данным многолетних (1924–1995 гг.) наблюдений глубины видимости белого диска исследована изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива. По особенностям формирования поля прозрачности в заливе выделены пять районов, для которых получены оценки сезонных и внутригодовых изменений глубины видимости белого диска. Показано хорошее соответствие характера сезонных и внутригодовых изменений прозрачности и биооптических параметров (концентрация хлорофилла «а», показатели рассеяния и поглощения света), определенных по спутниковым данным сканеров цвета CZCS (1978–1986 гг.) и SeaWiFS (1997–2009 гг.).

**Ключевые слова:** прозрачность, концентрация хлорофилла «а», показатель рассеяния света, показатель поглощения света, Черное море; transparency, chlorophyll a concentration, total absorption coefficient, the Black Sea.

### Введение

Каркинитский залив, расположенный в северо-западной части Черного моря и омывающий северо-западное побережье Крыма (рис. 1), с многочисленными рекреационными центрами на побережье, районами рыболовства и воспроизводства рыбных запасов испытывает высокую и все возрастающую антропогенную нагрузку.

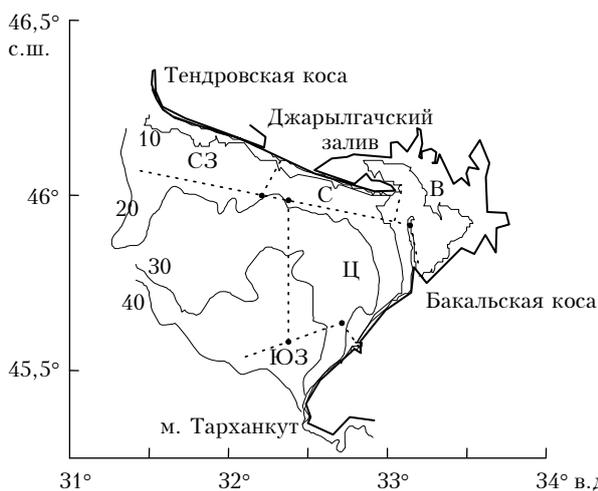


Рис. 1. Районы Каркинитского залива: северо-западный (СЗ), северный (С), центральный (Ц), восточный (В) и юго-западный (ЮЗ). Тонкие линии – изобаты, м

Это связано со стоками расположенных на берегах залива крупных промышленных и сельскохозяй-

ственных предприятий, а также с интенсификацией работ по поиску и добыче газа и нефти в самом заливе. В связи с этим изучение прозрачности вод в заливе в условиях их прогрессирующего загрязнения и эвтрофикации 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].

Структура поля прозрачности в заливе и особенности ее формирования в основном определяются содержанием взвешенного вещества и изменчивостью его пространственного распределения, которые, в свою очередь, зависят: от проникновения в залив вод северо-западного шельфа и трансформированных речных вод, насыщенных веществами органического и минерального происхождения; от береговых стоков (промышленно-бытовые, стоки из оросительных систем Северного Крыма, дождевые и талые воды); от условий продуцирования и отмирания фитопланктона; от волнового взмучивания донных осадков и абразии берегов. В связи с многообразием перечисленных факторов структура поля прозрачности в заливе и ее изменчивость (как и в других мелководных районах моря) должны были отличаться от таковых в открытом море [2], что и показали исследования прозрачности в прибрежных и шельфовых районах моря [1, 3–7].

До недавнего времени изученность распределения прозрачности вод в заливе была низкой. Данные о результатах измерений показателя ослабления направленного света и глубины видимости белого диска ( $Z_6$ ) были получены только для западной части залива (вблизи его географической границы

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

с северо-западным шельфом) [3–7]. Прозрачность вод в заливе и ее изменчивость по результатам анализа распределения  $Z_6$  в отдельных съемках были описаны в работе [8], где под термином «прозрачность» (как и в настоящей статье) понимается глубина видимости белого диска  $Z_6$ , называемая в гидрооптике относительной прозрачностью. Изменчивость прозрачности была проанализирована нами в пяти районах залива (рис. 1), различающихся по условиям формирования в них поля прозрачности.

В северо-западном и северном районах залива, наиболее подверженных влиянию распресненных вод из Днепро-Бугского лимана [9], прозрачность вод была низкая, а ее изменчивость высокая. Средние значения прозрачности в течение года были равны 6,5–8,7 м. В центральном районе, в меньшей степени подверженном влиянию распресненных вод и имеющем водообмен с северо-западным шельфом, прозрачность воды в весенне-летний период была выше (13 м), чем в северных районах.

Повышенная прозрачность, незначительно меняющаяся в течение года ( $Z_6 = 14,4 \div 16,0$  м), была зарегистрирована в водах юго-западной части залива и к западу от м. Тарханкут. Это объяснялось водообменом данных районов с водами шельфа, содержащими также относительно прозрачные воды открытой части моря. Низкая прозрачность во все сезоны ( $Z_6 = 5,3 \div 5,9$  м) наблюдалась в восточной части залива, наиболее удаленной от влияния распресненных вод. Результаты анализа распределения  $Z_6$  в отдельных съемках позволили получить некоторое представление о сезонной изменчивости прозрачности вод в заливе. В то же время характер, статистические оценки и возможные причины внутрисезонной (внутригодовой) изменчивости прозрачности рассмотрены не были.

Целью настоящей работы, продолжающей исследования структуры, особенностей формирования и изменчивости поля прозрачности в различных районах Черного моря, является обобщение и анализ результатов многолетних наблюдений сезонной и внутригодовой изменчивости распределения прозрачности вод Каркинитского залива. Также делается попытка использовать данные спутниковых наблюдений для объяснения некоторых особенностей такой ее изменчивости.

## Материалы и методы

Для анализа распределения прозрачности использованы данные банка Морского гидрофизического института НАН Украины по наблюдениям глубины видимости белого диска, полученные в 1924–1995 гг. (для зимнего периода проанализировано 116 измерений, для весеннего – 230, для летнего – 290, для осеннего – 59).

Единичные данные о содержании взвешенного вещества в юго-западном районе и вблизи западной границы залива [4–8] не позволили получить оценки его влияния на прозрачность вод в заливе (сведения о содержании взвешенного в вещества на большей части акватории залива нам не известны). Поэтому для качественной оценки влияния содержания

взвешенных и растворенных в воде веществ на изменчивость распределений прозрачности вод в заливе были использованы следующие данные массовых спутниковых наблюдений основных биооптических параметров, полученные с помощью сканеров цвета CZCS (1978–1986 гг.) [10] и SeaWiFS (1997–2009 гг.) [11]: концентрация хлорофилла «а» –  $C_{хл}$  (данные сканера цвета CZCS были любезно переданы автору В.В. Суслиным), показатель поглощения света окрашенным органическим веществом в сумме с неживым взвешенным веществом на длине волны 490 нм –  $a_{cm}$  (далее – показатель поглощения), показатель обратного рассеяния взвешенными частицами на длине волны 555 нм –  $b_{br}$  (далее показатель рассеяния). Спутниковые данные были представлены в виде матриц значений с разрешением 2–2,8 км по широте и долготе. Значения биооптических параметров SeaWiFS рассчитывались по алгоритмам, учитывающим сезонные и региональные особенности изменчивости этих параметров [12]. Для анализа использовались среднемесячные данные, усредненные за весь период наблюдений.

Для построения карт сезонных распределений средних значений  $Z_6$  и концентрации хлорофилла «а» акватория залива была разбита на квадраты со сторонами, равными 5'. По данным измерений, выполненных в каждом сезоне в этих квадратах, вычислялись средние значения  $Z_6$  и концентрации хлорофилла «а», которые относились к центру квадратов, для которых они вычислялись. Эти центры, обозначенные на картах жирными кружками, дают представление о пространственном расположении станций, данные которых использовались для построения этих карт.

## Результаты и обсуждение

### Сезонная изменчивость

Распределения сезонных значений  $Z_6$  показаны на рис. 2.

Статистические характеристики изменений  $Z_6$  в различных районах залива представлены в табл. 1.

Коэффициент вариации, определяемый отношением среднеквадратического отклонения к среднему арифметическому значению, использован в работе в качестве оценки изменчивости прозрачности.

*В зимний период (январь–март)* пониженная прозрачность наблюдалась в северо-западном ( $Z_6 = (6,3 \pm 0,6)$  м) и северном ( $(8,5 \pm 2,5)$  м) районах (рис. 2, а, табл. 1).

В юго-восточном направлении прозрачность повышалась – в центральном районе  $Z_6$  была равна  $(10,3 \pm 1,4)$  м, а в юго-западном –  $(12,4 \pm 2,7)$  м. Изменчивость прозрачности в зимний период во всех районах была невысокая (9–22%).

*В весенний период (апрель–июнь)* прозрачность воды во всех районах залива несколько повысилась (рис. 2, б, табл. 1). Наиболее мутные воды сохранились в северо-западном ( $(7,3 \pm 3,0)$  м) и северном ( $(9,1 \pm 3,0)$  м), а также наблюдались в восточном районе, где  $Z_6$  была равна  $(6,2 \pm 2,0)$  м. В центральном районе прозрачность воды повысилась

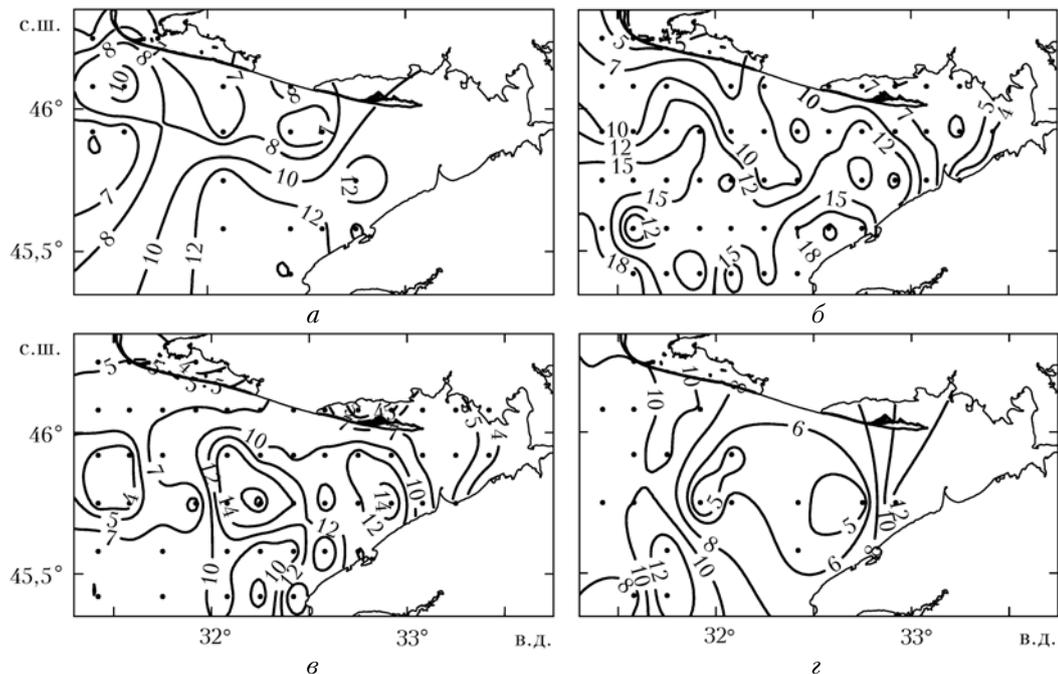


Рис. 2. Распределение глубины видимости белого диска, м, в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (з) периоды

Таблица 1

Сезонные изменения среднего значения ( $M$ , м), среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ , м), диапазонов изменения ( $\Delta Z_6$ , м) и коэффициента вариации (%) глубины видимости белого диска в различных районах Каркинитского залива

Сезон	Характеристика	Район				
		северо-западный	северный	центральный	восточный	юго-западный
Зима	$M \pm \sigma$	$6,3 \pm 0,6$	$8,5 \pm 2,5$	$10,3 \pm 1,4$	—	—
	$\Delta Z_6$	6,0–7,0	6,0–11,0	8,0–12,0	—	—
	$v$	9	29	13	—	—
	$N$	3	2	6	—	—
Весна	$M \pm \sigma$	$7,3 \pm 3,0$	$9,1 \pm 3,0$	$12,3 \pm 4,6$	$6,2 \pm 2,0$	$15,2 \pm 4,5$
	$\Delta Z_6$	3,0–14,0	4,3–14,0	5,0–20,0	1,0–9,0	7,0–25,0
	$v$	41	33	37	32	30
	$N$	15	23	28	13	111
Лето	$M \pm \sigma$	$6,5 \pm 2,6$	$8,6 \pm 3,4$	$11,1 \pm 4,7$	$5,5 \pm 1,7$	$16,0 \pm 4,9$
	$\Delta Z_6$	2,5–12,5	4,0–14,6	3,0–21,0	2,0–9,0	6,0–25,0
	$v$	40	39	42	31	31
	$N$	52	24	28	40	62
Осень	$M \pm \sigma$	$9,5 \pm 2,5$	8,0	$5,8 \pm 3,9$	—	$14,4 \pm 3,4$
	$\Delta Z_6$	4,0–15,0	—	2,8–13,0	—	9,0–19,0
	$v$	26	—	67	—	24
	$n$	16	1	8	—	9

Примечание.  $n$  – количество станций.

до ( $12,3 \pm 4,6$ ) м, а наиболее прозрачные воды были отмечены в юго-западном районе, где  $Z_6 = (15,2 \pm 4,5)$  м. Изменчивость значений  $Z_6$  в весенний период заметно выросла до 30–41%.

В летний период (июль–сентябрь) прозрачность воды в заливе изменилась незначительно (рис. 2, в, табл. 1). Во всех его районах (кроме юго-западного) величины  $Z_6$  уменьшились примерно на 10% по сравнению с весенним периодом, а их изменчивость осталась примерно такой же.

В осенний период (октябрь, ноябрь) прозрачность вод в северном и юго-западном районах по сравнению с летним периодом уменьшилась примерно на 10% до 8 и ( $14,4 \pm 3,4$ ) м соответственно (рис. 2, з, табл. 1). В северо-западном районе  $Z_6$  увеличилась до ( $9,5 \pm 2,5$ ) м, а в центральном – уменьшилась почти в 2 раза (до ( $5,8 \pm 3,9$ ) м).

В связи с отсутствием данных измерений содержания взвешенного вещества в водах залива одновременно с измерениями прозрачности приведем

сезонные карты распределений концентраций хлорофилла «а» (рис. 3), построенные по данным спутниковых наблюдений за 1997–2009 гг. (сканер цвета SeaWiFS).

Известно, что концентрация хлорофилла «а» служит главным показателем биомассы фитопланктона, являющегося основой взвешенного органического вещества в морской воде [13]. Это может быть использовано для качественной оценки влияния содержания взвешенного органического вещества (по концентрации хлорофилла «а») на прозрачность воды в заливе. Сезонные распределения концентраций хлорофилла «а» (рис. 3) хорошо совпадают с такими распределениями  $Z_6$  (см. рис. 2). В наиболее обеспеченный данными по  $Z_6$  весенне-летний период наблюдались понижение прозрачности и увеличение концентрации хлорофилла «а» в северном направлении. Также в этот период отмечены уменьшение прозрачности вод в заливе (особенно в южной его части) и возрастание  $S_{xl}$  в восточном направлении. Более подробно влияние концентрации хлорофилла «а» на прозрачность воды в различных районах залива будет рассмотрено ниже.

### Внутригодовая изменчивость

Сравнение между собой карт распределений  $Z_6$ , построенных по данным наблюдений в отдельные месяцы весенне-летнего сезона (рис. 4), позволяет получить качественное представление о внутригодовой изменчивости распределений прозрачности в водах залива.

В апреле (рис. 4, а) распределение  $Z_6$  было сравнительно однородным и на большей части акватории залива  $Z_6 = 10 \div 12$  м. В мае (рис. 4, б) характер его распределения заметно изменился. Более прозрачные воды были зарегистрированы в центральном ( $Z_6 = 10 \div 18$  м) и южном ( $Z_6 = 10 \div 22$  м) районах. Отметим, что эти среднемесячные распределения (особенно в апреле) заметно отличались от распределений в весенний период (см. рис. 2, б). В летний период (рис. 4, в, г) также наблюдались внутрисезонные изменения в характере распределений и в абсолютных величинах прозрачности. При этом среднемесячные распределения в июле и августе отличались от распределений в летний период (см. рис. 2, в).

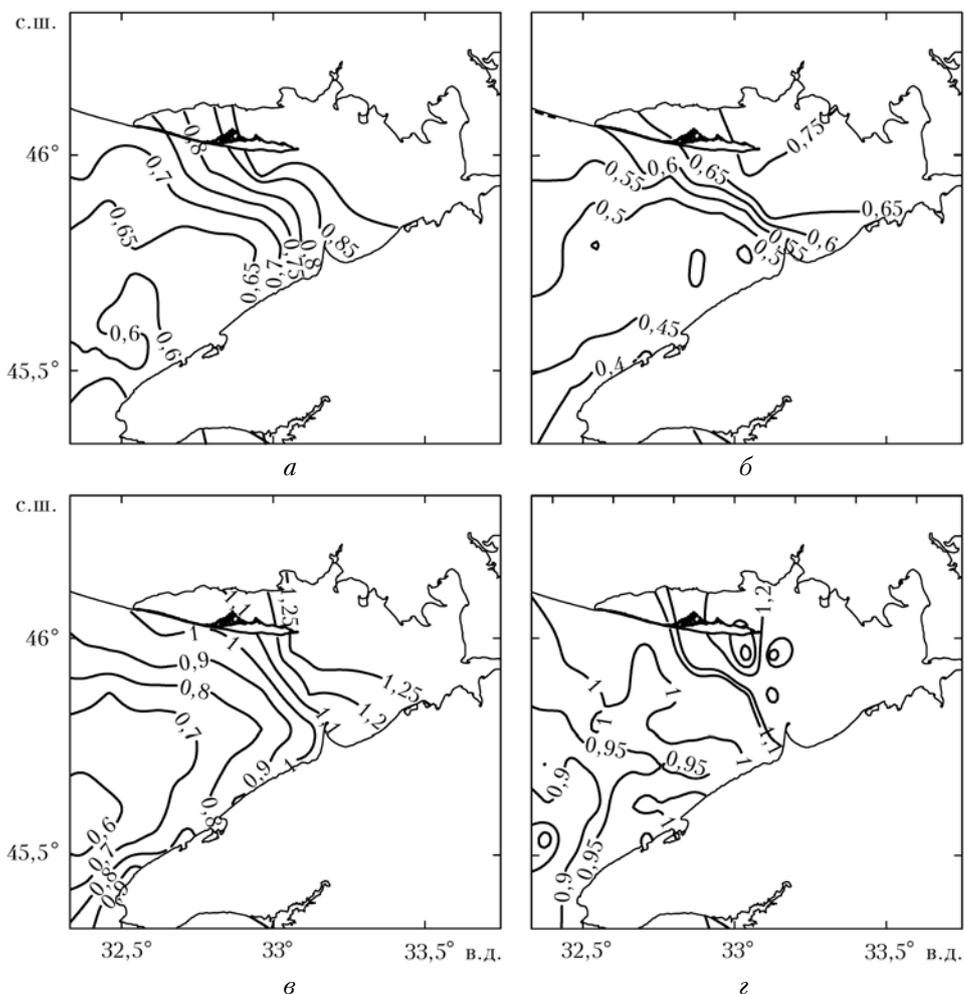


Рис. 3. Распределение концентрации хлорофилла «а»,  $\text{мг}/\text{м}^3$  (по данным сканера цвета SeaWiFS), в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды

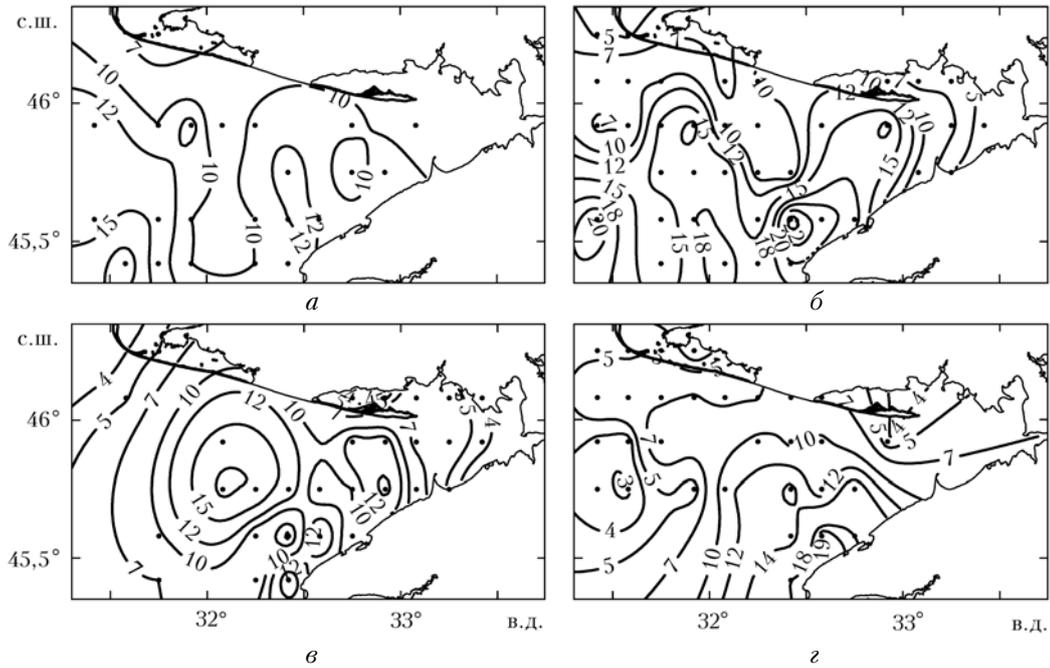


Рис. 4. Распределение глубины видимости белого диска, м, в апреле (а), мае (б), июле (в) и августе (з)

Более детальные изменения  $Z_6$  в отдельные месяцы в различных районах залива представлены на рис. 5.

Рассчитанные для каждого месяца средние значения  $Z_6$  соединены на этих графиках линиями, что

позволяет более наглядно проследить характер внутрисезонных и внутригодовых изменений значений прозрачности. Кроме того, для каждого месяца были рассчитаны среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации (табл. 2).

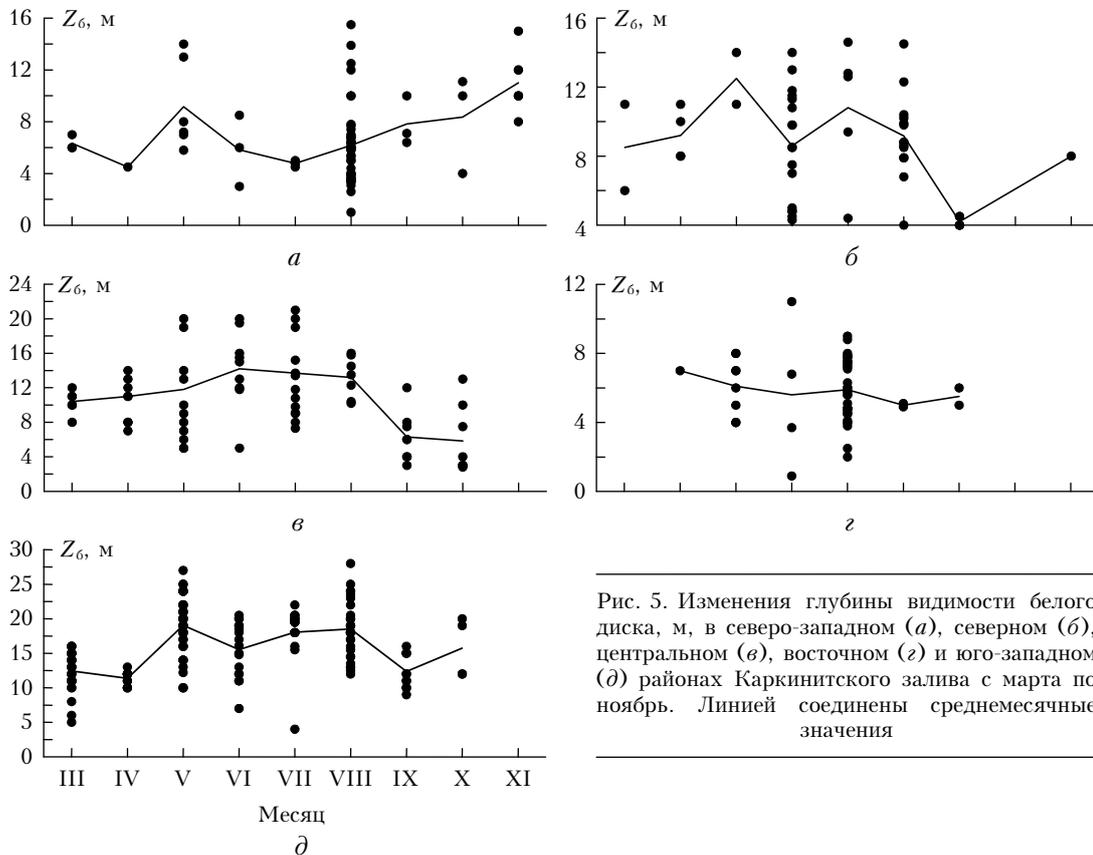


Рис. 5. Изменения глубины видимости белого диска, м, в северо-западном (а), северном (б), центральном (в), восточном (г) и юго-западном (д) районах Каркинитского залива с марта по ноябрь. Линией соединены среднемесячные значения

Таблица 2

Внутригодовые изменения диапазонов изменения (min, max, m), среднего значения (M, m), среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ , m) и коэффициента вариации (v, %) глубины видимости белого диска в различных районах Каркинитского залива

Район	Величина	Месяц								
		III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Северо-западный	min	6,0	4,5	5,8	3,0	4,5	1,0	6,4	4,0	8,0
	max	7,0	4,5	14,0	8,5	5,0	15,5	10,0	11,1	15,0
	M	6,3	4,5	9,2	5,8	4,8	6,2	7,8	8,4	11,0
	$\sigma$	0,5	—	3,1	2,2	0,2	3,0	1,6	3,1	2,1
	v	8	—	34	38	4	48	20	37	19
	n	3	1	6	3	4	42	3	3	7
Северный	min	6,0	8,0	11,5	4,3	4,4	4,0	4,0	—	—
	max	11,0	11,0	13,5	14,0	14,6	12,3	4,5	—	—
	M	8,5	9,2	12,5	8,6	10,8	9,2	4,2	—	—
	$\sigma$	2,5	1,3	1,0	3,2	3,6	2,4	0,3	—	—
	v	29	14	8	37	33	26	7	—	—
	n	2	4	2	17	5	14	5	—	—
Центральный	min	8	8	5,0	5,0	7,3	10,2	3,0	3,0	—
	max	12	14	20,0	20,0	21,0	16,0	12,0	13,0	—
	M	10,4	11	11,8	14,2	13,7	13,2	6,3	5,8	—
	$\sigma$	2	2,5	4,5	4,5	4,6	2,4	2,9	3,9	—
	v	19	23	38	31	33	18	46	67	—
	n	6	8	11	9	13	7	8	8	—
Восточный	min	—	7	4,0	0,9	2,0	4,9	5,0	—	—
	max	—	7	8,0	11,0	9,0	5,1	6,0	—	—
	M	—	7	6,1	5,6	5,9	5,0	5,5	—	—
	$\sigma$	—	—	1,5	3,8	1,7	0,1	0,5	—	—
	v	—	—	25	68	29	2	9	—	—
	n	—	1	8	4	36	2	2	—	—
Юго-западный	min	5,0	10,0	10,0	7,0	4,0	12,0	9,0	12,0	—
	max	16,0	13,0	27,0	20,5	22,0	28,0	16,0	20,0	—
	M	12,4	11,4	19,1	15,5	18,1	18,5	12,4	15,8	—
	$\sigma$	2,7	1	4,1	3,8	3,9	4,0	2,4	3,8	—
	v	22	9	22	25	21	22	19	24	—
	n	32	11	46	17	17	30	11	4	—

Примечание. n — количество станций.

Количество использованных для таких расчетов данных  $Z_6$  (станции) в одном и том же районе в различные месяцы неодинаково. Наиболее статистически были обеспечены результаты, полученные в весенний и летний периоды. Низкая обеспеченность данными в отдельные месяцы не всегда позволяла с достаточной достоверностью оценить среднюю прозрачность в эти месяцы. В то же время основные закономерности изменений прозрачности все же удавалось проследить.

Для прозрачности в районах залива, постоянно в течение года подверженных влиянию трансформированных речных вод (северо-западный район) и вод северо-западного шельфа и открытого моря (юго-западный район), характерно следующее. Относительно низкая прозрачность, наблюдаемая в северо-западном районе в весенне-летний период (исключение отмечено в мае) (рис. 5, а, табл. 2), вероятно, была связана с влиянием мутных трансформированных речных вод из Днепро-Бугского лимана, распространяющихся в этот период по северному участку северо-западного шельфа, в том числе вдоль Тендровской косы [4, 5, 9, 14]. Повышение прозрачности в осенний период, видимо, объясняется снижением объемов

стока Дуная и Южного Буга и типичными для этого сезона ветровыми условиями (северо-восточный ветер), не способствующими распространению этих вод в юго-восточном направлении.

В юго-западном районе характер внутригодовых изменений средних значений  $Z_6$  заметно отличался от такого характера изменений  $Z_6$  в северо-западном районе. На рис. 5, б (см. также табл. 2) выделяются два временных периода пониженных значений  $Z_6$  — весенний (конец марта — апрель) и раннеосенний (конец сентября — октябрь), обусловленные относительно высоким содержанием компонентов взвешенного органического вещества и хлорофилла «а» в прилегающем к этому району участку северо-западного шельфа [4, 5]. Отметим, что указанные периоды совпадают с сезонными циклами развития фитопланктона в этих районах северо-западной части моря [13].

В северном, центральном и восточном районах залива, в меньшей степени связанных водообменом с водами северо-западного шельфа, основное влияние на формирование и изменчивость поля прозрачности оказывают гидрофизические и гидробиологические процессы, происходящие непосредственно в этих районах. Поэтому для анализа изменчивости

прозрачности определенный интерес представляет совместный анализ характера внутригодовых изменений  $Z_6$  и биооптических параметров (концентрация хлорофилла «а» и показатели рассеяния и поглощения света).

В северном районе в весенний период наблюдалось повышение прозрачности с  $(8,5 \pm 2,5)$  м в конце марта до  $(12,5 \pm 1,0)$  м в мае (рис. 5, б, рис. 6, а, табл. 2).

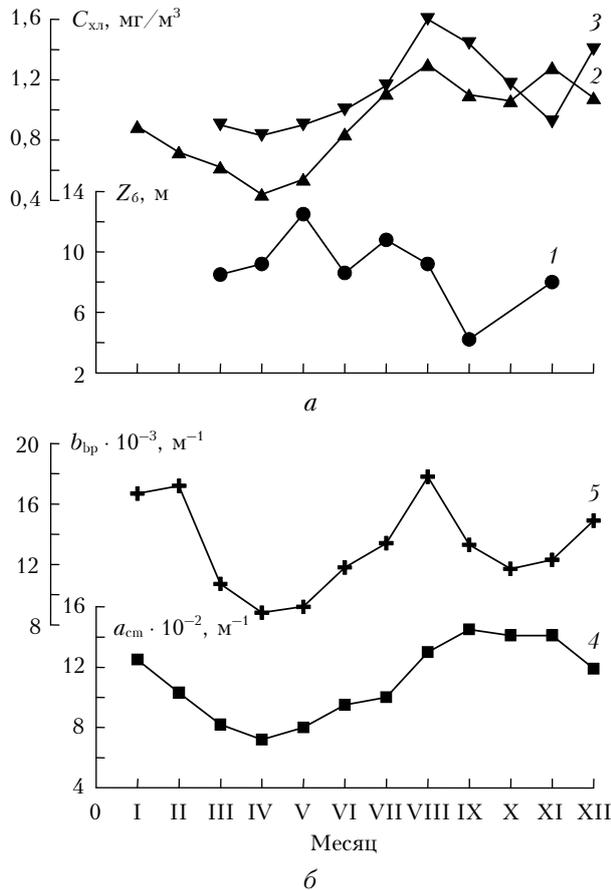


Рис. 6. Изменения среднемесячных значений глубины видимости белого диска (1), концентрации хлорофилла «а» по данным SeaWiFS (2) и CZCS (3) (а) и показателей поглощения (4) и рассеяния (5) света (б) в северном районе залива

Для спутниковых данных в этот период было характерно уменьшение как концентрации хлорофилла «а» (рис. 6, а), так и значений показателя рассеяния и поглощения света (рис. 6, б). В летний период прозрачность в этом районе понизилась до  $(4,2 \pm 0,3)$  м в сентябре (такие низкие величины  $Z_6$  получены по результатам ограниченного количества измерений в одной съемке в 1977 г. и поэтому средняя величина  $Z_6$  могла быть несколько выше). Снижение прозрачности вод в районе происходило на фоне роста концентрации хлорофилла «а» и показателей рассеяния и поглощения света.

В осенний период данных о прозрачности было недостаточно, чтобы можно было говорить о характере ее изменчивости. Судя по спутниковым данным,

значения которых осенью мало изменились по сравнению с их значениями в сентябре, можно сказать, что прозрачность в северном районе осенью была близка к 8 м, т.е. как в ноябре (см. рис. 5, б). В целом отметим хорошее соответствие характера изменчивости  $Z_6$ ,  $C_{chl}$ ,  $b_{bp}$  и  $a_{cm}$ , а именно: уменьшение концентрации хлорофилла «а» и показателей рассеяния и поглощения света приводило к повышению прозрачности и наоборот. Отметим также хорошее сходство характера изменчивости концентраций хлорофилла «а», полученных разными сканерами цвета.

Некоторые отличия в абсолютных величинах, видимо, можно объяснить следующим. Во-первых, это могло быть связано с межгодовой изменчивостью, так как данные CZCS получены в 1978–1986 гг., а данные SeaWiFS – в 1997–2009 гг. Во-вторых, данные SeaWiFS за весь период наблюдений были более регулярными и полными, в то время как данные CZCS в отдельные месяцы (особенно в зимний период) были немногочисленными или вообще отсутствовали. В-третьих, концентрация хлорофилла «а», по данным SeaWiFS (в отличие от данных CZCS), рассчитывалась по алгоритмам, учитывающим сезонные и региональные особенности ее изменчивости [12].

В центральном районе характер изменчивости  $Z_6$  и биооптических параметров, определенных по спутниковым данным, в основном был сходен с характером их изменчивости в северном районе. Так, в весенний период наблюдалось повышение прозрачности с  $(10,4 \pm 2)$  м в конце марта до  $(14,2 \pm 4,5)$  м в июне, а значения биооптических параметров в этот период уменьшались (рис. 7, см. рис. 5, в, табл. 2). Летом отмечены небольшое понижение  $Z_6$  в июле–августе до  $(13,2 \pm 2,4)$  м и резкое снижение прозрачности в сентябре  $(6,3 \pm 2,9)$  м).

Такое ее изменение происходило на фоне увеличения концентрации хлорофилла «а» и значений показателей рассеяния и поглощения света. При наблюдаемом понижении прозрачности в октябре ( $Z_6$  равен  $(5,8 \pm 3,9)$  м) значения биооптических параметров продолжали увеличиваться.

В целом при сходстве характеров изменчивости анализируемых параметров в северном и центральном районах залива отметим следующее. Значение  $Z_6$  в центральном районе было выше (весной в среднем на 25%, летом – на 40%), а содержание хлорофилла «а» было ниже (весной на 30%, летом – на 25%), чем в северном. Также были ниже в центральном районе значения показателей рассеяния (весной на 45%, летом – на 39%) и поглощения (весной на 39%, летом – на 25%).

Прозрачность в восточном районе в весенний период понижалась с 7 м в апреле до  $(5,6 \pm 4,3)$  м в июне. При повышенной прозрачности в апреле были отмечены пониженные значения  $C_{chl}$ ,  $b_{bp}$  и  $a_{cm}$  (рис. 8, см. также рис. 5, г и табл. 2).

При этом, если концентрация хлорофилла «а» в апреле в восточном районе была близка к концентрации хлорофилла «а» в северном районе при несколько большей средней прозрачности (7 м в восточном районе и 8,5 м – в северном), то значения

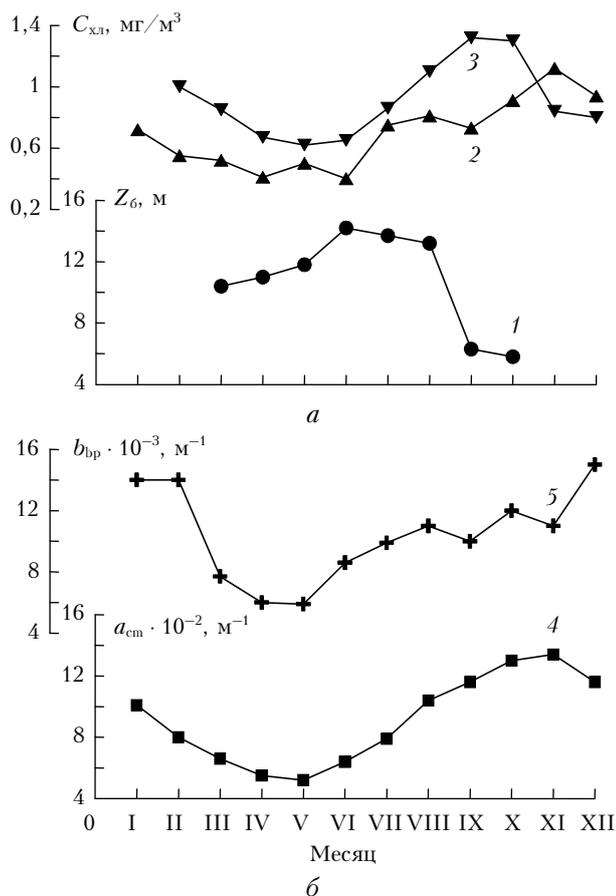


Рис. 7. Изменения среднемесячных значений глубины видимости белого диска (1), концентрации хлорофилла «а» по данным SeaWiFS (2) и CZCS (3) (а) и показателей поглощения (4) и рассеяния (5) света (б) в центральном районе залива

$b_{bp}$  более чем в 2 раза, а значения  $a_{cm}$  в 1,5 раза были выше в восточном районе. Отметим, что в весенний период значения  $b_{bp}$  в этом районе были существенно выше, чем в северном и центральном районах, и изменялись (увеличивались) весной незначительно. Показатель поглощения здесь также был заметно выше, чем в других районах, и весной он увеличивался. В летний период прозрачность в восточном районе несколько понижалась. Также немного уменьшались значения показателя рассеяния, оставаясь при этом достаточно высокими. Показатель поглощения в течение лета увеличивался, достигая максимума в сентябре (рис. 8, табл. 2). Таким образом, понижение прозрачности в весенне-летний период происходит в основном за счет увеличения концентрации хлорофилла «а» (увеличения биомассы фитопланктона) и достаточно высокого значения показателя поглощения. Низкая прозрачность связана с высокими величинами показателя обратного рассеяния света взвешенными частицами, что, видимо, было обусловлено как большим количеством клеток фитопланктона, так и взмучиванием донных осадков в мелководном восточном районе залива. В осенний период высокие значения концентрации хлорофилла «а» и показателей рассеяния и поглощения со-

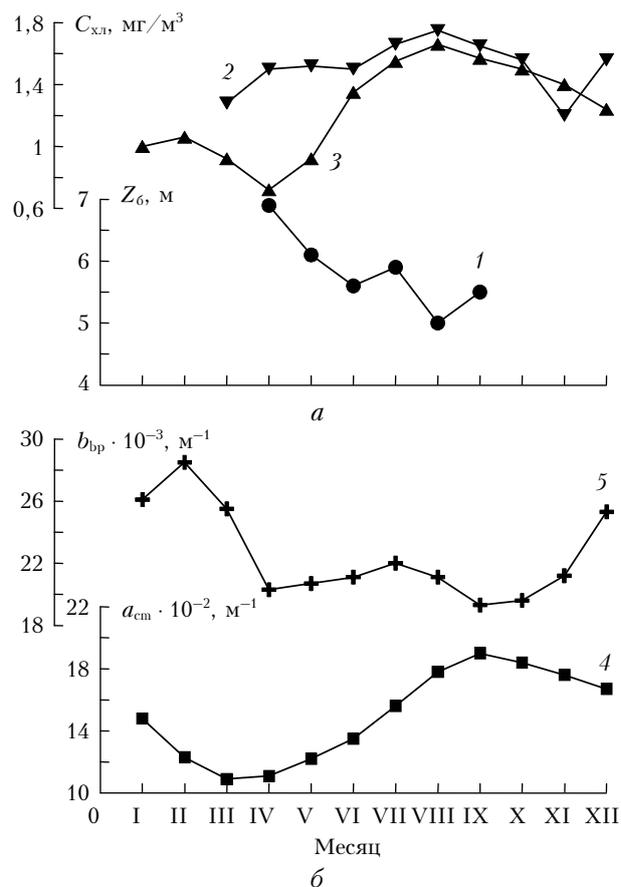


Рис. 8. Изменения среднемесячных значений глубины видимости белого диска (1), концентрации хлорофилла «а» по данным SeaWiFS (2) и CZCS (3) (а) и показателей поглощения (4) и рассеяния (5) света (б) в восточном районе залива

хранялись (рис. 8). Поэтому при отсутствии измерений  $Z_6$  можно предположить, что прозрачность оставалась низкой и не была выше 6 м.

### Заключение

По результатам проведенного анализа распределения прозрачности вод в Каркинитском заливе можно сделать следующие выводы.

В целом прозрачность вод в заливе в наиболее обеспеченный данными весенне-летний период понижалась в северном и восточном (особенно это было заметно в южной части залива) направлениях. В этих же направлениях по спутниковым данным было отмечено увеличение концентрации хлорофилла «а». Изменчивость поля прозрачности в заливе (сезонная и внутригодовая) была достаточно высокая. Это может быть объяснено влиянием на его формирование большого числа факторов (естественных и техногенных), эффективность которых усиливают небольшие размеры залива и его мелководность.

По особенностям формирования поля прозрачности в заливе выделены пять районов, для которых характерно следующее.

В северо-западном районе, наиболее подверженном влиянию распресненных вод из Днепро-Бугского

лимана, прозрачность была низкая, а ее изменчивость высокая (особенно во время половодья). Средние значения прозрачности в зимний, весенний и летний периоды были близки и равнялись 6,3–7,7 м. В осенний период прозрачность повысилась до 9,5 м.

В северном районе, менее подверженном влиянию распресненных вод, средняя прозрачность во все сезоны была достаточно низкой (8–9,1 м).

В центральном районе, в меньшей степени подверженном влиянию распресненных вод (по сравнению с северо-западным и северным районами) 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  $Z_0$  находились в пределах 10,3–12,3 м. Осенью средняя прозрачность заметно понизилась до 5,4 м.

В восточном районе, удаленном от влияния распресненных вод и имеющем очень ограниченный водообмен с северо-западным шельфом, в весенне-летний период наблюдались наиболее низкая прозрачность (весной – 6,2 м; летом – 5,5 м) и невысокая изменчивость.

В юго-западном районе, испытывающем слабое влияние распресненных вод и имеющем постоянный водообмен с восточным и юго-восточным районами северо-западного шельфа, отмечена максимальная средняя прозрачность вод, незначительно меняющаяся во все рассматриваемые сезоны (весной – 15,2 м; летом – 16,0 м; осенью – 14,4 м). При этом ее изменчивость, как и в восточном районе, была низкой.

Совместный анализ внутригодовых изменений прозрачности и биооптических параметров (концентрация хлорофилла «а», 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. В северном и центральном районах было отмечено хорошее соответствие характера изменчивости среднемесячных значений прозрачности и всех биооптических параметров. Повышение прозрачности происходило при уменьшении концентрации хлорофилла «а» и значений показателей рассеяния и поглощения света и наоборот. В восточном районе низкая прозрачность была обусловлена высокими величинами всех биооптических параметров, а ее понижение в весенне-летний период было связано в основном с увеличением концентрации хлорофилла «а» (увеличением биомассы фитопланктона) и показателя поглощения света.

#### *A.S. Kukushkin. Seasonal variability of water transparency distribution in the Karkinit Bay.*

Based on multi-year (1924–1995) observations of Secchi disc, the variability of water transparency in the Karkinit Bay is studied. According to the peculiarities of transparency field formation, five regions in the bay are distinguished, for which the estimations of seasonal and intra-annual variations of Secchi disc visibility depth are obtained. Good characteristic correspondence of seasonal and intra-annual variations of transparency and biooptical parameters (chlorophyll a concentration, particle backscattering and total absorption coefficients), which are determined according to satellite data of colour scanners CZCS (1978–1986) and SeaWiFS (1997–2009) is shown.

1. Кукушкин А.С., Агафонов Е.А., Прохоренко Ю.А. Распределение показателя ослабления направленного света в поверхностных прибрежных водах Черного моря // Морской гидрофиз. ж. 2006. № 5. С. 30–43.
2. Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Изменчивость распределения прозрачности в верхнем слое пелагиали Черного моря // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 339–344.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 430 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
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. Кукушкин А.С. Изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива // Морской гидрофиз. ж. 2009. № 2. С. 67–79.
9. Пухтяр Л.Д., Ильин Ю.П., Белокопытов В.Н. Сезонная и пространственная изменчивость термохалинной структуры вод Каркинитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 8. С. 48–63.
10. Незлин Н.П., Дьяконов В.Ю. Анализ многолетних изменений концентрации хлорофилла в поверхностном слое Черного моря по данным CZCS-радиометра // Океанология. 1998. Т. 38, № 5. С. 703–709.
11. URL: <http://blackseacolor.com>
12. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а» в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экол. ж. 2008. Т. 7, № 2. С. 24–42.
13. Берсенева Г.П. Сезонная динамика концентрации хлорофилла «а». Планктон Черного моря. Киев: Наукова думка, 1993. С. 92–109.
14. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.