

УДК 551.464(262.5)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2021 г. А. С. Кукушкин¹, *, А. В. Пархоменко², **

¹Федеральный исследовательский центр “Морской гидрофизический институт РАН”,
Севастополь, Россия

²Федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН”,
Севастополь, Россия

*e-mail: kukushkinas@mail.ru

**e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

На основе многолетних измерений концентраций взвешенного вещества (ВВ), взвешенного органического углерода, хлорофилла “а” и показателя прозрачности воды за период 1978–1998 гг., а также спутниковых измерений показателя рассеяния света за период 1998–2015 гг. получены сезонные уравнения линейной регрессии для поверхностного слоя открытой части Черного моря. С помощью этих уравнений и доступных судовых и спутниковых данных были рассчитаны сезонные концентрации ВВ, которые отличались от измеренных его концентраций в диапазоне 5–22%. Получена удовлетворительная согласованность сезонных пространственных распределений и внутригодовых изменений концентрации ВВ, определенных по измеренным и рассчитанным по судовым данным его концентрациям. Выделено несколько временных периодов межгодовой изменчивости с характерными изменениями концентрации ВВ, биомассы фитопланктона, прозрачности воды и климатических условий. Аномальные изменения структуры планктонного сообщества в конце 1980-х–начале 1990-х годов, которые совпали с климатической цикличностью, способствовали высоким значениям биомассы фитопланктона, и, как следствие, концентрации ВВ. Выявленная согласованность временных изменений концентрации ВВ и биомассы фитопланктона указывает на его важную роль в формировании поля ВВ в поверхностном слое открытой части Черного моря.

Ключевые слова: Черное море, взвешенное вещество, фитопланктон, взвешенный органический углерод, хлорофилл “а”, прозрачность воды, спутниковые наблюдения

DOI: 10.31857/S0030157421010123

ВВЕДЕНИЕ

Исследование содержания, состава и пространственного распределения взвешенного в водной толще вещества (ВВ) является одним из основных направлений в изучении процессов современного и древнего осадконакопления [15]. Количественные оценки содержания и пространственно-временной изменчивости ВВ, а также изучение механизма связей между изменениями ВВ и структурно-функциональными показателями фитопланктона (биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла “а”) и климатическими условиями имеют важное значение для понимания механизмов функционирования планктонного сообщества, формирующего и поддерживающего устойчивое состояние морской экосистемы [1, 10, 18, 27].

Сложность изучения процессов осадконакопления в Черном море определяется наличием большого количества источников поступления взвешенного (осадочного) материала. Известно, что состав ВВ в верхнем слое моря формируется за счет поступления органических и минеральных веществ из внешних источников: речные, промышленно-бытовые стоки, абразия берегов, эоловая взвесь. Наряду с внешними источниками поступления ВВ важную роль в формировании его содержания и состава (особенно в верхнем кислородсодержащем слое) ключевую роль играют биологические процессы, связанные с функционированием планктонного сообщества (образование первичной продукции за счет ассимиляции фитопланктоном растворенных форм биогенных элементов) и деструкцией взвешенного органического вещества (выедание, отмирание и биохи-

мическая трансформация зоопланктона, фито- и бактериопланктона) [16, 17, 25].

По результатам немногочисленных измерений содержания ВВ в верхнем слое Черного моря в 1960–1970-е гг. [6, 20] были получены представления о его вертикальной структуре и составе в летний период. В работах [2, 12, 13, 23] были проанализированы и описаны результаты проведенных в 1978–1995 гг. натурных измерений пространственно-временной изменчивости концентраций компонентов взвешенного органического вещества в поверхностном слое и в слое фотосинтеза открытой части моря. В работе [23] по результатам экспериментальных измерений на шельфе и глубоководном районе западной части моря в мае 1984 г. были получены оценки вклада органических и терригенных компонентов в формирование поля ВВ. В 2000-е годы в Институте океанологии РАН начали активно проводиться комплексные исследования ВВ и его вертикального потока в прибрежном и глубоководном районах в северной и северо-восточной частях моря, обобщенные в работе [7]. В этих исследованиях были получены оценки сезонной (лето, осень) изменчивости содержания ВВ, которое в открытой части моря в основном состояло из автохтонной взвеси, зависящей от видового состава фито-планктона.

Однако полученные результаты немногочисленных исследований по содержанию ВВ не позволяют получить представление о его пространственной и временной (сезонной и межгодовой) изменчивости во всей открытой части моря. Отсутствие мониторинговых исследований изменчивости содержания ВВ во многом связано с трудоемкостью получения данных о его концентрации (отбор проб воды батометрами, их фильтрация, определение состава и т.д.) и значительными временными затратами на площадные съемки для оценки его пространственного распределения. В то же время в последние десятилетия наряду с судовыми измерениями для оценок содержания ВВ [3, 28] и взвешенного органического вещества [14], биопродуктивности отдельных районов Мирового океана, в том числе Черного моря [22, 26], стали использоваться методы дистанционного зондирования морской поверхности. Эти методы, по сравнению с судовыми наблюдениями, позволили получать качественно новую информацию о морской среде по своим пространственно-временным характеристикам.

Цель настоящей работы – анализ и обобщение экспериментальных и расчетных данных, характеризующих пространственное распределение концентрации ВВ, а также исследование внутригодовой и межгодовой ее изменчивости в поверхностном слое (0–5 м) в открытой части Черного моря, ограниченной изобатой 200 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе использовали данные судовых измерений содержания ВВ (total suspended matter, TSM) из банка данных Морского гидрофизического института РАН, полученные в восьми рейсах НИС в течение 1984–1993 гг., в том числе зимой в одном рейсе (25-й рейс НИС “Профессор Водяницкий”, январь 1988 г.) на 11 станциях, весной – в трех рейсах (6-й рейс НИС “Витязь”, май 1984 г.; 41-й рейс НИС “Профессор Водяницкий” и 30-й рейс НИС “Профессор Колесников”, апрель 1993 г.) на 26 станциях, летом – в одном рейсе (12-й рейс НИС “Профессор Колесников”, сентябрь 1985 г.) на 20 станциях и осенью в трех рейсах (НИС “Михаил Ломоносов”, 51-й рейс, ноябрь 1989 г., 53-й рейс, октябрь 1990 г.; 31-й рейс НИС “Профессор Колесников”, ноябрь 1993 г.) на 97 станциях. Кроме того, привлекались экспериментальные данные, полученные Институтом океанологии РАН в июне 2005–2015 гг. в поверхностном слое (0–5 м) северо-восточной (56 станций) и в ноябре 2015, 2016 гг. и декабре 2017 г. в северной частях (15 станций) глубоководной области Черного моря [7].

Отобранные батометрами пробы морской воды фильтровали через прокаленные при температуре 450°C стекловолокнистые фильтры “Whatman” GF/F с эффективным размером пор 0.7 мкм. Концентрацию ВВ определяли весовым методом по разности в весе фильтра с осадком и без него.

Немногочисленные измеренные в поверхностном слое в отдельных районах моря концентрации ВВ не позволяли получить статистически достоверные оценки пространственно-временной ее изменчивости по всей открытой части моря. Компенсировать их отсутствие можно используя расчетный метод, основанный на корреляционных связях между одновременно измеренными концентрациями ВВ, взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и хлорофилла “а” ($C_{\text{хл}}$), показателем ослабления направленного света (ϵ) и глубиной видимости белого диска (Z_0). Также для исследования содержания ВВ оценивали возможность применения данных спутниковых сканеров цвета Sea WiFS и MODIS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). В этом качестве были использованы среднесуточные величины показателя рассеяния света назад взвешенными частицами на длине волны 555 нм ($b_{\text{бр}}$, далее показатель рассеяния света), полученные в 2005–2017 гг. Данные наблюдений сканера цвета, обработанные с использованием региональных алгоритмов [21, 29, 30], выбирались из массива спутниковых данных следующим образом. Программно в суточном (дата станции) массиве данных находились пиксель (подспутниковая точка), координаты которого совпадали с координатами станции. Значение этого пикселя использовалось в регрессионном

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие концентрацию взвешенного вещества (TSM) с концентрацией взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$), хлорофилла “а” ($C_{\text{хл}}$), глубиной видимости белого диска (Z_6), показателями ослабления (ϵ) и рассеяния света ($b_{\text{бр}}$) в поверхностном слое открытой области Черного моря

Сезон	Параметры уравнения						
	y	x	a	b	R^2/R	σ	N
Зима	TSM	$C_{\text{ВОВ}}$	0.041	0.03	0.52/0.72	0.13	27
		$C_{\text{хл}}$	0.2	0.35	0.41/0.64	0.28	30
		$Z_6/(Z_6)^{-1}$	-0.1/-	1.8	0.81/0.9	0.15	7
		$b_{\text{бр}}$	56	-0.24	0.81/0.9	0.02	6
Весна	TSM	$C_{\text{ВОВ}}$	0.053	0.1	0.77/0.88	0.11	24
		$C_{\text{хл}}$	0.9	0.12	0.41/0.64	0.07	56
		$Z_6/(Z_6)^{-1}$	-/20	-1.09	0.53/0.73	0.24	10
		$b_{\text{бр}}$	35	-	0.64/0.8	0.13	41
Лето	TSM	$C_{\text{ВОВ}}$	0.05	0.31	0.4/0.63	0.22	11
		$C_{\text{хл}}$	1.5	-0.7	0.69/0.83	0.17	25
		$Z_6/(Z_6)^{-1}$	-0.11/-	2.25	0.71/0.84	0.12	16
		$b_{\text{бр}}$	41	-0.15	0.53/0.73	0.17	65
Осень	TSM	$C_{\text{ВОВ}}$	0.036	0.38	0.42/0.65	0.22	11
		$C_{\text{хл}}$	0.6	-0.07	0.9/0.95	0.03	9
		$Z_6/(Z_6)^{-1}$	-/3.9	0.23	0.41/0.64	0.2	26
		ϵ	1.7	0.03	0.57/0.76	0.15	42
		$b_{\text{бр}}$	40	-0.11	0.86/0.93	0.04	9

Примечание. N – количество пар измеренных параметров.

анализе. В случае его отсутствия границы участка поиска расширялись на 1 км (один пиксель) по широте и долготе в обе стороны от данных координат станции. Значения попавших в этот участок пикселей усреднялись и использовались в регрессионном анализе. При отсутствии подспутниковой точки в день проведения станции процедура ее поиска продолжалась с использованием спутниковых данных, полученных в предшествующий или последующий дни.

Степень связи между переменными в линейных уравнениях регрессии вида $y = ax + b$, где, y – ВВ (TSM), x – $C_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{хл}}$, ϵ , Z_6 оценивали по коэффициенту детерминации (R^2) и корреляции (R), их достоверности (p) и стандартной ошибке регрессии (σ) [19] (табл. 1). Значения коэффициентов корреляции для приведенных зависимостей оказались достоверными при высоком уровне значимости ($p < 0.005$). Регрессионная связь между некоторыми парами параметров из табл. 1 представлена на рис. 1, 2.

Для оценки внутригодовой и межгодовой изменчивости ВВ его концентрацию, помимо измеренной, рассчитывали с помощью полученных

уравнений регрессии по данным наблюдений концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хл. “а” и оптических характеристик воды (Z_6 , ϵ) из банка данных МГИ РАН. Были использованы результаты судовых измерений концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хл. “а”, полученные в 34 экспедициях в течение 1978–1995 гг. на 309 и 1108 станциях соответственно, и спутниковых (радиометр CZCS) наблюдений концентрации хл. “а” за 1978–1986 гг. [12]. Также использовали полученные в течение 1978–1998 гг. данные 1175 измерений Z_6 и более 100 измерений ϵ [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение. Для оценки сезонных распределений содержания ВВ в поверхностном слое моря были построены карты по измеренным (1984–1993 гг.) его концентрациям (рис. 3а, в, д, ж). Для построения карт по рассчитанным концентрациям ВВ (рис. 3б, г, е, з) последние усреднялись в прямоугольниках со сторонами, равными 40’ по широте и 1° по долготе (практически это квадраты со стороной ~40 миль). Средние значения их концентраций относились к

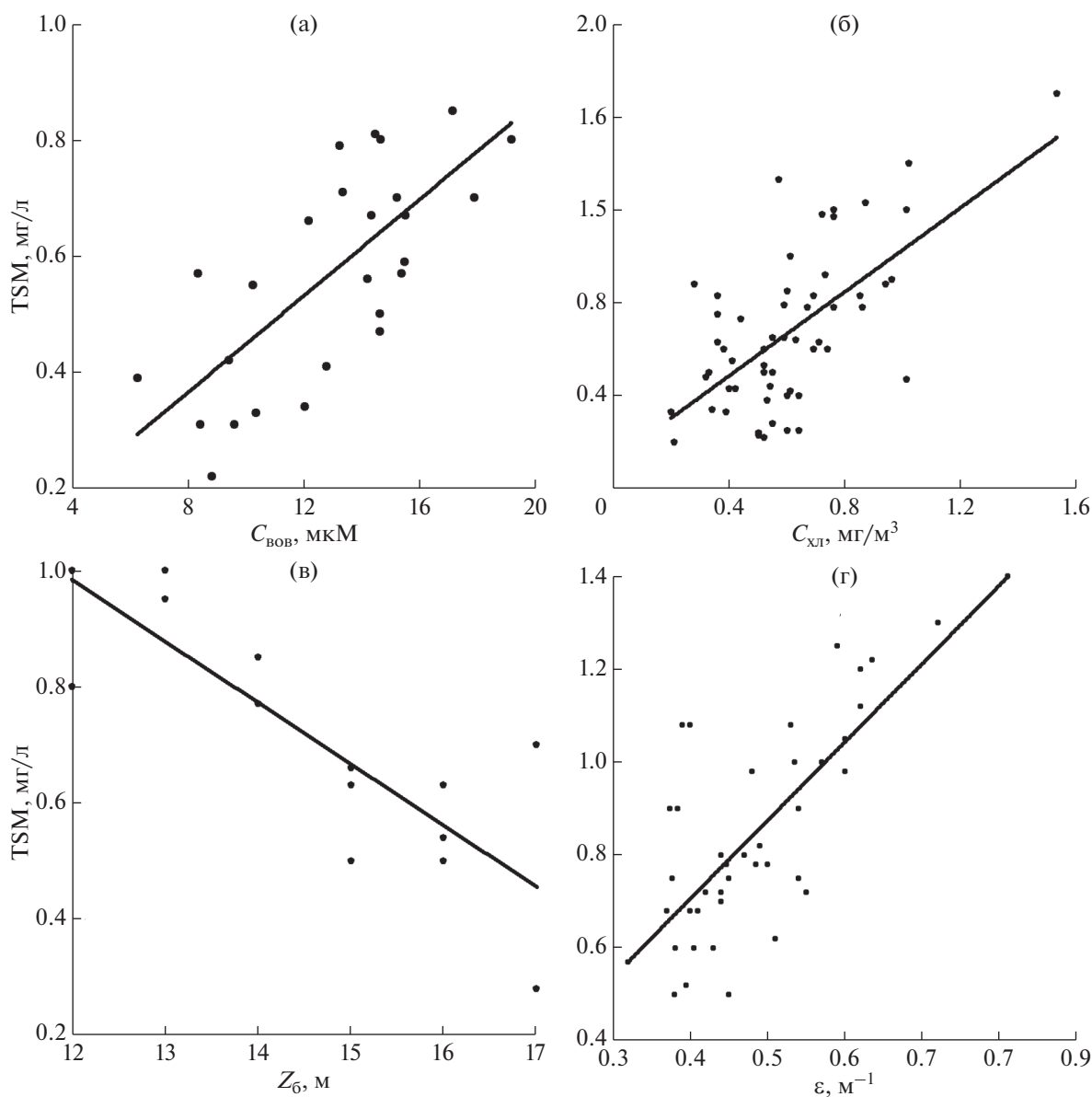


Рис. 1. Связь между концентрацией взвешенного вещества (TSM) и концентрациями взвешенного углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и хлорофилла "а" ($C_{\text{ХЛ}}$), значениями глубины видимости белого диска (Z_6) и показателя ослабления света (ϵ) в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды.

центру квадрата, в котором они вычислялись. Для расчета сезонного содержания ВВ использовались концентрации $C_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ХЛ}}$ и значения показателей прозрачности Z_6 и ϵ из банка данных Морского гидрофизического института РАН, полученные в 1980–1995 гг.

В зимний период содержание ВВ в поверхностном слое изменялась от 0.3 до 0.8 мг/л (рис. 3а). Повышенные его концентрации были зарегистрированы в северной и южной частях моря в области Основного Черноморского течения и в районе западной периферии западного циклонического круговорота (ЗЦК). Пониженное содер-

жание ВВ наблюдалось в юго-западной части моря и в районе восточной периферии ЗЦК. Представленное на рис. 3б распределение ВВ в зимний период было построено по его рассчитанным концентрациям. Расчет проводился по значениям глубины видимости белого диска (Z_6), измеренной в период квазистабильного оптического состояния моря (1955–1986 гг.) и выбранной для расчета в связи с ее хорошей обеспеченностью [11]. Приведенные на рис. 3а, б распределения ВВ в западной части моря удовлетворительно согласуются. Также удовлетворительно согласуются средние значения измеренных и рассчитанных в зимний

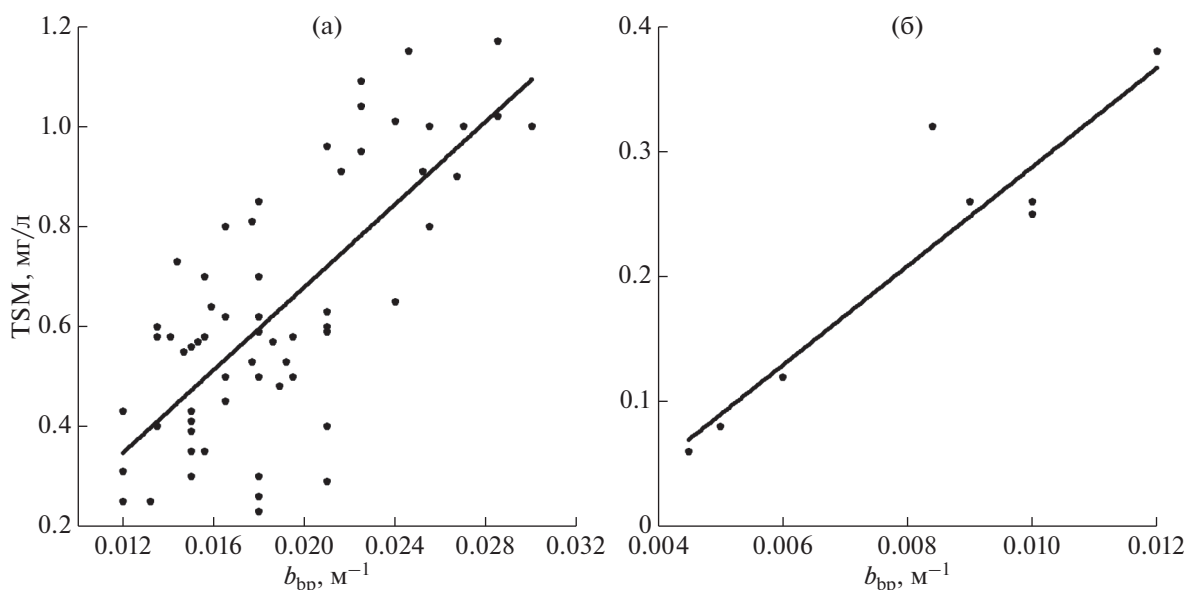


Рис. 2. Связь между измеренной концентрацией взвешенного вещества (TSM) и показателем рассеяния света (b_{bp}) в июне 2005–2015 гг. (а) и в осенний период в 2015–2017 гг. (б).

период концентраций ВВ (табл. 2), различие которых не превышало 15%.

В весенний период измеренное в западной части моря содержание ВВ (рис. 3в) увеличилось примерно в 1.4 раза по сравнению с зимним периодом, что, по-видимому, обусловлено наличием большого количества детрита в результате деградации диатомовых водорослей, массовое цветение которых обычно наблюдается в феврале–марте. По всем измеренным данным концентрация ВВ изменялась в пределах от 0.4 до 1.5 мг/л (рис. 3в). Наиболее высокие его концентрации были зарегистрированы в северо-западном районе открытой части моря и в восточном циклоническом круговороте (ВЦК). В то же время в южной части моря и в районе восточной периферии

ВЦК отмечалось понижение концентрации ВВ. Распределение рассчитанного по концентрации хлорофилла “а” (рис. 3г) содержания ВВ удовлетворительно согласуется с распределением измеренных его концентраций. Повышенные величины рассчитанных концентраций также наблюдались в северо-западном районе, пониженные – в южной и восточной частях моря. Сравнение средних значений измеренных и рассчитанных концентраций ВВ (табл. 2) показало, что их различие не превышало 11%.

В летний период средние значения концентраций ВВ практически не изменились по сравнению с весенним периодом (табл. 2). Повышенное содержание ВВ сохранилось в северо-западном районе (рис. 3д). Следует отметить, что сравнение

Таблица 2. Сезонные изменения измеренной ($TSM_{ЭКСП}$, мг/л) и рассчитанной концентрации взвешенного вещества ($TSM_{РАСЧ}$, мг/л) в поверхностном слое открытой части Черного моря

Сезон	$TSM_{ЭКСП}$	TSM , рассчитанное по			$TSM_{РАСЧ}$ среднее мг/л
		$C_{ВОВ}$	$C_{ХЛ}$	Z_6	
Зима	0.54 ± 0.2	0.61 ± 0.2	0.63 ± 0.23	–	0.62 ± 0.21
<i>N/n</i>	1/11	5/40	5/63	–	5/63
Весна	0.74 ± 0.33	0.7 ± 0.3	0.66 ± 0.28	0.62 ± 0.31	0.66 ± 0.3
<i>N/n</i>	3/26	5/42	8/60	1/10	8/70
Лето	0.75 ± 0.26	0.94 ± 0.32	0.76 ± 0.29	0.79 ± 0.16	0.81 ± 0.27
<i>N/n</i>	1/20	5/26	7/39	1/8	7/45
Осень	0.65 ± 0.22	0.72 ± 0.3	0.64 ± 0.25	0.71 ± 0.28	0.69 ± 0.28
<i>N/n</i>	3/71	5/52	9/67	1/126	9/132

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

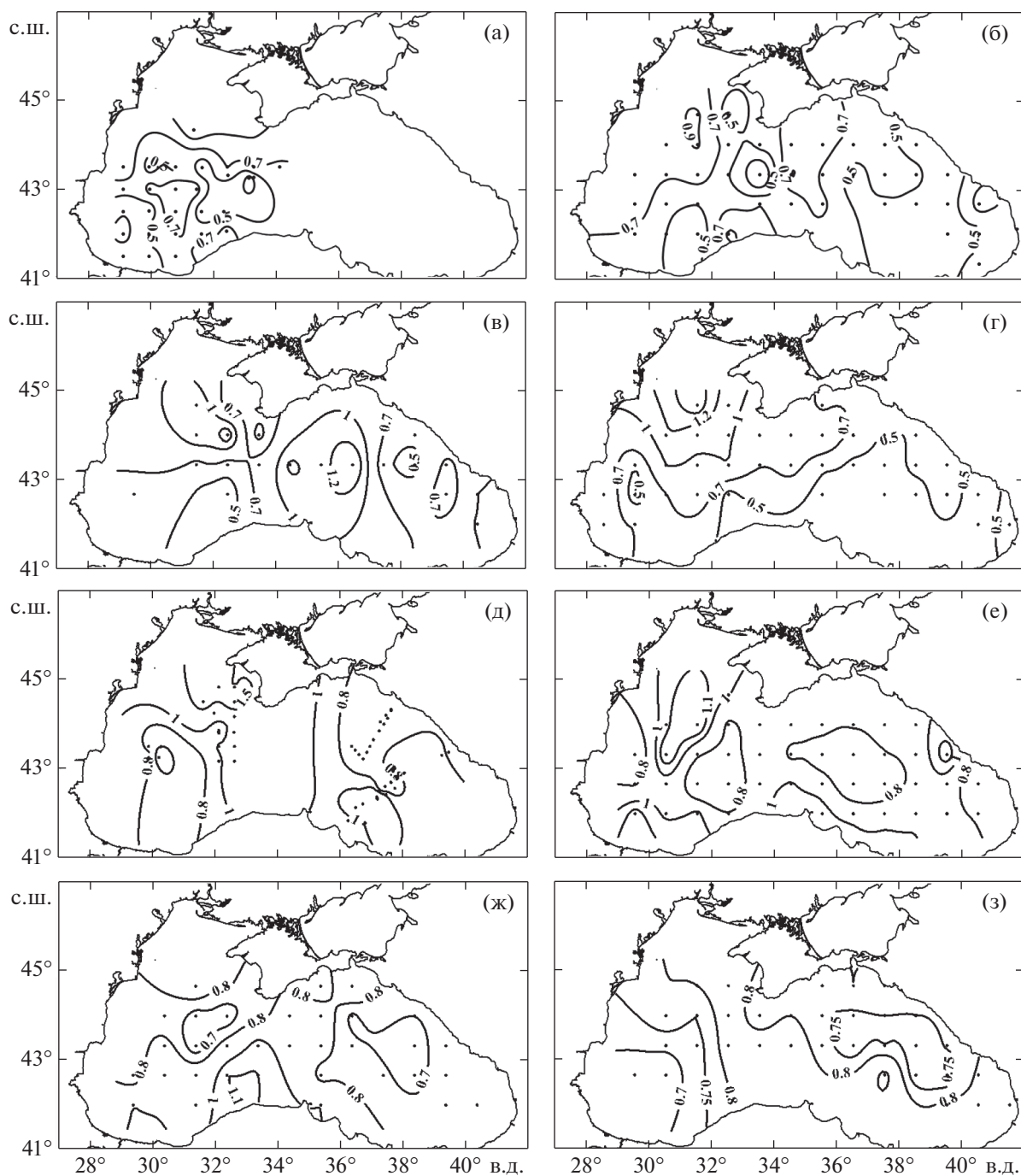


Рис. 3. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) концентраций ВВ (мг/л) в поверхностном слое моря в зимний (а, б), весенний (в, г), летний (д, е) и осенний (ж, з) периоды. Точки – станции.

его распределений в эти сезоны затруднено (особенно в восточной части моря). Это связано с пространственным несовпадением районов исследований, а также межгодовой изменчивостью концентрации ВВ, измеренной весной в апреле 1993 г., а летом – в сентябре 1985 г. и в июне 2005–2015 гг. В то же время распределение рассчитанного по значениям относительной прозрачности

содержания ВВ (рис. 3е) удовлетворительно согласуется с распределением измеренной его концентрации. Различие средних значений измеренных и рассчитанных концентраций ВВ не превышало 20%.

В осенний период усредненные по всему морю измеренные концентрации ВВ были в среднем в 1.3 раза меньше по сравнению с летним перио-

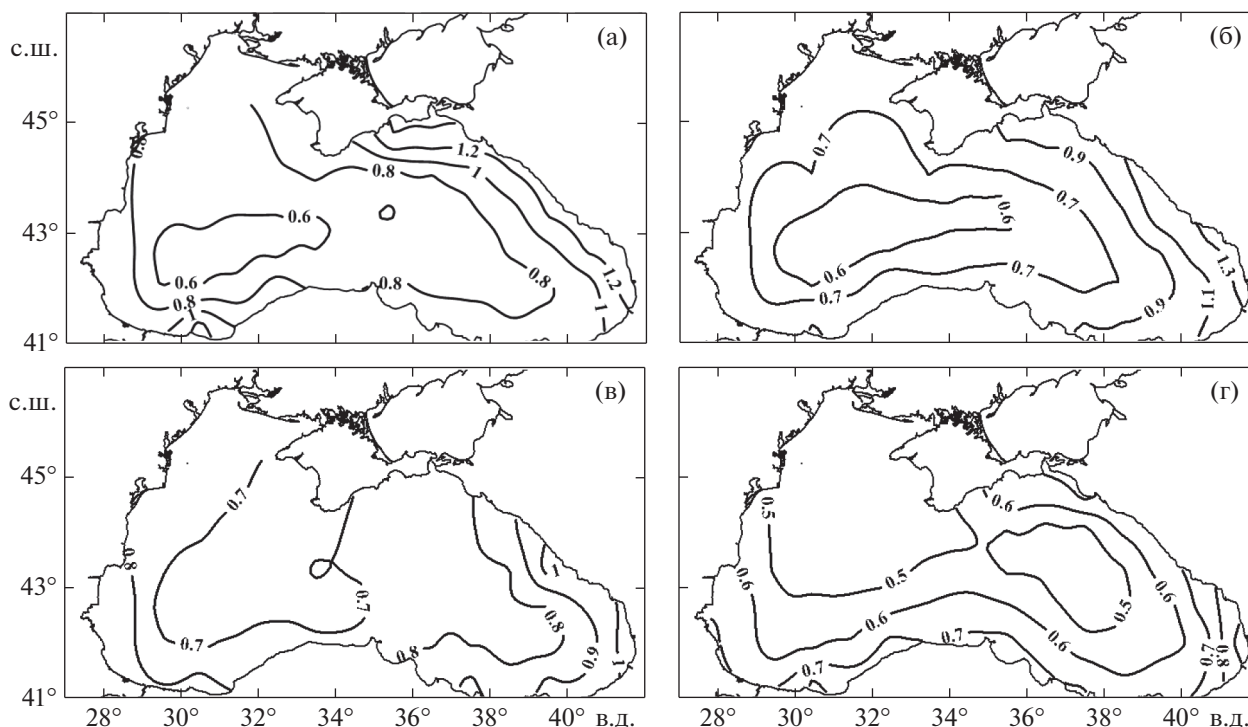


Рис. 4. Распределение рассчитанной по показателю рассеяния света концентрации ВВ (мг/л) в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды.

дом. Повышенные его концентрации были зарегистрированы в центральном, южном и северо-западном районах, а пониженные — в центральных областях ЗЦК и ВЦК (рис. 3ж). Как видно из рис. 3з, пространственное распределение концентрации ВВ, рассчитанной по показателю ослабления света, удовлетворительно согласуется с распределением измеренной его концентрации. Различия средних значений рассчитанных и измеренных концентраций ВВ не превышало 10%.

Для построения карт пространственного распределения содержания ВВ также использовали его концентрации, рассчитанные по полученным в 1998–2015 гг. спутниковым данным. На рис. 4 представлены сезонные распределения рассчитанных по показателю рассеяния света назад взвешенными частицами (b_{bp}) концентраций ВВ в открытой части моря. Сравнение распределений ВВ на рис. 3 и 4 показало, что общим для них во все сезоны являются пониженные его concentra-

ции в центральных областях ЗЦК и ВЦК. Также отметим удовлетворительное совпадение средних сезонных значений измеренных и рассчитанных концентраций ВВ (табл. 2, 3), наибольшие различия которых получены в осенне-зимний период (14–22%), а наименьшие (5–10%) — в весенне-летний период. Примерно такие же сезонные различия получены между рассчитанными концентрациями ВВ по судовым и спутниковым данным. Основным отличием является однородность и монотонность распределений содержания ВВ, рассчитанного по b_{bp} , и повышенные его концентрации в районе Кавказского побережья. Наблюдаемая однородность в распределении ВВ обеспечивается за счет усреднения большого количества данных (пространственное разрешение значений b_{bp} равно 1 км) в отличие от немногочисленных значений, измеренных и рассчитанных по другим показателям концентраций ВВ. Следует отметить относительно невысокую пространственную из-

Таблица 3. Сезонные изменения концентрации ВВ (мг/л), рассчитанной по показателю рассеяния света (b_{bp}), в поверхностном слое открытой части Черного моря

Район моря	Зима	Весна	Лето	Осень
Западная часть	0.66 ± 0.11	0.62 ± 0.07	0.68 ± 0.03	0.51 ± 0.08
Восточная часть	0.75 ± 0.1	0.75 ± 0.13	0.79 ± 0.05	0.54 ± 0.08
Все море	0.7 ± 0.1	0.69 ± 0.11	0.74 ± 0.05	0.53 ± 0.08

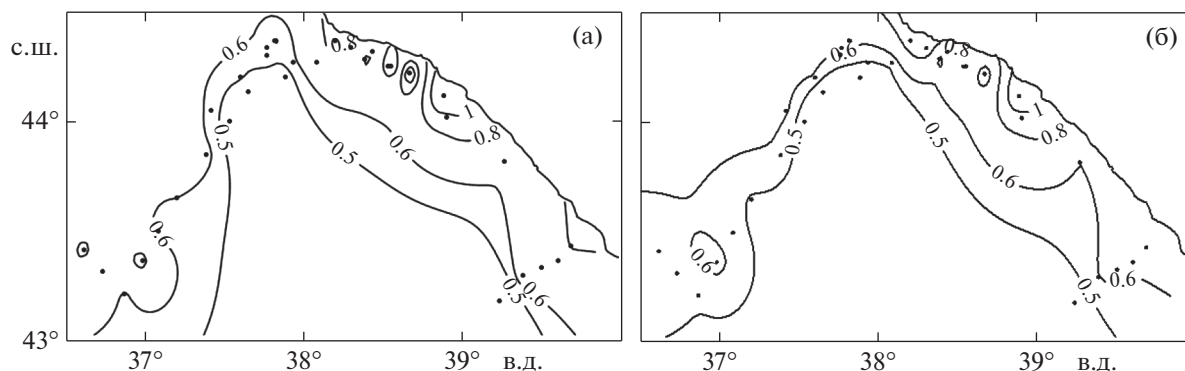


Рис. 5. Распределение измеренной (а) и рассчитанной по показателю рассеяния света (б) концентрации ВВ (мг/л) в июне 2005–2007 гг. Точки – станции.

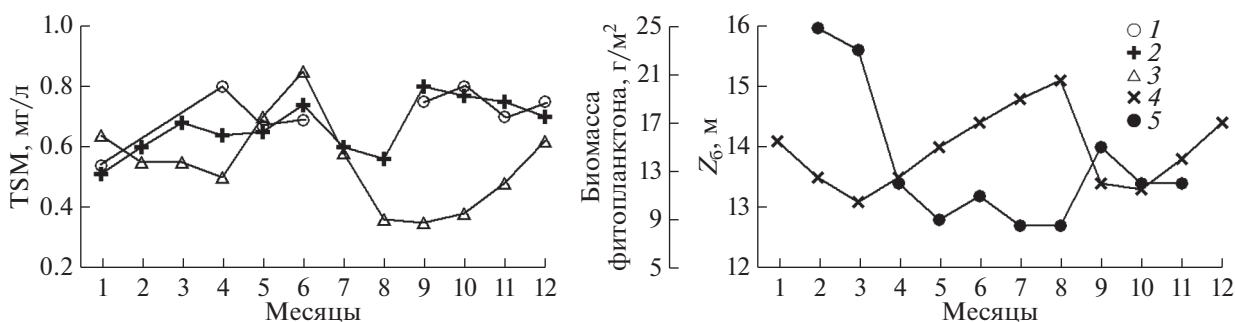


Рис. 6. Годовой ход концентрации ВВ (TSM) в поверхностном слое моря, измеренной (1) и рассчитанной по концентрациям $C_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ХЛ}}$ и значениям Z_6 (2) в 1978–1998 гг. и по $b_{\text{бр}}$ (3) в 1998–2015 гг., и значений глубины видимости белого диска Z_6 (4) и биомассы фитопланктона в слое фотосинтеза (5) в период 1978–1998 гг.

менчивость рассчитанных по $b_{\text{бр}}$ концентраций ВВ, которая может быть объяснена более низкими (в 2–6 раз) значениями среднеквадратических отклонений (табл. 3) по сравнению с такими отклонениями в табл. 2.

Отмеченные различия распределений измеренных и рассчитанных концентраций ВВ (рис. 3, 4) в определенной степени связаны с использованием полученных в различные (1980–1990-е и 2000-е гг.) временные периоды данных и наблюдаемыми в эти периоды изменениями в экосистеме Черного моря. Поэтому представляет интерес сравнить распределения измеренных в июне 2005–2007 гг. (рис. 5а) и рассчитанных по квази-одновременно полученным с помощью сканера цвета MODIS-Aqua показателям рассеяния света (рис. 5б) концентраций ВВ. Эти распределения хорошо согласуются как по характеру их пространственной изменчивости, так и по абсолютным значениям средних концентраций ВВ. По мере получения новых данных по содержанию ВВ в различные сезоны года будут уточняться параметры сезонных уравнений регрессии между ни-

ми и показателями рассеяния света, что позволит в полной мере использовать преимущества спутниковых методов исследования морской среды.

Внутригодовая изменчивость. Внутригодовые изменения измеренных и рассчитанных значений концентрации ВВ приведены на рис. 6. Расчет концентрации ВВ в отдельные месяцы каждого сезона проводили по уравнениям регрессии для соответствующего сезона (табл. 2). Эти уравнения определялись, как правило, по измеренным в одном рейсе данным (зимой – в январе, весной – в апреле, летом – в первой половине сентября, осенью – в октябре, ноябре). Поэтому рассчитанные в другие месяцы этих сезонов концентрации ВВ являются приближенными. В то же время, учитывая удовлетворительное совпадение измеренных и рассчитанных концентраций ВВ в отдельные месяцы (особенно по $C_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ХЛ}}$ и Z_6), можно предположить, что рассчитанные концентрации в другие месяцы не будут заметно отличаться от реального его содержания. Более низкие значения рассчитанных по $b_{\text{бр}}$ концентраций ВВ в августе–ноябре от измеренных и рассчитан-

ных по другим показателям в 1980–1993 гг. можно объяснить следующим. Уравнение регрессии, по которому рассчитывалось содержание ВВ, было получено по данным наблюдений ВВ [7] и b_{bp} в октябре–ноябре 2015, 2016 гг., когда измеренные концентрации ВВ, равные 0.2–0.4 мг/л, были более чем в 2 раза ниже по сравнению с ее значениями в 1980–1993 гг.

Характер внутригодовой изменчивости измеренных и рассчитанных концентраций ВВ описывается более или менее отчетливо выраженной двухвершинной кривой. Эта кривая находится в противофазе с внутригодовыми изменениями прозрачности (Z_6). На этих кривых выделяются два максимума ВВ и соответствующие им два минимума Z_6 . Первые – в весенне-раннелетний период (апрель–июнь), вторые – в позднелетний-осенний период (сентябрь–ноябрь). В летнее время и в начале зимы (январь, февраль) наблюдались пониженные значения концентрации ВВ и повышенная прозрачность. Такое удовлетворительное согласованное изменение этих показателей объяснимо – пониженная прозрачность наблюдается при повышенном содержании в морской воде взвешенных частиц. В отдельные периоды с рассмотренными внутригодовыми изменениями ВВ и Z_6 согласуются такие же изменения в развитии фитопланктона, представленные U-образной кривой изменения его биомассы (рис. 6) [9]. Повышенные ее значения в феврале, марте соответствуют повышенным значениям концентрации ВВ и пониженной прозрачности в феврале–апреле. Пониженные значения биомассы в весенне-летний период соответствуют пониженной концентрации ВВ и повышенной прозрачности летом. Относительно высокие концентрации ВВ были отмечены в мае и июне, что связано с интенсивным развитием кокколитофриды и динофлагеллят, периодически наблюдаемых в эти месяцы в Черном море [4, 24], и повышением продуктивности фитопланктона [22]. Таким образом, внутригодовая изменчивость концентрации ВВ в целом была близка к сезонной изменчивости структурных характеристик фитопланктона (биомасса, концентрация хлорофилла “а”), что указывает на его ключевую роль в формировании ВВ в открытой части моря. При этом отметим, что внутригодовая изменчивость структурных показателей фитопланктона в открытой части Черного моря от года к году может существенно изменяться. Это обусловлено, прежде всего, изменчивостью метеорологических условий, оказывающих влияние на сроки сезонной смены видового состава фитопланктона, на абсолютные значения его биомассы, количество и продолжительность ее сезонных максимумов [8, 12, 22].

Межгодовая изменчивость. Для анализа межгодовой сезонной изменчивости содержания ВВ были подготовлены массивы данных, содержащие концентрации ВВ, рассчитанные по сезонным значениям относительной прозрачности [11] и концентрации хлорофилла “а” [12], полученным в период (1978–1998 гг.), и по показателю рассеяния света в период 1998–2015 гг. Межгодовые изменения измеренных и рассчитанных концентраций ВВ приведены на рис. 7. На этом рисунке можно выделить несколько временных интервалов, различающихся по уровню содержания ВВ и характеру его изменчивости. В первом интервале (1978–1984 гг.) наблюдались теплые зимы [11, 12], относительно высокая прозрачность, повышенная зимняя температура воды и ниже средней величина биомассы фитопланктона [9], а также были отмечены пониженные концентрации ВВ в зимне-весенний период (рис. 7а, б, табл. 4). В летне-осенний период концентрация ВВ повысилась по сравнению с зимне-весенний периодом и в первой половине 1980-х годов (рис. 7в, г, табл. 4) отмечался ее рост. В эти годы в летний относительно прохладный период (температура воды была ниже климатической) после теплых зим [11] развитие фитопланктона было более интенсивным, что могло привести к увеличению концентрации ВВ.

Во втором временном интервале (1986–1993 гг.) отмечалось значительное увеличение концентрации ВВ во все сезоны. Для этого интервала характерно увеличение среднегодовой величины биомассы фитопланктона в 2–3 раза по сравнению с предыдущим периодом, заметное снижение прозрачности и зимней температуры воды. Как показано в ряде работ, значительные изменения структурно-функциональных характеристик фитопланктона в этот период времени были обусловлены, с одной стороны, изменением климатических условий [25], а с другой, изменением структуры планктонного сообщества [4]. Совпадение значительных изменений климатических условий и структуры планктонного сообщества привело к дополнительному приросту биомассы фитопланктона на протяжении года, что способствовало резкому повышению среднегодовых значений его биомассы и, как следствие, концентрации ВВ в глубоководной области моря по сравнению с другими периодами. По мнению авторов работ [4, 25], в летний период в начале 1990-х гг. основным фактором прироста биомассы фитопланктона было снижение пресса фитофагов на фитопланктон. Наблюдаемое с середины 1980-х гг. массовое развитие гребневика *Mnemiopsis leidyi* достигало максимального уровня в 1992 г. Это способствовало интенсивному выеданию гребневиком мезозoopланктона и значительному снижению его биомассы [5, 23], что закономерно уменьшило уровень выедания фито-

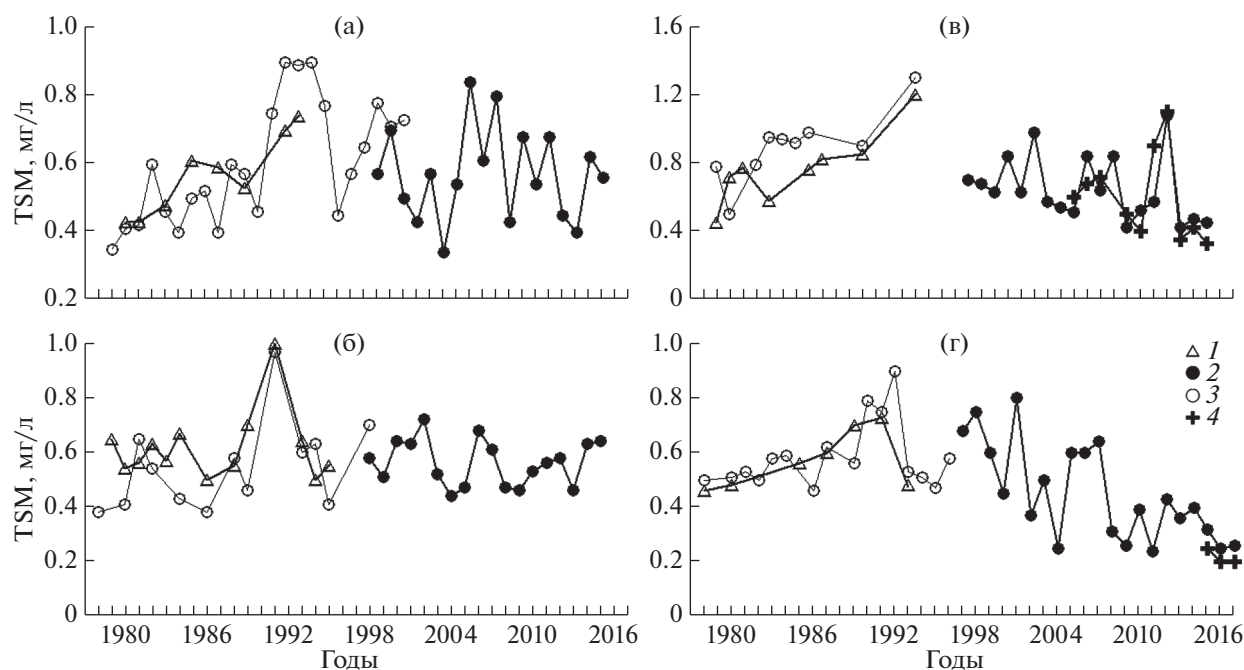


Рис. 7. Межгодовые изменения концентрации ВВ, рассчитанной по концентрации хлорофилла “а” (1), показателю рассеяния света (2), глубине видимости белого диска (3) и измеренной (4) в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды.

планктона мезозoopланктоном. Однако скорость регенерации неорганических соединений азота и фосфора планктонным сообществом, за счет огромной биомассы желетелых организмов, практически не изменялась [16, 17]. В комплексе это и способствовало дополнительному приросту

биомассы фитопланктона в летнее время в начале 1990-х гг. После 1993 г. уменьшение биомассы гребневика и увеличение количества кормового зоопланктона способствовало началу процесса восстановления экосистемы открытой части моря [4, 24]. В 1994 и 1995 гг. было отмечено сниже-

Таблица 4. Сезонные изменения концентрации ВВ (TSM), рассчитанной по Z_6 ($TSM - Z_6$), концентрации хлорофилла “а” ($TSM - C_{chl}$) и показателю рассеяния света ($TSM - b_{bp}$) в 1978–2015 гг. в глубоководной области Черного моря

Сезон	TSM, мг/л		Период							
			1978–1985	1986–1993	1994–1998	1998–2004	2005–2015	1978–1998	1998–2015	1978–2015
Зима	TSM	Z_6	0.46	0.7	0.65	–	–	0.6	–	0.6
		C_{chl}	0.49	0.64	0.5	0.51	0.54	0.56	0.53	0.55
		b_{bp}	–	–	–	0.52	0.6	–	0.57	0.57
Весна	TSM	Z_6	0.48	0.61	0.55	–	–	0.55	–	0.55
		C_{chl}	0.6	0.65	0.6	0.65	0.55	0.62	0.59	0.6
		b_{bp}	–	–	–	0.58	0.55	–	0.56	0.56
Лето	TSM	Z_6	0.84	1.1	–	–	–	0.9	–	0.9
		C_{chl}	0.63	0.9	0.47	0.52	0.45	0.7	0.48	0.6
		b_{bp}	–	–	–	0.7	0.61	–	0.65	0.65
Осень	TSM	Z_6	0.54	0.64	0.52	–	–	0.59	–	0.59
		C_{chl}	0.47	0.61	–	–	–	0.54	–	0.54
		b_{bp}	–	–	–	0.53	0.41	–	0.44	0.44

ние биомассы фитопланктона. Это, в свою очередь, повлияло на уменьшение содержания $C_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла “а” и повышение прозрачности воды, значения которых приблизились к уровню первой половины 80-х гг., а также к снижению содержания ВВ во все сезоны.

По результатам анализа межгодовых изменений концентрации ВВ, рассчитанной по показателю рассеяния света в период (1998–2015 гг.) и измеренной в северо-восточной части моря в июне (2005–2015 гг.) и северной его части осенью (2015–2017 гг.), можно выделить два интервала. В течение 1998–2004 гг. содержание ВВ в зимний, летний и осенний сезоны снижалось, а в 2005 и 2006 гг. резко возросло в 1.5–2 раза. Далее оно опять снижалось – зимой до уровня содержания ВВ в 1978–1985 гг., а летом и осенью – до минимальных его значений в течение всего рассматриваемого периода. Такие межгодовые изменения рассчитанных концентраций ВВ хорошо согласуются с изменениями их измеренных значений в летний период и абсолютными значениями в конце анализируемого периода (рис. 7в, г). В весенний период в межгодовой изменчивости содержания ВВ выраженный тренд отсутствует. Преобладающими являются примерно пятилетние волнообразные колебания, вероятнее всего связаны с циклическими изменениями климатических условий. Анализ межгодовых изменений содержания ВВ позволяет сделать вывод о важном вкладе автохтонной взвеси в формирование состава ВВ в поверхностном слое открытой части Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе многолетних судовых натуральных наблюдений концентрации взвешенного вещества, взвешенного органического углерода, хлорофилла “а” и показателей прозрачности морской воды за период 1978–1998 гг., а также спутниковых данных по рассеянию света за период 1998–2015 гг. получены сезонные уравнения линейной регрессии в поверхностном слое открытой части Черного моря.

Отмечена согласованность сезонных пространственных распределений, построенных по измеренным и рассчитанным концентрациям ВВ. Различие средних значений этих концентраций в рассматриваемый период находилось в пределах 5–22%.

Установлена удовлетворительная согласованность внутригодовых изменений измеренных и рассчитанных концентраций ВВ по судовым данным за период 1978–1998 гг. Годовой ход рассчитанных концентраций ВВ описывался двухвершинной кривой и находился в противофазе с внутригодовыми изменениями прозрачности

морской воды (Z_0). В зимний, весенний и летний сезоны отмечено удовлетворительное согласие изменений среднемесячных значений содержания ВВ и биомассы фитопланктона. Отличия характера внутригодовых изменений концентраций ВВ, рассчитанных по показателю рассеяния света и по другим параметрам, связаны с недостаточной обеспеченностью одновременно полученных судовых и спутниковых данных в 2000-е гг.

Межгодовая изменчивость содержания ВВ в основном была связана с изменениями климатических условий, которые оказывали влияние на интенсивность развития фитопланктона (уровень ПП, биомассы фитопланктона и хлорофилла “а”) и прозрачность морской воды. Выделено несколько временных периодов межгодовой изменчивости с характерными изменениями концентрации ВВ, биомассы фитопланктона, прозрачности воды и климатических условий. Аномальные изменения структуры планктонного сообщества в конце 1980-х–начале 1990-х гг., совпавшие с климатической циклическостью, способствовали высоким значениям первичной продукции и биомассы фитопланктона, и, как следствие, повышению концентраций ВВ.

Выявленная согласованность временных изменений концентрации ВВ и биомассы фитопланктона указывает на его важную роль в формировании поля ВВ в поверхностном слое в открытой части Черного моря.

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за доброжелательное и конструктивное замечание по содержанию статьи.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: № 0827-2019-0001 “Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата”; № 0828-2019-0003 (АААА-А18-118021490093-4) “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
2. Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Коновалов С.К. Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря // Морской гидрофизический журн. 1998. № 5. С. 30–62.
3. Вазюля С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Артемьев В.А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного

- излучения в водах Белого и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 31–41.
4. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. Зацепин А.Г., Флинт М.В. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
 5. *Виноградов М.Е., Шушкина Э.А.* Временные изменения структуры зооценоа открытых районов Черного моря // Океанология. 1992. Т. 32. № 4. С. 709–717.
 6. *Емельянов Е.М.* Некоторые данные по взвеси Черного и Азовского морей // Океанология. 1968. Т. 2. Вып. 4. С. 664–672.
 7. *Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Лисицын А.П. и др.* Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества глубоководной части в Черном море // Система Черного моря. М.: Научный мир, 2018. С. 350–397.
 8. *Ковалева И.В.* Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла а и первичной продукции в глубоководной части Черного моря // Гидробиологический журн. 2014. Т. 50. № 3. С. 5–24.
 9. *Кривенко О.В., Пархоменко А.В.* Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. // Морск. эколог. журн. 2010. Т. 9. № 4. С. 5–24.
 10. *Кривенко О.В., Пархоменко А.В.* Восходящий и регенерационный потоки неорганических соединений азота и фосфора в глубоководной области Черного моря // Журн. общей биологии. 2014. Т. 75. № 5. С. 294–308.
 11. *Кукушкин А.С.* Многолетняя сезонная изменчивость прозрачности вод в поверхностном слое глубоководной части Черного моря // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 63–75.
 12. *Кукушкин А.С.* Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в верхнем слое в глубоководной части Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 646–658.
 13. *Кукушкин А.С., Пархоменко А.В.* Изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое глубоководной части Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 252–261.
 14. *Кукушкин А.С., Пархоменко А.В.* Оценка применимости спутниковых данных для исследования изменчивости содержания взвешенного органического вещества в поверхностном слое Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 195–205.
 15. *Лисицын А.П.* Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 270 с.
 16. *Пархоменко А.В.* Экскреция фосфора зоопланктоном в открытой части Черного моря // Морск. эколог. журн. 2005. Т. 4. № 4. С. 17–32.
 17. *Пархоменко А.В.* Численные оценки регенерационного потока азота в открытой части Черного моря // Морск. эколог. журн. 2007. Т. 6. № 2. С. 79–90.
 18. *Романкевич Е.А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
 19. *Румшинский Л.З.* Элементы теории вероятности. М.: Наука, 1970. 256 с.
 20. *Тримонис Э.С., Шимкус К.М.* Количественное распределение взвеси в Черном море // Океанология. 1976. Т. 16. Вып. 4. С. 648–654.
 21. *Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS // Морск. эколог. журн. 2009. Т. VIII. № 1. С. 81–106.
 22. *Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 6. С. 845–848.
 23. *Vostokov S.V.* Suspended matter as an index of productivity in the Western Black Sea (application for productivity and entrophication control) // Sensivity to change: Black Sea, Baltic Sea and Nord Sea / Ozsoy E., Mikaelyan A. (Eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 211–221.
 24. *Kideys A.E., Gordina A.D., Niermann U. et al.* Distribution of eggs and larvae of anchovy with respect to ambient conditions in southern Black Sea during 1993 and 1996 // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea / Ivanov L.I., Oguz T. (Eds.). Dordrecht: Cluwer Academic Publishers, 1998. V. 1. P. 189–198.
 25. *Mikaelyan A.S.* Longtime variability in phytoplankton communities in the open Black Sea in relation to environmental changes // Sensivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / Ozsoy E., Mikaelyan A. (Eds.). Dordrecht: Cluwer Academic Publishers, 1997. P. 105–116.
 26. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep-Sea Research II. 2004. V. 51. P. 1063–1091.
 27. *Parkhomenko A.V.* Phosphorus Fluxes in the Pelagic Zone of the Black Sea // Diversity in Coastal Marine Sciences. Coastal Research Library. V. 23 / Finkl Ch.W., Makowski Ch. (Eds.). Springer, 2018. P. 337–356.
 28. *Suetin V.S., Korolev S.N.* Estimating Specific Features of the Optical Property Variability in the Black Sea Waters Using the Data of SeaWiFS and MODIS Satellite Instruments // Physical Oceanography. 2018. V. 25. № 4. P. 330–340.
 29. *Suslin V.V., Churilova T.Ya.* A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll *a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // International J. of Remote Sensing. 2016. V. 37. № 18. P. 4380–4400.
 30. *Suslin V., Pryahina S., Churilova T., Slabakova V.* The Black Sea iops based on Sea WiFS data // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. P. 1003531.

Spatio-Temporal Variability of Suspended Matter in the Surface Layer of the Open Part of the Black Sea

A. S. Kukushkin^{a, #}, A. V. Parkhomenko^{b, ##}

^a*Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Centre Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

^b*Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Centre Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

[#]*e-mail: kukushkinas@mail.ru,*

^{##}*e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua*

Based on long-term measurements of the concentration of total suspended matter (TSM), suspended organic carbon, chlorophyll “a”, and water transparency index for the period 1978–1998, as well as satellite measurements of light scattering coefficient for the period 1998–2015, seasonal equations of linear regression for the surface layer of the open part of the Black Sea are obtained. Using these equations and available ship and satellite data, seasonal concentrations of TSM that were differed from its measured concentrations in the range of 5–22% were calculated. Satisfactory agreement was obtained between seasonal spatial distributions and intra-annual changes in the concentrations of TSM, determined from measured and calculated concentrations according to ship data. Several time periods of interannual variability with characteristic changes in the concentration of TSM, phytoplankton biomass, water transparency and climate conditions were identified. Anomalous changes in the structure of the plankton community in the late 1980 and early 1990, which coinciding with climatic cycles, contributed to the high biomass of phytoplankton, and, as a consequence, the concentration of TSM. The revealed consistency of temporary changes in the concentration of TSM and phytoplankton biomass indicates its important role in the formation of the field TSM in the surface layer in the open part of the Black Sea.

Keywords: Black Sea, suspended particulate matter, phytoplankton, particulate organic carbon, chlorophyll “a”, water transparency, satellite data