Оценка применимости спутниковых данных для исследования изменчивости содержания взвешенного органического вещества в поверхностном слое Чёрного моря

А. С. Кукушкин¹, А. В. Пархоменко²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*

² *Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН*

Севастополь, 299011, Россия

E-mail: kukushkinas@mail.ru

В работе оценивается возможность использования спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* для исследования изменчивости содержания компонентов взвешенного органического вещества (ВОВ) в поверхностном слое Чёрного моря. Проведено сравнение результатов одновременных судовых и спутниковых (сканеры CZCS, SeaWiFS) наблюдений концентрации хлорофилла *a*, выполненных в разные сезоны в различных районах глубоководной и шельфовой частях Чёрного моря. Высокая корреляция между этими концентрациями и близкие их значения (различие 5–20 %) свидетельствуют о хорошем согласии измеренной и рассчитанной концентраций хлорофилла *a*. На основании архивных данных по содержанию компонентов ВОВ (взвешенный органический углерод, азот, фосфор) и судовых измерений концентрации хлорофилла *a* получены сезонные уравнения регрессии между этими показателями, одновременно измеренными в поверхностном слое глубоководной и северо-западной (шельфовой) частях моря. С использованием этих уравнений и доступного массива спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* рассчитаны сезонные значения концентрации компонентов ВОВ. Приведены примеры применения рассчитанных данных для исследования пространственной и межгодовой изменчивости этих компонентов.

Ключевые слова: концентрация хлорофилла *a*, взвешенное органическое вещество, судовые и спутниковые данные, уравнения регрессии, корреляция, Чёрное море

Одобрена к печати: 25.09.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-195-205

Введение

Для понимания процессов, формирующих и поддерживающих устойчивое функционирование морских экосистем, необходимы исследования пространственно-временной изменчивости содержания взвешенного органического вещества (ВОВ) и отдельных его компонентов. Эти исследования, а также изучение механизма связи между длительными изменениями климатических условий, компонентами ВОВ и другими структурно-функциональными показателями фитопланктона позволяют оценить и прогнозировать экологическое состояние морской экосистемы.

Основной объём экспериментальных данных по содержанию компонентов ВОВ в Чёрном море был получен в период 1978–1995 гг. и проанализирован в работах (Бурлакова и др., 1998; Востоков, 1996; Кукушкин, 2013, 2014; Кукушкин, Пархоменко, 2015). В этих статьях отмечалась хорошая согласованность сезонных и межгодовых изменений концентрации взвешенного органического углерода и хлорофилла *a*, являющегося основным фотосинтетически активным пигментом фитопланктона и показателем его биомассы, что подтверждало важную роль фитопланктона, как главного продуцента ВОВ.

В последние 20 лет комплексные измерения содержания компонентов ВОВ практически не проводились. В то же время в этот период наряду с морскими экспедиционными исследованиями широко стали использоваться методы дистанционного зондирования морской

поверхности. Спутниковые измерения восходящего от морской поверхности излучения с помощью сканеров цвета (CZCS, SeaWiFS, MODIS), по сравнению с судовыми наблюдениями, позволили получать качественно новую информацию о морской среде по своим пространственно-временным характеристикам. Полученные спутниковые данные о биооптических параметрах морской среды (показатели поглощения, рассеяния и ослабления света в воде, концентрация хлорофилла a и др.) использовались для оценок биопродуктивности отдельных районов Мирового океана, в том числе и Чёрного моря (Незлин, Дьяконов, 1998; Финенко и др., 2010; Kopelevich et al., 2002, 2004).

Целью настоящей работы является оценка применимости концентрации хлорофилла a , рассчитанной по спутниковым наблюдениям, для исследования пространственно-временной изменчивости распределения содержания компонентов БОВ в глубоководных и шельфовых районах Чёрного моря.

Материалы и методы

В работе использовались данные судовых измерений концентрации взвешенного органического углерода ($C_{\text{БОВ}}$), азота ($N_{\text{БОВ}}$), фосфора ($P_{\text{БОВ}}$) и хлорофилла a ($C_{\text{ХЛ}}$) из банка данных Морского гидрофизического института РАН и отдела физиологии водорослей Института морских биологических исследований РАН. Для анализа также использовались значения концентрации хлорофилла a (усреднённые за сутки, восемь дней и две недели), полученные по результатам наблюдений сканера цвета CZCS за 1978–1986 гг. (данные были любезно переданы авторам В. В. Суслиным) и SeaWiFS за 1998–2010 гг. (<http://blackseacolor.com>). Данные наблюдений сканеров цвета были обработаны с использованием региональных алгоритмов, полученных при сопоставлении спутниковых и судовых данных и учитывающих особенности вод Чёрного моря (Суетин и др., 2000; Суслин и др., 2008; Suslin, Churilova, 2016).

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие концентрацию взвешенного органического углерода ($C_{\text{БОВ}}$, мкм), азота ($N_{\text{БОВ}}$, мкм) и фосфора ($P_{\text{БОВ}}$, мкм) с концентрацией хлорофилла a ($C_{\text{ХЛ}}$, мг/м³) в поверхностном слое в глубоководной и северо-западной (шельфовой) частях Чёрного моря (СЗЧМ)

Параметры уравнения			Глубоководная часть				СЗЧМ			
y	x		Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
$C_{\text{БОВ}}$	$C_{\text{ХЛ}}$	a	2,8	13,4	25,5	12,5	4,6	8,6	13,2	7,8
		b	10	8,6	7,4	3,6	4,8	13,8	13,5	3,3
		r	0,7	0,67	0,68	0,64	0,91	0,88	0,85	0,69
		s	2,6	4,7	2,1	3,4	2,4	13,7	8,7	1,9
		N	67	51	46	75	20	60	76	46
$N_{\text{БОВ}}$	$C_{\text{ХЛ}}$	a	0,4	3,65	3,75	–0,59	–	–	–	–
		b	1,04	0,75	0,84	1,7	–	–	–	–
		r	0,69	0,84	0,93	0,2	–	–	–	–
		s	0,43	0,79	0,62	0,5	–	–	–	–
		N	21	16	10	12	–	–	–	–
$P_{\text{БОВ}}$	$C_{\text{ХЛ}}$	a	0,024	0,082	0,11	0,043	0,023	0,079	0,086	0,096
		b	0,014	0,024	0,012	0,018	0,01	0,016	0,049	0,023
		r	0,76	0,7	0,96	0,73	0,96	0,8	0,91	0,92
		s	0,018	0,029	0,013	0,004	0,009	0,035	0,045	0,04
		N	88	59	14	24	12	76	28	47

N — число пар параметров

Для расчётов концентрации $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ по концентрации хлорофилла a были получены уравнения линейной регрессии вида $y = ax + b$ между этими показателями, одновременно измеренными в поверхностном слое моря. Степень связи между выбранными N парами $C_{\text{ВОВ}}$ ($N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$) и $C_{\text{ХЛ}}$ оценивалась по коэффициенту корреляции (r) и стационарной ошибке регрессии (σ) (Румшинский, 1970). Параметры сезонных уравнений регрессии представлены в *табл. 1* (см. с. 196).

Результаты

Сравнение измеренной и полученной по спутниковым наблюдениям концентрации хлорофилла a

Использование в работе спутниковых данных по концентрации хлорофилла a , рассчитанных по отмеченным выше региональным алгоритмам, предполагает удовлетворительное их совпадение с реальной концентрацией. В то же время нам неизвестны результаты сравнения (количественные оценки связи) рассчитанной по спутниковым наблюдениям концентрации хлорофилла a с одновременно измеренной его концентрацией в различных районах моря.

Для такого сопоставления использовали результаты одновременных или близких по времени проведения судовых и спутниковых наблюдений. Спутниковые данные выбирали на участках моря с координатами, совпадающими с координатами станций судовых измерений. Для сравнения с результатами спутниковых наблюдений (сканер CZCS) были выбраны концентрации хлорофилла a , полученные в августе 1980 г. (9-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») в районе западного шельфа и в ноябре 1980 г. (23-й рейс НИС «Академик Вернадский») в глубоководной части моря (*рис. 1*).

Высокие значения коэффициента корреляции (0,96–0,98), полученные в этих районах моря, свидетельствуют о близости значений концентрации хлорофилла a , определённых по данным судовых и спутниковых наблюдений. Наибольшее различие измеренной и рассчитанной (спутниковой) концентрациями, составившее примерно 20 %, было отмечено в районе Болгарского побережья. В глубоководной части моря это различие не превышало 15 %.

Рис. 1. Связь между измеренными ($C_{\text{ХЛ ЭКСП}}$) и полученными с помощью сканера цвета CZCS ($C_{\text{ХЛ CZCS}}$) концентрациями хлорофилла a в шельфовой зоне Болгарии (1) и в центральном районе СЗЧМ (2) в августе 1980 г. (а), а также в западной (3) и восточной (4) глубоководных частях моря в ноябре 1980 г. (б)

Рис. 2. Связь между измеренной ($C_{\text{ХЛ ЭКСП}}$) и рассчитанной по данным сканера цвета SeaWiFS ($C_{\text{ХЛ SW}}$) концентрациями хлорофилла *a* в северо-восточной части моря в сентябре (1) и октябре (2) 1999 г. (а); в области западной халистатики (3) и районе материкового склона юго-западнее Крыма (4) в течение февраля 1998 – мая 2000 г. (б)

Рис. 3. Сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* по данным судовых (1) и спутниковых (2) наблюдений в области западной халистатики (а) и в районе материкового склона (б)

Для сравнения результатов судовых измерений и рассчитанных по данным сканера SeaWiFS были выбраны данные, полученные в северо-восточной глубоководной части моря в период 25–30 сентября и 25–28 октября 1999 г. (Востоков и др., 2002). Кроме того, для сравнения были использованы результаты измерений концентрации хлорофилла *a* в центральной области западной халистатики и в районе материкового склона юго-западнее Крыма, полученные на НИС «Профессор Водяницкий» в первой и второй половинах каждого месяца года в период с февраля 1998 г. по май 2000 г. (Берсенева и др., 2004). Результаты оценки связи между исследуемыми показателями представлены на *рис. 2* (см. с. 198). В северо-восточной части моря (см. *рис. 2a*) коэффициент корреляции между измеренной и рассчитанной концентрациями хлорофилла *a* был высоким и составлял 0,93. Различие значений этих концентраций не превышало 8 %. В западной части глубоководной области моря также была выявлена достаточно тесная связь между судовыми и спутниковыми данными (см. *рис. 2б*). Коэффициент корреляции, определённый в центре западной халистатики по сезонным значениям и по всему массиву данных, был равен 0,94–0,96.

Сравнение концентраций хлорофилла *a*, полученных в районе материкового склона, показало следующее: в зимний период коэффициент корреляции был высоким (0,96), в летне-осенний он понизился до 0,8–0,83 и наименьшее значение, равное 0,7, было получено в весенний период. Наглядно изменение судовых и спутниковых значений концентрации хлорофилла *a* в обоих районах моря показано на *рис. 3* (см. с. 198). При этом различие значений их концентраций в области халистатики во все сезоны не превышало 10 %, в районе материкового склона это различие в весенне-осенний период находилось в пределах 10–18 %, в зимний — 5 %.

Таким образом, можно считать, что концентрация хлорофилла *a*, рассчитанная по данным сканеров цвета CZCS и SeaWiFS, хорошо согласуется с данными судовых измерений на различных временных масштабах.

Примеры использования рассчитанных концентраций компонентов ВОВ для оценки изменчивости их распределений

Используя полученные сезонные уравнения регрессии, связывающие концентрацию компонентов ВОВ с концентрацией хлорофилла *a* (см. *табл. 1*), и доступный массив спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* можно рассчитать сезонные значения их концентраций в заданном районе моря. Полученные массивы данных позволяют составить представление о пространственной изменчивости распределения этих компонентов в годовом цикле, а также об их сезонной и межгодовой изменчивости.

Приведём примеры использования рассчитанной по предложенной методике концентрации компонентов ВОВ ($C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$) в различных районах Чёрного моря.

На *рис. 4* (см. с. 200) показано сезонное пространственное распределение содержания $C_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое СЗЧМ, построенное по данным натурных наблюдений и по рассчитанным данным (сканер CZCS). Сравнение этих распределений $C_{\text{ВОВ}}$ в целом показало хорошее их совпадение. Наблюдаемые в осенний и зимний периоды различия, видимо, связаны с неодинаковым количеством использованных для построения карт данных (натурных данных значительно меньше рассчитанных), а также с неодновременностью их определения. Вероятно, это также повлияло на некоторые различия и в сезонных значениях концентрации $C_{\text{ВОВ}}$ (*табл. 2*, см. с. 201), полученных в дунайском районе (на юге он ограничен 44°30' с. ш., на востоке — 30°30' в. д.) и в центральном районе (координаты его границ — 44°30'–45°50' с. ш., 30°30'–32° в. д.).

Достаточно протяжённый ряд судовых и спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* (1979–2010) позволяет рассчитать концентрации компонентов ВОВ, используя регрессионные уравнения (см. *табл. 1*), и проследить их межгодовые сезонные изменения. На *рис. 5* (см. с. 201) приведены изменения аномалий (отклонения от средних многолетних значений, нормированные на средние квадратичные отклонения) концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ в зимний и весенний периоды.

Рис. 4. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) значений концентрации C_{BOB} (мкМ) в зимний (а, б), весенний (в, г), летний (д, е) и осенний (ж, з) периоды в СЗЧМ. Точки — станции

Полученные значения концентрации компонентов ВОВ также позволили рассчитать атомарные отношения компонентов C/N и C/P , которые характеризуют степень деструкции ВОВ.

Таблица 2. Сезонные изменения измеренной ($C_{\text{ВОВ ЭКСП}}$) и рассчитанной по $C_{\text{ХЛ}}$ ($C_{\text{ВОВ CZCS}}$) концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое в дунайском и центральном районах СЗЧМ

Район	Параметр	Сезон			
		Зима	Весна	Лето	Осень
Дунайский	$C_{\text{ВОВ ЭКСП}}$, мкМ	$12,8 \pm 7,8$	$41,1 \pm 4,2$	$42,3 \pm 5,7$	$14,2 \pm 9,1$
	$C_{\text{ВОВ CZCS}}$, мкМ	$13,3 \pm 3,9$	$37,0 \pm 8,3$	$40,4 \pm 8,8$	$16,6 \pm 4,5$
Центральный	$C_{\text{ВОВ ЭКСП}}$, мкМ	$7,6 \pm 2,1$	$16,3 \pm 7,9$	$21,1 \pm 4,2$	$15,8 \pm 3,2$
	$C_{\text{ВОВ CZCS}}$, мкМ	$8,1 \pm 1,3$	$19,7 \pm 2,7$	$26,7 \pm 3,3$	$11,8 \pm 2,7$

Рис. 5. Межгодовые изменения аномалий концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$, рассчитанных по спутниковым данным, и отношения концентраций C/N , C/P в поверхностном слое западной глубоководной части Чёрного моря в зимний (1) и весенний (2) периоды

Анализ межгодовой изменчивости концентраций компонентов ВОВ предполагает необходимость учёта влияния на их изменчивость различных природных факторов. Прежде всего, это условия развития фитопланктона, определяемые гидрологическими, гидрохимическими и оптическими характеристиками морской среды, которые, в свою очередь, зависят от изменчивости климатических условий. Такой анализ представляет самостоятельный интерес (Кукушкин, 2013, 2014; Кукушкин, Пархоменко, 2015) и в настоящей работе выполняться не будет. Проведённый качественный анализ аномалий рассчитанных концентраций компонентов ВОВ показывал, что в их изменчивости можно выделить три основных периода: 1979–1985, 1986–1993 и 1994–2010 гг. (см. *рис. 5*). В первый период их концентрации были ниже средних значений (отрицательные аномалии), что объяснялось тёплыми зимами, относительно высокой прозрачностью воды, повышенной зимней температурой воды, не способствующими активному развитию фитопланктона. Поэтому в этот период и средняя величина биомассы фитопланктона была ниже средней (Кривенко, Пархоменко, 2010; Кукушкин, 2014; Кукушкин, Пархоменко, 2015). Во втором периоде с 1986 по 1993 г. отмечалось увеличение концентрации компонентов ВОВ (положительная аномалия), которое, согласно приведённым выше работам, наблюдалось на фоне повышения биомассы фитопланктона, понижения средней зимней температуры воды и относительной её прозрачности. В последующий период, начиная с 1994 г., аномалии концентрации компонентов ВОВ и биомассы фитопланктона резко снижались, а значения относительной прозрачности и средней зимней температуры воды повышались и соответствовали величинам, отмеченным в период с 1978 по 1985 г.

Заключение

При сравнении данных одновременных или близких по времени и пространству выполнения судовых и спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a*, проведённых в разные сезоны в различных районах глубоководной и шельфовой частей Чёрного моря, были получены высокие значения коэффициентов корреляции (0,8–0,98), указывающие на близость значений этих концентраций. При этом различие их средних значений в этих районах во все сезоны не превышало 15–20 %.

Использование полученных сезонных регрессионных уравнений, связывающих концентрацию компонентов ВОВ с концентрацией хлорофилла *a*, и доступный массив спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* позволили рассчитать сезонные значения концентрации компонентов ВОВ в глубоководном и шельфовом районах моря. Приведённые примеры использования рассчитанных данных иллюстрируют возможность получения представления о сезонной пространственной и сезонной межгодовой изменчивости их распределения.

Литература

1. Берсенева Г. П., Чурилова Т. Я., Георгиева Л. В. Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 3. С. 389–398.
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. Востоков С. В. Взвешенное вещество как показатель продуктивности в западной части Черного моря // *Океанология*. 1996. Т. 36. № 2. С. 260–267.
4. Востоков С. В., Лисицын Б. Е., Коновалов Б. В., Соловьев Д. М., Гагарин В. И. Мезомасштабная изменчивость концентрации хлорофилла “а”, взвешенного органического вещества и спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона в поверхностном слое северо-восточной части Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 235–247.
5. Кривенко О. В., Пархоменко А. В. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. // *Морской экологический журн.* 2010. Т. 9. № 4. С. 5–24.

6. Кукушкин А. С. Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 626–642.
7. Кукушкин А. С. Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в верхнем слое глубоководной части Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 5. С. 612–625.
8. Кукушкин А. С., Пархоменко А. В. Изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое глубоководной области Черного моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 2. С. 252–261.
9. 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.
10. Румшинский Л. З. *Элементы теории вероятности*. М.: Наука, 1970. 256 с.
11. Суетин В. С., Кучерявый А. А., Суслин В. В., Королев С. Н. Концентрация пигментов фитопланктона в северо-западной части Черного моря по данным измерений спутниковым цветовым сканером CZCS // *Морской гидрофизический журнал*. 2000. № 2. С. 74–82.
12. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а» в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // *Морской экологический журн.* 2008. Т. 7. № 2. С. 24–42.
13. Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я. Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // *Доклады РАН*. 2010. Т. 432. № 6. С. 845–848.
14. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Yunev O. A., Basturk O., Finenko Z. Z., Nikonov S., Vedernikov V. I. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and situ data // *J. Marine Systems*. 2002. V. 36. P. 145–160.
15. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A. 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.
16. 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 // *Intern. J. Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 18. P. 4380–4400.

Evaluation of applicability of the satellite data for studying suspended organic matter variability in the surface layer of the Black Sea

A. S. Kukushkin¹, A. V. Parkhomenko²

¹ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

² *A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS
Sevastopol 299011, Russia*

E-mail: kukushkinas@mail.ru

We estimated the possibility of application of satellite data on chlorophyll *a* concentration to study the variability of the content of suspended organic matter (SOM) components in the surface layer of the Black Sea. The results of simultaneous shipboard and satellite (CZCS and *SeaWiFS* color scanners) observations of the chlorophyll *a* concentration which were carried out in different seasons in various areas of the Black Sea deepwater and shelf parts are compared. A high correlation between these concentrations and their similar values (a 5–20% difference) indicates a good agreement between the measured and calculated concentrations of chlorophyll *a*. Based on the archive data on the content of the SOM components (suspended organic carbon, nitrogen and phosphorus) and shipboard measurements of the chlorophyll *a* concentration, the seasonal regression equations were obtained between the simultaneously measured values in the surface layer of the deepwater and northwestern (shelf) parts of the sea. Seasonal concentrations of the SOM components in the surface layer of the northwestern and western deep sea parts are calculated with the use of these equations and available array of satellite data on the chlorophyll *a* concentration. Examples of their application for studying the spatial and interannual variability of the concentration of the SOM components are given.

Keywords: the chlorophyll *a* concentration, suspended organic matter, onboard and satellite observations, regression equations, correlation, the Black Sea

Accepted: 25.09.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-195-205

References

1. Berseneva G. P., Churilova T. Ya., Georgieva L. V., Sezonnaya izmenchivost' khlorofilla i biomassy fitoplanktona v zapadnoi chasti Chernogo morya (Seasonal variability of chlorophyll and phytoplankton biomass in the western part of the Black sea), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 3, pp. 389–398.
2. Burlakova Z. P., Eremeeva L. V., Konovalov S. K., Sezonnaya i prostranstvennaya izmenchivost' soderzhaniya vzveshennogo organicheskogo veshchestva v deyatel'nom sloe Chernogo morya (Seasonal and spatial variability of the content of suspended organic substances in the active layer of the Black sea), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1998, No. 5, pp. 30–62.
3. Vostokov S. V., Vzveshennoe veshchestvo kak pokazatel' produktivnosti v zapadnoi chasti Chernogo morya (Suspended matter as a productivity indicator in the western part of the Black Sea), *Okeanologiya*, 1996, Vol. 36, No. 2, pp. 260–267.
4. Vostokov S. V., Lisitsyn B. E., Konovalov B. V., Solov'ev D. M., Gagarin V. I., Mezomasshtabnaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla "a", vzveshennogo organicheskogo veshchestva i spektral'nykh pokazatelei pogloshcheniya sveta pigmentami fitoplanktona v poverkhnostnom sloe severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Mesoscale variability of chlorophyll *a* concentration, suspended organic matter and spectral index of light absorption by phytoplankton pigments in the surface layer of the northeastern part of the Black Sea), *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo morya*, Moscow: Nauka, 2002, pp. 235–247.
5. Krivenko O. V., Parkhomenko A. V., Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost' biomassy fitoplanktona v Chernom more za period 1948–2001 gg. (Spatial and time variability of phytoplankton biomass in the Black Sea during 1948–2001), *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2010, Vol. 9, No. 4, pp. 5–24.
6. Kukushkin A. S., Izmenchivost' soderzhaniya vzveshennogo organicheskogo veshchestva v severo-zapadnoi chasti Chernogo morya (Variability of suspended organic matter in the northwestern part of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 5, pp. 626–642.
7. Kukushkin A. S., Izmenchivost' soderzhaniya vzveshennogo organicheskogo veshchestva v verkhnem sloe glubokovodnoi chasti Chernogo morya (Variability of suspended organic matter in the surface layer in the Black Sea (deep-sea areas), *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 5, pp. 646–658.
8. Kukushkin A. S., Parkhomenko A. V., Izmenchivost' soderzhaniya vzveshennogo organicheskogo fosfora v verkhnem sloe glubokovodnoi oblasti Chernogo morya (Variability of suspended organic phosphorus in the upper layer of the deep part of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 2, pp. 252–261.
9. Nezlin N. P., D'yakonov V. Yu., Analiz mnogoletnikh izmenenii kontsentratsii khlorofilla v poverkhnostnom sloe Chernogo morya po dannym CZCS-radiometra (Analysis of the long-term chlorophyll concentrations in the upper layer of the Black sea using the CZCS-radiometer data), *Okeanologiya*, 1998, Vol. 38, No. 5, pp. 703–709.
10. Rumshinskii L. Z., *Elementy teorii veroyatnosti* (Elements of probability theory), Moscow: Nauka, 1970, 256 p.
11. Suetin V. S., Kucheryavii A. A., Suslin V. V., Korolev S. N., Kontsentratsiya pigmentov fitoplanktona v severo-zapadnoi chasti Chernogo morya po dannym izmerenii sputnikovym tsvetovym skanerom CZCS (Phytoplankton pigment concentrations in the northwestern part of the Black Sea based on data of measurements by satellite color scanner CZCS), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2000, No. 2, pp. 74–82.
12. Suslin V. V., Churilova T. Ya., Sosik Kh. M., Regional'nyi algoritm rascheta kontsentratsii khlorofilla "a" v Chernom more po sputnikovym dannym SeaWiFS (A regional algorithm for calculating the chlorophyll-*a* concentration in the Black Sea on the satellite SeaWiFS data), *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2008, Vol. 7, No. 2, pp. 24–42.
13. Finenko Z. Z., Suslin V. V., Churilova T. Ya., Otsenka produktivnosti fitoplanktona Chernogo morya po sputnikovym dannym (Evaluation of productivity of phytoplankton of the Black Sea from satellite data), *Doklady RAN*, 2010, Vol. 432, No. 6, pp. 845–848.
14. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Yunev O. A., Basturk O., Finenko Z. Z., Nikonov S., Vedernikov V. I., Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and situ data, *J. Marine Systems*, 2002, Vol. 36, pp. 145–160.

15. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A., Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas, *Deep-Sea Research II*, 2004, Vol. 51, pp. 1063–1091.
16. 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, *Intern. J. Remote Sens.*, 2016, Vol. 37, No. 18, pp. 4380–4400.