

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.463.5

Биооптические характеристики прибрежных вод в районе Севастополя по данным показателя ослабления света

Е.В. Маньковская, Е.Н. Корчемкина, А.Н. Морозов*

*Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

Рассматривается методика обработки данных измерений 4- и 9-канального прозрачномера, разработанных в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института и активно используемых в экспедиционных исследованиях. На основе данных (28–31.07.2015 г. и 9–10.09.2015 г.) натурных измерений показателя ослабления света 9-канальным прозрачномером получена система ортогональных функций для прибрежных вод Черного моря в районе г. Севастополя. Она используется для восстановления спектрального распределения показателя ослабления в широком диапазоне длин волн по измерениям в двух (460 и 625 нм) участках спектра. Предлагаемая методика использована для расчета биооптических характеристик по результатам измерений показателя ослабления света в двух экспедициях научно-исследовательского судна «Бирюза» 09–10.09.2015 г. и 12–13.09.2016 г. в прибрежных водах в районе г. Севастополя. Основные особенности полученных распределений показателей поглощения растворенным органическим веществом и рассеяния взвесью связаны с выходом на поверхность моря плюмов, образующихся из сточных вод, вытекающих из аварийного разрыва коллектора сбросового устройства.

Ключевые слова: взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, прозрачномер, показатель ослабления света, плюм, Черное море; suspended matter, dissolved organic matter, transparency meter, beam attenuation coefficient, plume, Black Sea.

Введение

Оптическая структура прибрежных вод в районе Севастополя имеет сложный характер, обусловленный неоднородностью распределения планктона, а также поступлением веществ естественного и антропогенного происхождения. Малые глубины и особенности рельефа берега приводят к значительной изменчивости пространственной структуры вод и ее быстрой перестройке в зависимости от интенсивности и направления ветра и течений. Оперативный мониторинг экологического состояния прибрежных вод, выявление источников их загрязнения, определение путей распространения загрязняющих веществ являются важными океанографическими задачами, решение которых возможно путем измерения оптических характеристик вод, в частности показателя ослабления света.

Показатель ослабления направленного света (ПОС) — оптическая характеристика морской среды, постоянно измеряемая в экспедиционных исследованиях Морского гидрофизического института (МГИ) РАН. В отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН для этих целей разработаны и исполь-

зуются 4- и 9-канальный спектральные измерители прозрачности. Технические характеристики приборов представлены в табл. 1.

Современные методики обработки данных измерений ПОС и малопараметрические биооптические модели позволяют по величине ПОС определять содержание в морской воде оптически активных примесей: фитопланктона, органической и минеральной взвеси, растворенного органического вещества. Обзор таких методов и моделей приводится в работе [1].

Данные измерений ПОС и рассчитанные по ним характеристики морской среды необходимы для пополнения базы океанографических данных, используемых для оценки состояния морской среды, а также для параметризации численных биооптических моделей.

В настоящей работе рассматривается методика обработки данных измерений 4- и 9-канального прозрачномера и приводятся биооптические характеристики прибрежных вод в районе г. Севастополя, полученные в результате ее использования применительно к данным двух экспедиций научно-исследовательского судна (НИС) «Бирюза» 9–10.09.2015 г. и 12–13.09.2016 г. Полученные результаты согласуются с публикациями [2–6], в которых показано наличие плюма, образующегося из-за аварийного разрыва магистрали сточных вод в исследуемом районе.

* Екатерина Викторовна Маньковская (emankovskaya@mail.ru); Елена Николаевна Корчемкина (korchemkina@mhi-ras.ru); Алексей Николаевич Морозов (anmorozov@mhi-ras.ru).

Материалы и методы исследования

Контактные измерения. В работе использованы данные измерений ПОС в трех экспедициях НИС «Бирюза» в прибрежных водах г. Севастополя: 28–31.07.2015 г., 9–10.09.2015 г. и 12–13.09.2016 г. В 2015 г. измерения выполнялись в 9 спектральных каналах, в 2016 г. – в 4 (табл. 1). Прибор работал в режиме зондирования, с максимальной глубиной зондирования 60 м, разрешением по глубине 1 м для 9-канального и 0,1 м для 4-канального прозрачномера. При обработке данных для определения биооптических характеристик использовались средние значения ПОС в слое 0–5 м.

Таблица 1

Основные технические характеристики 4- и 9-канального прозрачномеров

Параметр	Значение	
	4-канальный	9-канальный
Диапазон измерений показателя ослабления (ln), м ⁻¹	0,01–5,0	0,01–5,0
Погрешность измерений (ln), м ⁻¹	±0,015	±0,015
Спектральный диапазон, нм	460, 520, 590, 625	370, 400, 447,5, 470, 505, 530, 590, 617, 660
Ширина полосы пропускания канала, нм	12–35	12–35
Длина оптической базы, м	0,125	0,125
Время измерения 1-го спектра, с	0,1	3
Максимальная глубина погружения, м	150	150

Расположение станций показано на картах пространственных распределений в следующем разделе.

Система ортогональных функций. Для массива контактных измерений спектров ПОС $c(\lambda_i)$ 9-канальным прозрачномером в 2015 г. проведено разложение на собственные векторы (табл. 2). Общее количество спектров исходного массива $N = 1151$ (без осреднения в слое 0–5 м) при условии $c(530) < 1,2 \text{ м}^{-1}$.

Таблица 2

Параметры разложения спектров ПОС на ортогональные функции

Длина волны λ_i , нм	Среднее значение ПОС $\langle c(\lambda_i) \rangle$, м ⁻¹	1-й ортогональный вектор $\Psi_1(\lambda_i)$	2-й ортогональный вектор $\Psi_2(\lambda_i)$
370	1,09	0,56	0,81
400	0,92	0,45	-0,18
447,5	0,70	0,36	-0,21
470	0,63	0,35	-0,25
530	0,57	0,26	-0,23
590	0,65	0,24	-0,22
617	0,82	0,20	-0,25
660	0,93	0,26	-0,20

Количество длин волн спектров ПОС составило 8, так как один канал прозрачномера не работал. Первые два собственных числа равны 71,86 и 6,75% соответственно; относительная дисперсия спектрального распределения ПОС, описываемая двумя первыми векторами, – 79%.

Ранее такая система ортогональных функций была получена для поверхностных вод глубоководной части Черного моря [7]. Для прибрежных вод это сделано впервые на основе новых данных натурных измерений, полученных в 2015 г.

Эта система ортогональных векторов используется для восстановления спектрального распределения ПОС в диапазоне длин волн 370–660 нм по неполным спектральным измерениям (в случае применения 4-канального прозрачномера). Восстановление проводится по формуле

$$c(\lambda_i) = \langle c(\lambda_i) \rangle + k_1 \Psi_1(\lambda_i) + k_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (1)$$

где $c(\lambda_i)$ – восстановленные значения ПОС.

Величины $\langle c(\lambda_i) \rangle$, $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ приведены в табл. 2. Коэффициенты k_1 и k_2 определяются по измеренным значениям ПОС на длинах волн $\lambda_1 = 460 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 625 \text{ нм}$ из следующих условий:

$$\begin{cases} c(460) = \langle c(460) \rangle + k_1 \Psi_1(460) + k_2 \Psi_2(460), \\ c(625) = \langle c(625) \rangle + k_1 \Psi_1(625) + k_2 \Psi_2(625). \end{cases} \quad (2)$$

Средняя по спектру ошибка представления ПОС двумя векторами составляет 21%. Это вызвано значительными вариациями ПОС в прибрежных водах по сравнению с открытыми районами моря.

Методика определения биооптических характеристик по ПОС. В [8] предложен метод спектрального обращения ПОС с целью определения содержания оптически активных примесей, в частности взвеси и растворенного органического вещества. Для этого необходимо знать спектральное распределение ПОС в широком диапазоне длин волн, от ультрафиолетового до красного спектральных каналов.

В 2015 г. такое распределение ПОС было непосредственно измерено 9-канальным прозрачномером. В случае данных, полученных 4-канальным прозрачномером в 2016 г., спектральное распределение ПОС в широком диапазоне длин волн было восстановлено с помощью системы ортогональных функций (1) по измерениям на двух длинах волн (2).

Аналитическое выражение ПОС с учетом оптически активных компонентов морской воды, влияющих на поглощение и рассеяние света, и с использованием принятых в литературе параметризаций имеет следующий вид:

$$c(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) + a_{\text{org}}(400)e^{-S(\lambda-400)} + b_p(550)\left(\frac{550}{\lambda}\right)^n, \quad (3)$$

где $a_w(\lambda)$ и $b_w(\lambda)$ – поглощение и рассеяние чистой водой [9]; $a_{\text{org}}(400)$ – поглощение растворенными

и взвешенными органическими компонентами; $b_p(550)$ – рассеяние взвесью; коэффициент $S = 0,018$ по данным [10] с учетом соотношения растворенного органического вещества и детрита в Черном море; n – параметр, выражающий спектральную селективность рассеяния, для мелких частиц (< 1 мкм) $n = 1,7$, для крупных – $n = 0,3$ [11]. Поглощение пигментами фитопланктона в данной параметризации не учитывается, так как оно меньше, чем поглощение растворенной органикой, и существенно меньше, чем рассеяние.

Вычисление неизвестных параметров ($a_{org}(400)$, $b_p(550)$ и n) проводится путем аппроксимации экспериментальных данных функцией (3) методом наименьших квадратов в специально разработанной итерационной процедуре. Поскольку поглощение органическим веществом вносит наиболее существенный вклад в спектральном диапазоне до 490 нм, то в первом приближении определяются рассеяние взвесью $b_p(550)$ и параметр селективности n в диа-

пазоне длин волн 470–660 нм без учета органического вещества. Затем в диапазоне длин волн 370–470 нм рассчитывается $a_{org}(400)$ на основе известного $b_p(550)$. В последующих итерациях используются вычисленные на предыдущем этапе значения. Для достижения сходимости требуется до 10 итераций. Суммарная погрешность метода составляет около 15%.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показано распределение показателя ослабления света в исследуемом районе в 2015 и 2016 гг. по данным контактных измерений. На рис. 2 представлены пространственные распределения биооптических характеристик, рассчитанных по данным ПОС. На рисунках линией показано положение подводной магистрали сбросового устройства сточных вод, звездочкой – место ее предполагаемого разрыва [3, 5].

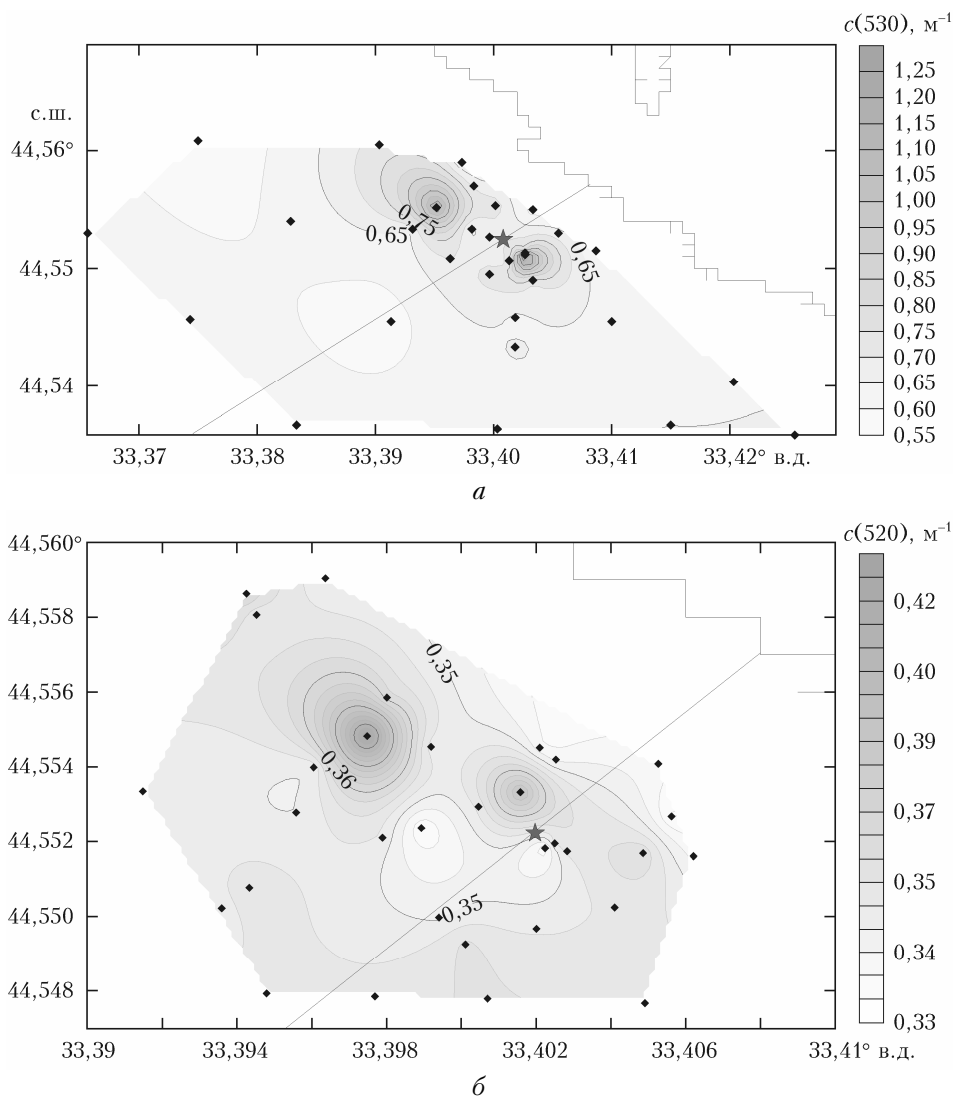


Рис. 1. Распределение показателя ослабления света в слое 0–5 м в прибрежных водах г. Севастополя: 9–10.09.2015 г. (а); 12–13.09.2016 г. (б); ромбы – станции

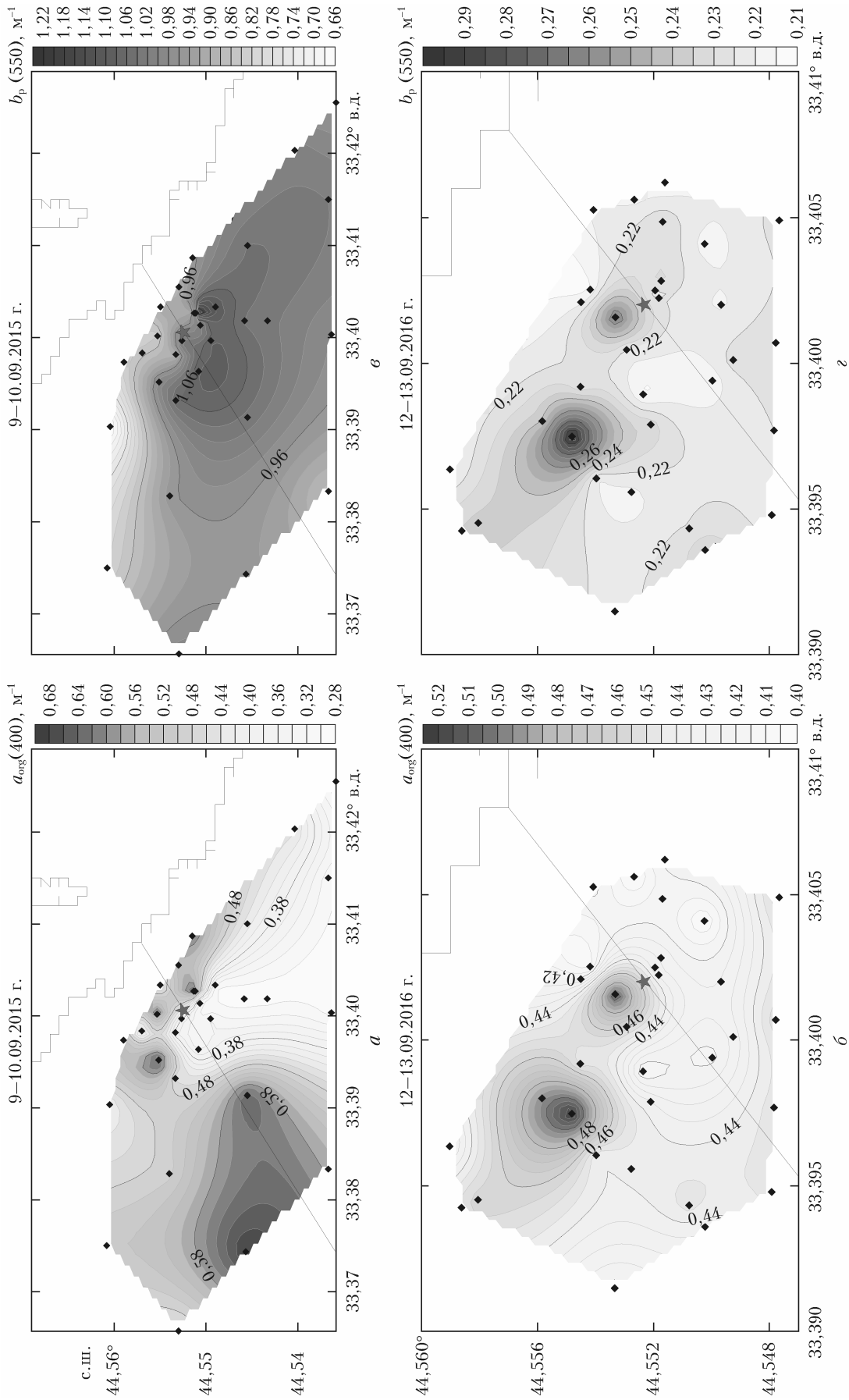


Рис. 2. Распределение показателя поглощения растворенной органикой $a_{org}(400)$ (*a*, *б*) и показателя рассеяния взвесью $b_p(550)$ (*в*, *г*) в слое 0–5 м в прибрежных водах г. Севастополя

Таблица 3

Статистические показатели измеренных и расчетных данных

Статистический показатель	$c(530)$, m^{-1}		$c(520)$, m^{-1}		$a_{орг}(400)$, m^{-1}		$b_p(550)$, m^{-1}	
	2015 г.	2016 г.	2015 г.	2016 г.	2015 г.	2016 г.	2015 г.	2016 г.
Среднее	0,70	0,35	0,45	0,44	0,97	0,23		
СКО	0,16	0,02	0,13	0,03	0,11	0,02		
Минимум	0,55	0,33	0,27	0,40	0,65	0,21		
Максимум	1,38	0,42	0,68	0,52	1,25	0,30		
Медиана	0,65	0,35	0,44	0,43	0,97	0,22		
1-й квартиль	0,63	0,34	0,33	0,42	0,90	0,22		
3-й квартиль	0,70	0,35	0,57	0,45	1,04	0,23		

На рис. 1, 2 хорошо видны «пятна» вод, имеющих повышенные значения биооптических характеристик в отличие от окружающих их фоновых величин. Такие особенности в пространственных распределениях показателей в обеих съемках связаны с выходом на поверхность моря пловов, образующихся из сточных вод, вытекающих из разрыва трубы.

В табл. 3 представлены статистические показатели распределений величин, приводимых на рис. 1, 2. В целом величины показателей ослабления света, поглощения растворенным органическим веществом и рассеяния взвесью были выше в 2015 г. по сравнению с 2016 г. Так, в 2015 г. величины ПОС были выше в 2 раза, а показателя рассеяния взвесью в 3–4. Это может быть связано с тем, что в 2015 г. пикноклин располагался значительно ближе к поверхности, чем в 2016 г. [12, 13], что позволило большему объему сточных вод выйти на поверхность.

Пространственное распределение величин тесно связано с динамикой вод в данном районе. В обеих экспедициях проводились измерения акустическим доплеровским профилометром течений, что позволило проанализировать текущую динамическую ситуацию.

Съемка 2015 г. Распределение течений в 2015 г. было неоднородным. 9 сентября в мористой части доминировали средние течения западного направления с более высокими значениями скорости. В прибрежной зоне течения имели тенденцию выстраиваться вдоль береговой черты. Также в верхнем слое наблюдалось изменение направления течений от западного до южного при удалении от берега. 10 сентября доминировали течения северо-западного вдольберегового направления. Картина в районе всплытия плова была размазана. В первый день наблюдений 9 сентября плов всплыл к юго-западу от места разрыва трубы и был отнесен течением на запад, что отражается в распределении показателя поглощения растворенной органикой. Уменьшение концентрации показателя рассеяния взвеси в юго-западном направлении можно объяснить постепенным выпадением из плова частиц взвеси. Во второй день плов при всплытии переносился на северо-запад вдольбереговым течением, что видно по распределениям показателей ослабления света и поглощения органикой.

Съемка 2016 г. 12–13.09.2016 г. доминировали вдольбереговые течения. Плов сносилось течением вдоль берега, и он появлялся на поверхности моря

к северо-западу от места разрыва трубы. Вследствие суточной разницы во времени при съемке разных частей полигона плов на второй день фиксировался еще далее к северо-западу, при этом показатели рассеяния взвесью и поглощения растворенной органикой в нем были выше, чем в месте появления на поверхности. Объясняется это тем, что при появлении на поверхности верхняя часть вод плова уже частично смешана с морскими водами. За время переноса плова к поверхности моря поднималась его основная часть и биооптические показатели в нем становились выше.

Данные дистанционного зондирования позволяют также проводить мониторинг антропогенных воздействий в прибрежных районах. В работе [3, рис. 5, а] приведена сводная карта загрязнений, сформированная по результатам обработки космических оптических многоспектральных изображений, полученных в период с 17.05.2014 г. по 12.09.2016 г. По данным спутника Sentinel-2A 12.09.2016 г. и спутника GeoEye 10.09.2015 г., на карте выделены области загрязнений (желтый и красный цвет соответственно), которые совпадают с областями повышенных значений биооптических характеристик (см. рис. 1, 2).

Заключение

Таким образом, в работе показана эффективность использования показателя ослабления направленного света для оценки биооптических характеристик прибрежных вод, подверженных антропогенному воздействию. Предложена методика расчета показателей поглощения растворенным органическим веществом и рассеяния взвесью по результатам измерений ПОС 9- или 4-канальным прозрачномером. Для прибрежных вод в районе г. Севастополя получена система ортогональных функций, позволяющая восстанавливать спектральное распределение ПОС в широком диапазоне длин волн по измерениям в двух участках спектра. Это необходимо для расчета биооптических характеристик по данным ПОС в случае использования 4-канального прозрачномера.

В результате обработки данных двух экспедиций НИС «Бирюза» 9–10.09.2015 г. и 12–13.09.2016 г. получены распределения ПОС и биооптических характеристик в прибрежных водах в районе г. Севастополя, подтверждающие наличие разрыва подводной магистрали сточных вод в исследуемом районе.

Основные особенности в распределениях биооптических показателей соответствуют наблюдавшейся динамической ситуации, а также данным дистанционного зондирования.

Полученные результаты и методики могут быть использованы при дальнейшем мониторинге этого района оптическими методами, а также для оценки сложившейся экологической ситуации.

Работа выполнена в рамках госзадания по темам № 0827-2019-0002 и 0827-2019-0004.

1. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундам. и прикл. гидрофиз.* 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.
2. Иванов В.А., Катунина Е.В., Совга Е.Е. Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклейского полуострова в районе расположения глубинных стоков // *Процессы в геосредах.* 2016. № 5. С. 62–68.
3. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // *Исслед. Земли из космоса.* 2017. № 6. С. 3–22.
4. Совга Е.Е., Кондратьев С.И., Годин Е.А., Слепчук К.А. Сезонная динамика содержания и локальные источники биогенных элементов в водах прибрежной акватории Гераклейского полуострова // *Морск. гидрофиз. журн.* 2017. № 1. С. 56–65.
5. Бондур В.Г., Иванов В.А., Дулов В.А., Горячкин Ю.Н., Замшин В.В., Кондратьев С.И., Ли М.Е., Муханов В.С., Совга Е.Е., Чухарев А.М. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя // *Фундам. и прикл. гидрофиз.* 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54.
6. Бондур В.А., Иванов В.Г., Фомин В.В. Особенности распространения загрязнения вод из подводного источника в стратифицированной среде прибрежной акватории // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2018. Т. 54, № 4. С. 453–461.
7. Маньковский В.И., Соловьев М.В. О возможности восстановления спектрального распределения показателя ослабления излучения в поверхностных водах Черного моря по измерениям на одной длине волны // *Системы контроля окружающей среды.* 1999. С. 119–124.
8. Корчемкина Е.Н., Латушкин А.А. Определение концентраций растворенного органического вещества и взвеси по спектральному показателю ослабления направленного света // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.* 2016. № 3. С. 44–48.
9. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum 380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36(33). P. 8710–8723.
10. Churilova T.Y., Suslin V.V., Berseneva G.P., Pryahina S.F. Parameterization of light absorption by phytoplankton, nonalgal particles and coloured dissolved organic matter in the Black Sea // *Proc. IV Intern. Conf. Current Problems in Optics of Natural Waters.* Nizhny Novgorod. 2007. P. 70–74.
11. *Оптика океана.* Т. 1. Физическая оптика океана. Гл. 8 / Отв. ред. А.С. Монин. М.: Наука, 1983. 372 с.
12. *Отчет о НИР «Разработка методов и создание экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны Черноморского побережья Российской Федерации, включая Крымский полуостров, на основе спутниковых и контактных данных».* № 14.577.21.0110 от 15.01.2014. Этап 3. 2015.
13. *Отчет о НИР «Разработка методов и создание экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны Черноморского побережья Российской Федерации, включая Крымский полуостров, на основе спутниковых и контактных данных».* № 14.577.21.0110 от 15.01.2014. Этап 5. 2015.

E.V. Mankovskaya, E.N. Korchemkina, A.N. Morozov. **Bio-optical characteristics of Sevastopol coastal waters from the beam attenuation coefficient.**

A technique for processing measurements with 4- and 9-channel transparency meters developed at the Department of Marine Optics and Biophysics of Marine Hydrophysical Institute are discussed. A system of orthogonal functions for beam attenuation coefficient of coastal waters near Sevastopol was derived on the basis of new measurements with a 9-channel transparency meter. It was used to retrieve the spectral distribution of the beam attenuation coefficient in a wide spectral range from measurements in two (460 and 625 nm) spectral channels. The technique suggested was used to calculate the bio-optical characteristics from the beam attenuation coefficient measured in two expeditions of the R/V “Biryuza” in September 9–10, 2015, and September 12–13, 2016, in the coastal waters of Sevastopol. The main features of the obtained distributions of dissolved organic matter absorption and suspended matter scattering in both surveys are connected with the plume upwelling to the sea surface. The existence of the plume is a consequence of emergency state of the underwater pipe of the wastewater discharge system.