

УДК 551.463.5

© Е. Н. Корчёмкина, Е. В. Маньковская

ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

korchemkina@mhi-ras.ru

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ И РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 2016 ГОДА

Статья поступила в редакцию 26.10.2017, после доработки 29.01.2018.

В работе рассматриваются результаты измерений показателя ослабления направленного света в прибрежной и глубоководной части Черного моря, полученные в двух рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в июле и октябре 2016 года. Представлены способы определения концентрации и рассеяния взвесью, а также поглощения растворенным органическим веществом в морской воде. Рассмотренные способы включают: эмпирические и аналитические расчёты на основе измерений показателя ослабления направленного света в 4-х спектральных каналах, расчёты обратного рассеяния взвесью и поглощения растворенным органическим веществом по спутниковым измерениям в видимом спектральном диапазоне. Предложен метод оценки содержания взвеси и растворенного органического вещества по значениям показателя ослабления света на двух длинах волн. Полученные по спутниковым данным пространственные распределения рассеяния морской взвесью и поглощения растворенным органическим веществом хорошо соответствуют данным натурных измерений. Рассчитанные по контактными и дистанционным измерениям значения хорошо коррелируют друг с другом. Даны основные расчетные характеристики взвеси и растворенного органического вещества для двух экспедиций. Представленные в работе результаты отражают пространственно-временную изменчивость первичных гидрооптических характеристик исследуемого полигона. Рассмотренные методы дают возможность производить экспресс-оценки состава и биопродуктивности вод, их экологического состояния.

Ключевые слова: Черное море, оптические измерения, показатель ослабления направленного света, коэффициент яркости моря, взвешенное вещество, растворенное органическое вещество.

E. N. Korchemkina, E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

ESTIMATION OF SUSPENDED MATTER AND DISSOLVED ORGANIC MATTER CONTENT IN SURFACE WATERS OF BLACK SEA FROM OPTICAL MEASUREMENTS IN RESEARCH CRUISES IN 2016

Received 26.10.2017, in final form 29.01.2018.

The results of the beam attenuation coefficient measurements in the shelf and depth areas of Black Sea obtained during two cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” in July and October 2016 are discussed. The methods of determining the concentration and scattering of suspended matter and absorption of dissolved organic matter in seawater are presented. The methods include empirical and analytical calculations based on measurements of the beam attenuation coefficient in four spectral channels, calculations of suspended matter backscattering and dissolved organic matter absorption from satellite measurements in the visible spectral range. A method allowing to obtain estimates of dissolved organic and suspended matter content using beam attenuation coefficient measurements in two spectral channels is proposed. Retrieved spatial distributions of suspended matter backscattering and dissolved organic matter absorption from satellite data are in good agreement with *in situ* measurements. There is a high correlation between the values calculated by contact and satellite data. The basic characteristics of suspended matter and dissolved organic matter calculated for two research cruises are

Ссылка для цитирования: Корчёмкина Е. Н., Маньковская Е. В. Оценка содержания взвеси и растворенного органического вещества в поверхностных водах Черного моря по данным экспедиционных оптических измерений 2016 года // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 86—93.

For citation: Korchemkina E. N., Mankovskaya E. V. Estimation of organic and suspended matter content by optical measurements in Black Sea research cruises in 2016. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 2, 86—93.

doi: 10.7868/S2073667318020077

presented. Results of this work represent the spatial and temporal variability of the primary hydrooptical characteristics of the investigated area. Considered methods make possible to assess the composition, bio-productivity and ecological state of waters.

Key words: Black Sea, optical measurements, beam attenuation coefficient, reflectance coefficient, suspended matter, dissolved organic matter.

При проведении натурных гидрооптических исследований в ФГБУН МГИ широко применяются методы и аппаратура для измерений показателя ослабления света (ПОС). Выбор этой первичной гидрооптической характеристики в качестве одного из параметров, необходимых при проведении мониторинга состояния акваторий и подспутниковых измерений, не случаен. Значения ПОС обусловлены наличием в водной среде растворенного, взвешенного и коллоидного вещества (глина, ил, мелкодисперсные органические и неорганические вещества), а также планктона и других микроскопических организмов. Связь ПОС с концентрацией общего взвешенного вещества зависит от состава и свойств взвеси — размера, формы, показателя преломления частиц. Все эти свойства определяют региональные особенности акватории. Информативным участком спектра для определения концентрации общей взвеси с помощью прозрачномеров является красная область видимого спектра [1].

Для решения задач оперативного мониторинга в отделе оптики и биофизики моря ФГБУН МГИ был разработан и изготовлен малогабаритный спектральный измеритель ПОС (СИПО-4), предназначенный как для проведения исследований вертикальных профилей полей прозрачности (зондирующий режим), так и в составе проточных систем при попутных исследованиях с судов, либо со стационарных платформ [2].

СИПО-4 позволяет получать информацию о величине ПОС в четырех спектральных участках: 460, 520, 590 и 625 нм. Эти данные можно использовать для расчета концентрации взвеси по эмпирическим формулам [1, табл. 4.6]. Следует отметить, что четырех спектральных участков недостаточно для применения аналитических методов решения обратной задачи биооптики, предложенных в работе [3], и восстановления данных о содержании нескольких веществ одновременно. Особенно это касается растворенного органического вещества, существенное влияние которого на ПОС наблюдается только в коротковолновой области спектра. Однако, как показано в статье [4], по данным измерений в двух участках спектра можно восстановить значения ПОС в 16-ти участках спектра в диапазоне длин волн 416—700 нм, используя систему ортогональных векторов для базы ПОС в водах Черного моря.

В данной работе предлагается способ расчета содержания взвеси и растворенного органического вещества («желтого вещества») в водах Черного моря по измерениям ПОС в двух спектральных участках (460 и 625 нм). В рассчитываемую величину поглощения растворенной органикой также дает вклад детрит, однако как отдельный параметр поглощение детрита не выделяется. Дополнительно проводится оценка тех же параметров по спутниковым данным восходящей яркости моря (MODIS) с применением ранее разработанного алгоритма [3] и сопоставление полученных значений и пространственных распределений.

Материалы и методы

Контактные измерения. В работе использованы данные, полученные в 87-м и 89-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» 30.06—20.07.2016 (103 станции) и 30.09—20.10.2016 (87 станций) в глубоководной части Черного моря. Расположение станций показано точками на картах пространственных распределений, приводимых ниже. Измерения ПОС выполнялись с помощью СИПО-4 в режиме зондирования. Максимальная глубина зондирования — 60 м, разрешение по глубине — 0.1 м. Измерения прозрачности проводились в 4-х спектральных каналах — 460, 520, 590, 625 нм. Расчет проводился по значениям ПОС, осредненным в слое 0—5 м. Район проведения измерений и глубина осреднения соответствуют пространственному расположению и глубине отбора данных, которые использовались ранее для построения системы ортогональных векторов базы ПОС в водах Черного моря [4].

Определение концентрации взвеси. Для открытых участков моря, которые менее подвержены антропогенной нагрузке, эмпирическое соотношение между концентрацией взвеси (C_p , мг/л) и ПОС на 625 нм ($\epsilon(625)$, m^{-1}) имеет вид, приведенный в работе [1]:

$$C_p = 3.02\epsilon(625) - 0.31, R^2 = 0.89, \quad (1)$$

где ПОС выражен в м^{-1} при десятичном основании логарифма. В данной работе используется ПОС, выраженный в натуральных логарифмах, для которого выражение (1) будет иметь вид:

$$C_p = 1.31\varepsilon(625) - 0.31. \quad (2)$$

Эмпирическое соотношение (2) используется для расчета общей концентрации взвеси.

Метод собственных векторов. Восстановление спектрального распределения ПОС проводится по формуле:

$$\varepsilon(\lambda_i) = \langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle + k_1 \Psi_1(\lambda_i) + k_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (3)$$

где $\varepsilon(\lambda_i)$ — восстановленные значения ПОС; $\langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle$ — средние значения ПОС (нулевой вектор); k_1 и k_2 — весовые коэффициенты; $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ — два первых ортогональных вектора; λ_i — длины волн, нм.

Величины $\langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle$, $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ взяты из работы [4]. Коэффициенты k_1 и k_2 выражения (3) определяются по измеренным значениям ПОС на длинах волн $\lambda_1 = 460$ нм и $\lambda_2 = 625$ нм из следующих условий:

$$\begin{cases} \varepsilon(460) = \langle \varepsilon(460) \rangle + k_1 \Psi_1(460) + k_2 \Psi_2(460) \\ \varepsilon(625) = \langle \varepsilon(625) \rangle + k_1 \Psi_1(625) + k_2 \Psi_2(625) \end{cases}$$

На рис. 1. приведены данные измерений СИПО-4 для одной из станций 87-го рейса и показан пример восстановленного спектрального распределения ПОС. Ошибка аппроксимации спектральной функции ПОС двумя собственными векторами составляет $0.018 (\ln) \text{ м}^{-1}$ [4], погрешность измерений ПОС — $0.015 (\ln), \text{ м}^{-1}$ [2].

Метод обращения спектрального распределения ПОС. По известному с достаточной дискретностью спектральному распределению ПОС определяется содержание взвеси и растворенного органического вещества, как это предложено в статье [3]. Аналитическое выражение ПОС с учетом оптически активных компонентов морской воды, влияющих на поглощение и рассеяние света, имеет следующий вид:

$$\varepsilon(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) + a_{\text{org}}(\lambda) + b_p(\lambda), \quad (4)$$

где $a_w(\lambda)$ и $b_w(\lambda)$ — поглощение и рассеяние чистой водой [5], $a_{\text{org}}(\lambda)$ — поглощение растворенными и взвешенными органическими компонентами, включая пигменты фитопланктона, $b_p(\lambda)$ — рассеяние взвесью. С использованием принятых в литературе параметризаций выражение (4) можно преобразовать как

$$\varepsilon(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) + a_{\text{org}}(400)e^{-S(\lambda-400)} + b_p(550)\left(\frac{550}{\lambda}\right)^n, \quad (5)$$

где неизвестными являются поглощение растворенным органическим веществом $a_{\text{org}}(400)$, рассеяние взвесью $b_p(550)$ и параметр n . Коэффициент $S = 0.018$ — по данным [6], с учетом соотношения растворенного органического вещества и детрита в Черном море. Поглощение пигментами фитопланктона в данной параметризации (5) не учитывается, т. к. оно меньше, чем поглощение растворенной органикой и существенно меньше, чем рассеяние. Параметр n выражает спектральную селективность рассеяния,

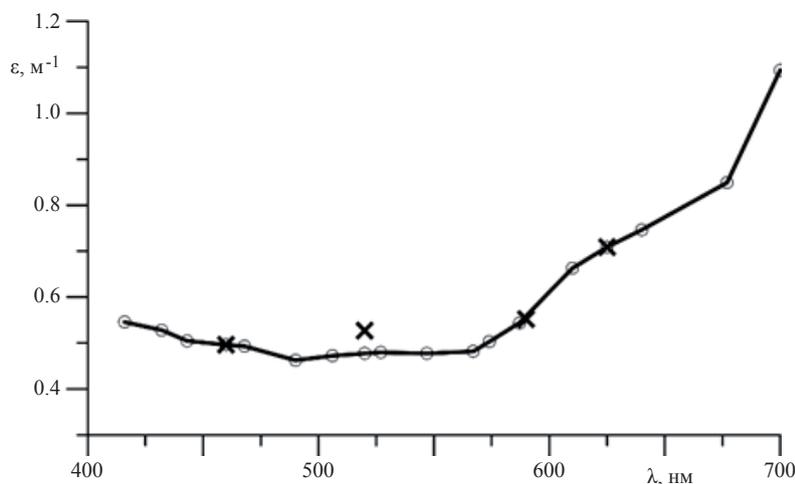


Рис. 1. Средние измеренные значения ПОС (крестики) и восстановленное спектральное распределение ПОС (кружки и линия), ст. № 22, 03.07.2016.

Fig. 1. The average measured values of BAC (crosses) and the retrieved spectral distribution of BAC (circles and line); st. № 22; July 3, 2016.

которая определяется соотношением концентраций крупной и мелкой фракции взвеси, а также их показателем преломления. В работе [7] было показано, что для мелких частиц (< 1 мкм) n равняется 1.7, а для крупных $n = 0.3$. Длина волны 550 нм обычно используется для определения рассеяния и обратного рассеяния, поскольку зеленая часть спектра мало подвержена влиянию поглощения фитопланктоном и растворенным органическим веществом.

Вычисление неизвестных параметров проводится путем аппроксимации экспериментальных данных функцией (5) методом наименьших квадратов в специально разработанной итерационной процедуре. Поскольку поглощение органическим веществом наиболее существенный вклад вносит в спектральном диапазоне до 490 нм, то в первом приближении определяются рассеяние взвесью $b_p(550)$ и параметр селективности n в диапазоне длин волн 506—700 нм без учета органического вещества. Затем в диапазоне длин волн 416—490 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. Найденные значения $a_{org}(400)$ и $b_p(550)$ непосредственно связаны с концентрациями растворенной органики и взвеси соответственно. Коэффициенты таких взаимосвязей можно определить, имея натурные данные измерений концентраций этих веществ. По данным [4] и оценкам авторов работы суммарная погрешность метода составляет около 15 %.

Полуаналитический алгоритм обработки спутниковых данных. В качестве альтернативного способа оценки рассеяния и поглощения морской водой использованы данные о коэффициенте яркости моря, полученные при помощи спутниковых сканеров цвета MODIS Aqua/Terra Level 2 (R_{rs} , *remote sensed reflectance*). Известно, что стандартные алгоритмы обработки спутниковых данных плохо работают в водах типа 2, таких как Черное море, поэтому от использования стандартных продуктов Level 3 в данной работе отказались. Данные Level 2 проходили дополнительную коррекцию [8], позволяющую снизить ошибки стандартной атмосферной коррекции, особенно в прибрежной зоне. Затем первичные оптические характеристики морской воды определялись при помощи разработанного ранее полуаналитического алгоритма [9].

В алгоритме используется биооптическая модель коэффициента яркости, связывающая его с отношением b_b/a , где b_b — обратное рассеяние морской воды, a — поглощение:

$$R_{rs}(\lambda) = k \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}.$$

Как правило, обратное рассеяние и поглощение представляются в виде суммы соответствующих компонентов, и спектр коэффициента яркости описывается следующей формулой:

$$R_{rs}(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + C_{ph} a_{ph}^*(\lambda) + a_{org}(400)e^{-S(\lambda-400)}},$$

где $k = 0.15/\pi$ [10]; $b_{bw}(\lambda)$ — обратное рассеяние чистой водой; v — спектральный наклон обратного рассеяния (параметр селективности), зависящий от размера частиц; $a_w(\lambda)$ — поглощение чистой морской водой [5]; $a_{ph}^*(\lambda)$ — спектр удельного поглощения пигментами фитопланктона [11]; S — спектральный наклон поглощения растворенной органики. Неизвестными параметрами являются: $b_{bp}(550)$ — показатель обратного рассеяния взвешенных частиц, C_{ph} — концентрация пигментов фитопланктона и $a_{org}(400)$ — поглощение растворенным органическим веществом. Поскольку обратное рассеяние более спектрально селективно, чем полное рассеяние, параметр v был определен равным 1.0 [1]. Значение другого входного параметра было принято $S = 0.018$, таким же как и в модели ПОС. Неверный выбор этого параметра оказывает наибольшее влияние на рассчитываемые значения концентрации пигментов фитопланктона, изменения S в пределах 0.015—0.025, наблюдающиеся в Черном море, влекут за собой изменения в результатах расчетов до 25 %. Тем не менее, рассчитываемые значения обратного рассеяния практически не подвержены этому влиянию, поэтому параметр S считался постоянным.

Неизвестные параметры вычислялись в итерационной процедуре, аналогичной той, что применялась в модели ПОС. Каждый параметр рассчитывался в том спектральном участке, где его вклад в входящую яркость максимален. Для расчета обратного рассеяния использовался диапазон 460—650 нм, канал 443 нм — для расчета поглощения пигментами фитопланктона и канал 412 нм — для определения поглощения растворенным органическим веществом. В каждом участке минимизация выполняется по

одной переменной, в то время как остальные считаются постоянными. Такой метод позволяет упростить вычисления и стабилизировать решение обратной задачи.

Результаты и обсуждение

Концентрация взвеси. На рис. 2 представлена зависимость между концентрацией взвеси C_p , рассчитанной по формуле (2), и рассеянием $b_p(550)$, рассчитанным по модели ПОС. Наблюдается высокая корреляция между данными величинами ($R = 0.98$). Это косвенно свидетельствует об эффективности обоих методов расчетов.

Эмпирические формулы, как более простые, могут использоваться в случаях, когда задача заключается в определении только концентраций взвешенного вещества. Аналитический же метод позволяет также, при наличии достаточного числа измерений в спектральном диапазоне, определять помимо рассеивающих свойств и поглощение органическим веществом.

Характеристики рассеяния. Пространственное распределение рассеяния, рассчитанного по натурным данным с использованием модели ПОС, и обратного рассеяния по спутниковым данным показано на рис. 3 (см. вклейку). Естественно, нельзя ожидать сильной корреляции между ними, поскольку она обусловлена размерным составом частиц, однако основные структурные особенности обоих распределений должны быть сходны. Контурные показывают осредненное распределение рассеяния, цветные врезки демонстрируют мгновенные распределения обратного рассеяния, полученные по дистанционным данным в конкретный день, указанный вверху карты.

Наблюдается вполне логичное распределение, где максимумы рассеяния, а, следовательно, и концентрации частиц, лежат в прибрежной зоне, значения уменьшаются с удалением от берега. Структурно сходное распределение наблюдается на карте обратного рассеяния, полученного по дистанционным измерениям.

В летний период (рис. 3, вверху) наблюдается сильная пространственно-временная изменчивость благодаря процессам переноса примеси течениями и вихрями. Хорошо заметен поток с большими концентрациями взвешенного вещества, распространяющийся от Керченского пролива (верхний правый угол карты) в западном направлении. Это выходящие через Керченский пролив мутные воды Азовского моря, в том числе образовавшиеся вследствие масштабных строительных работ, которые попадают в Основное черноморское течение и движутся с его водами на запад.

В осенний период распределение примеси стало более однородным (рис. 3, внизу) из-за ослабления процессов перемешивания и транспорта примеси, а значения рассеяния снизились благодаря уменьшению поступления примеси из антропогенных источников и с речным стоком.

Полученные значения рассеяния и обратного рассеяния являются типичными для Черного моря: величины $b_p(550)$ лежат в пределах 0.2—0.5 м⁻¹, величины $b_{bp}(550)$ в пределах 0.003—0.010 м⁻¹ [12, 13]. Расчет параметра n в уравнении (6), определяющего спектральную зависимость рассеяния, дает среднее значение 0.62 ± 0.26 , что свидетельствует о среднем размере частиц менее 1 мкм, и, таким образом, о значительной доле мелкой взвеси.

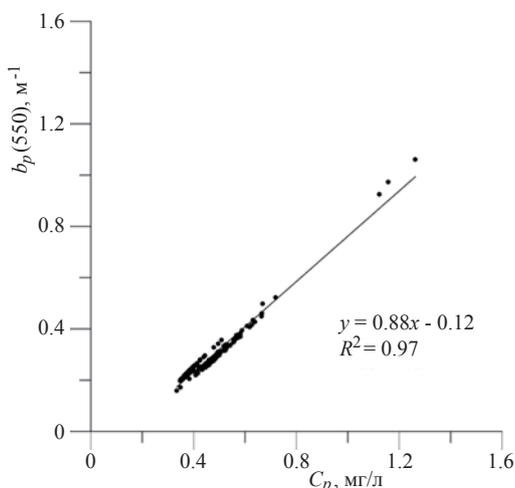


Рис. 2. Связь концентрации взвеси C_p , рассчитанной по формуле (2), и рассеяния $b_p(550)$, рассчитанного по модели ПОС (точки). Прямая линия — уравнение регрессии.

Fig. 2. Relation between suspended matter concentration C_p from eq. (2) and suspended matter scattering $b_p(550)$ calculated from BAC (circles). Straight line shows regression.

Поглощение растворенным органическим веществом. На рис. 4 (см. вклейку) показаны пространственные распределения растворенного органического вещества, полученные по данным измерений ПОС (контуры) и в результате обработки спутниковых данных сканера MODIS-Aqua и Terra (цветные врезки). Наблюдается определенное структурное соответствие между значениями, полученными разными методами. Повышенные величины поглощения органикой наблюдаются ближе к берегу и на шельфе (северо-западная и северо-восточная части исследуемого полигона).

Поглощение неживой органикой $a_{\text{org}}(400)$ в среднем составляет $0.14 \pm 0.08 \text{ м}^{-1}$, причем в летний сезон значения примерно вдвое ниже, чем в осенний: $0.09 \pm 0.03 \text{ м}^{-1}$ и $0.20 \pm 0.08 \text{ м}^{-1}$ соответственно, что согласуется с данными работы [14]. Такое возрастание значений может быть связано с увеличением в осенний период речного стока, который служит основным источником поступления растворенного органического вещества, а также с осенним пиком цветения фитопланктона, в результате которого образуется продукт его жизнедеятельности – растворенное органическое вещество. При пересчете к длине волны 440 нм для сравнения с данными работы [14] получены значения 0.07, 0.04 и 0.10 м^{-1} соответственно, что лежит в пределах наблюдавшихся значений суммы поглощения растворенным и взвешенным органическим веществом (детритом).

Оценка вклада поглощения растворенного органического вещества в ПОС на длине волны 416 нм составила в среднем 20 % в июле и 38 % в октябре (для диапазона $\varepsilon(527) = 0.210\text{—}0.640 \text{ м}^{-1}$). Это хорошо согласуется с оценками из работы [1], где для диапазона значений $\varepsilon(527) = 0.250\text{—}0.630 \text{ м}^{-1}$ вклад поглощения растворенной органики на $\lambda = 416 \text{ нм}$ составил 20—33 %. Такая ситуация показывает, что в летний сезон оптические свойства морской воды в основном определяются взвесью, а в осенний сезон возрастает влияние органического вещества.

Совместный анализ контактных и спутниковых данных. Рассчитанные по данным измерений СИПО-4 значения поглощения растворенного органического вещества и рассеяния взвесью были сопоставлены с результатами обработки спутниковых данных сканера MODIS (рис. 5). Для сравнения отбирались данные, совпадающие по координате до 0.005° и по времени до 3 ч. По различным причинам (облачность, несоответствие координат и т. д.) количество случаев, когда можно провести такое сопоставление, значительно меньше количества выполненных натуральных измерений (около 40). В целом, получено достаточно хорошее согласование данных спутниковых и натуральных измерений, особенно для рассеяния взвешенным веществом. Коэффициенты корреляции составили: $R = 0.78$ для поглощения органическим веществом и $R = 0.87$ для рассеяния взвесью. Причины того, что корреляция ниже для

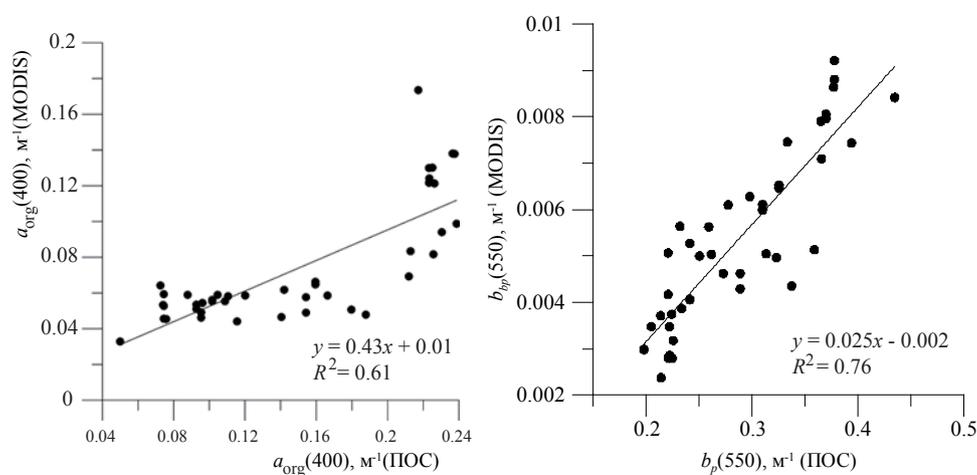


Рис. 5. Сопоставление (точки) поглощения растворенного органического вещества, рассчитанного по данным ПОС и по спутниковым данным (слева), и сопоставление (точки) рассеяния взвесью, рассчитанного по данным ПОС, и обратного рассеяния, полученного по спутниковым данным (справа). Прямые линии — уравнения регрессии.

Fig. 5. Comparison (circles) of dissolved organic matter absorption ($\lambda = 400 \text{ nm}$), calculated according to BAC and from satellite data (left); comparison (circles) of the suspended matter scattering calculated according to BAC and backscattering obtained from satellite data (right). Straight lines show regression.

органического вещества, состоят в использовании метода собственных векторов для восстановления коротковолновой части спектра ПОС — сделанные допущения вносят дополнительную погрешность в восстановление, помимо неполного соответствия реальным условиям моделей обращения спектров.

Значения $b_p(550)$ и $b_{bp}(550)$ позволяют оценить вклад обратного рассеяния $\tilde{b} = b_{bp} / b_p$ на длине волны 550 нм. Это отношение несет информацию о распределении частиц по размеру и типу частиц. Оно обычно увеличивается с долей мелких (< 1 мкм) частиц, поскольку они дают значительное рассеяние в обратном направлении по сравнению с крупными частицами. Кроме того, вклад обратного рассеяния является функцией показателя преломления частиц [15]: было показано, что \tilde{b} обычно возрастает с увеличением доли частиц с высоким показателем преломления. Таким образом, вклад обратного рассеяния является ключевым параметром, характеризующим морскую взвесь.

Рассчитанные в данной работе значения \tilde{b} достаточно высоки: 0.018 ± 0.003 . Они превышают типичные параметры для биологических частиц (клеток микроводорослей), которые имеют размеры > 1 мкм, показатель преломления, равный 1.05, и вклад обратного рассеяния около 0.005, но при этом соответствуют данным, полученным для Черного моря в натурном эксперименте [12]. Таким образом, наши расчеты предполагают, что основное влияние на оптические свойства исследуемого полигона имеет минеральная взвесь.

Для подтверждения этой оценки была использована модель Twardowski et al. [15], связывающая показатель преломления n_p с вкладом обратного рассеяния :

$$n_p(\tilde{b}) = 1 + 1.671\tilde{b}^{0.582}.$$

Показатель преломления изменялся в пределах от 1.12 до 1.19 со средним значением 1.16 ± 0.02 , что соответствует свойствам минеральных частиц, типичных для моря, таких как кварц ($n_p = 1.15$).

Значения $b_p(550)$ и $b_{bp}(550)$ также дают возможность оценить коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния K , исходя из соотношения $b_p(550)/b_{bp}(550) = 1 + K$.

Полученные величины K лежат в диапазоне значений от 40 до 89. По данным измерений индикатрисы рассеяния света в глубоководной области Черного моря [1, табл. 2.11] получены близкие значения K (от 44 до 82).

Все рассмотренные характеристики, рассчитанные по спутниковым и контактными данным, приведены в табл. 1. Состояние вод моря в летний и осенний сезоны различается по ряду показателей, отражающих сезонную изменчивость гидрооптических характеристик.

В работе получены оценки характеристик взвеси, растворенного органического вещества и их пространственно-временные распределения, рассчитанные по спутниковым и контактными данным, для северной части Черного моря в июле и октябре 2016 года. Наблюдается хорошее соответствие между результатами расчетов различными методами. Значения рассеяния, обратного рассеяния и поглощения

**Средние значения характеристик взвеси и растворенного органического вещества
в 87-м и 89-м рейсах «Профессор Водяницкий»**

**The average characteristics of suspended matter and dissolved organic matter
in 87th and 89th cruises of R/V «Professor Vodyanitsky»**

Параметр	87-й рейс	89-й рейс
$a_{\text{орг}}(400), \text{ м}^{-1}$	0.09 ± 0.03	0.20 ± 0.08
$C_p, \text{ мг/л}$	0.50 ± 0.07	0.41 ± 0.16
$b_p(550), \text{ м}^{-1}$	0.31 ± 0.06	0.26 ± 0.15
$b_{bp}(550), \text{ м}^{-1}$	0.0062 ± 0.0012	0.0031 ± 0.0014
n	0.61 ± 0.31	0.62 ± 0.17
\tilde{b}	0.020 ± 0.003	0.012 ± 0.002
K	51 ± 9	82 ± 11
$n_p(\tilde{b})$	1.17 ± 0.02	1.14 ± 0.01

растворенной органикой являются типичными для Черного моря. Показано, что основное влияние на оптические свойства вод в исследуемом районе оказывает минеральная взвесь.

Предложен метод оперативной оценки содержания взвеси и растворенного органического вещества в водах Черного моря. Для его реализации необходимо иметь измеренные величины ПОС на двух длинах волн спектра (в коротковолновом и длинноволновом участках). Используемая при расчете методика разделения спектрального диапазона на области, соответствующие доминирующему влиянию того или иного вещества, а также итерационная процедура оптимизации позволяет упростить расчеты и стабилизировать решение задачи.

Полученные таким образом оценки содержания растворенного органического вещества и взвеси непосредственно связаны с концентрациями этих веществ. Коэффициенты таких связей могут быть установлены при проведении синхронных натуральных измерений ПОС и концентраций органики и взвеси. При наличии эмпирических соотношений для вод Черного моря, построенных на данных наблюдений последних лет, возможно проводить мониторинг концентрации взвеси и органического вещества на основе измерений ПОС в рейсах, а также, используя связь между *in situ* и спутниковыми данными, оперативно оценивать содержание взвеси и органического вещества по спутниковым данным.

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по темам № 0827-2018-0002 и № 0827-2018-0004.

Литература

1. Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. 90 с.
2. Латушкин А. А. Многоканальный измеритель коэффициента ослабления света для проведения океанографических подспутниковых исследований // Материалы междунауч.-техн. конф. молодых уч., аспирантов и студентов. «Современные технологии проектирования управляющих и мехатронных систем». Севастополь: Изд. СевНТУ, 2013. С. 231—236.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана. Гл. 8. / Отв. ред. А. С. Монин. М.: Наука, 1983. 372 с.
8. Корчемкина Е. Н., Шибанов Е. Е., Лу М. Е. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 24—30.
9. Лу М. Е., Шибанов Е. Б., Корчемкина Е. Н., Мартынов О. В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17—33.
10. Шибанов Е. Б. Численный метод решения уравнения переноса. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 62—71.
11. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, C7. P. 13,321—13,332.
12. Chami M., Shybanov E. B., Churilova T. Y., Khomenko G. A., Lee M. E.-G., Martynov O. V., Berseneva G. A., Korotaev G. K. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, C11020.
13. Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Буренков В. И. Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 7—16.
14. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Джулай А. А., Мончева С., Слабакова В., Кривенко О. В., Ефимова Т. В., Салюк П. А. Региональный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а» и коэффициента поглощения света неживым органическим веществом на длине волны 490 нм в Черном море для спектральных каналов цветковых сканеров MODIS и MERIS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2014. № 28. С. 303—319.
15. Twardowski M. S., Boss E., Macdonald J. B., Pegau W. S., Barnard A. H., Zaneveld J.R.V. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, C7. P. 14,129—14,142.

К статье Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Оценка содержания взвеси...

Korchetkina E. N., Mankovskaya E. V. Estimation of organic...

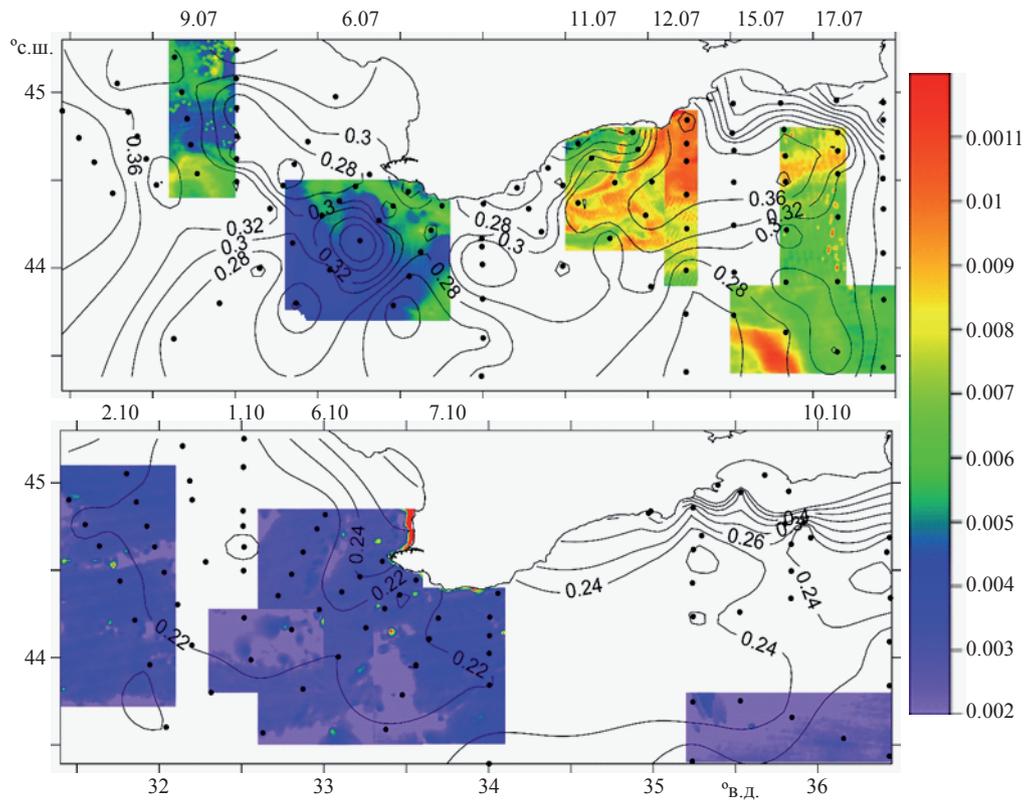


Рис. 3. Рассчитанное по измерениям ПОС рассеяние взвесью $b_p(550)$ (m^{-1}) — контуры, и восстановленное по спутниковым данным распределение обратного рассеяния $b_{bp}(550)$ (m^{-1}) — цветные врезки. Вверху карты указаны даты спутниковых измерений.

Fig. 3. Distribution of suspended matter scattering and backscattering. Contours show averaged distribution of scattering, $b_p(550)$ (m^{-1}), calculated from BAC. The colored patches are instantaneous distributions of $b_{bp}(550)$ (m^{-1}), according to satellite data on a particular day indicated at the top of the map.

К статье Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Оценка содержания взвеси...

Korchemkina E. N., Mankovskaya E. V. Estimation of organic...

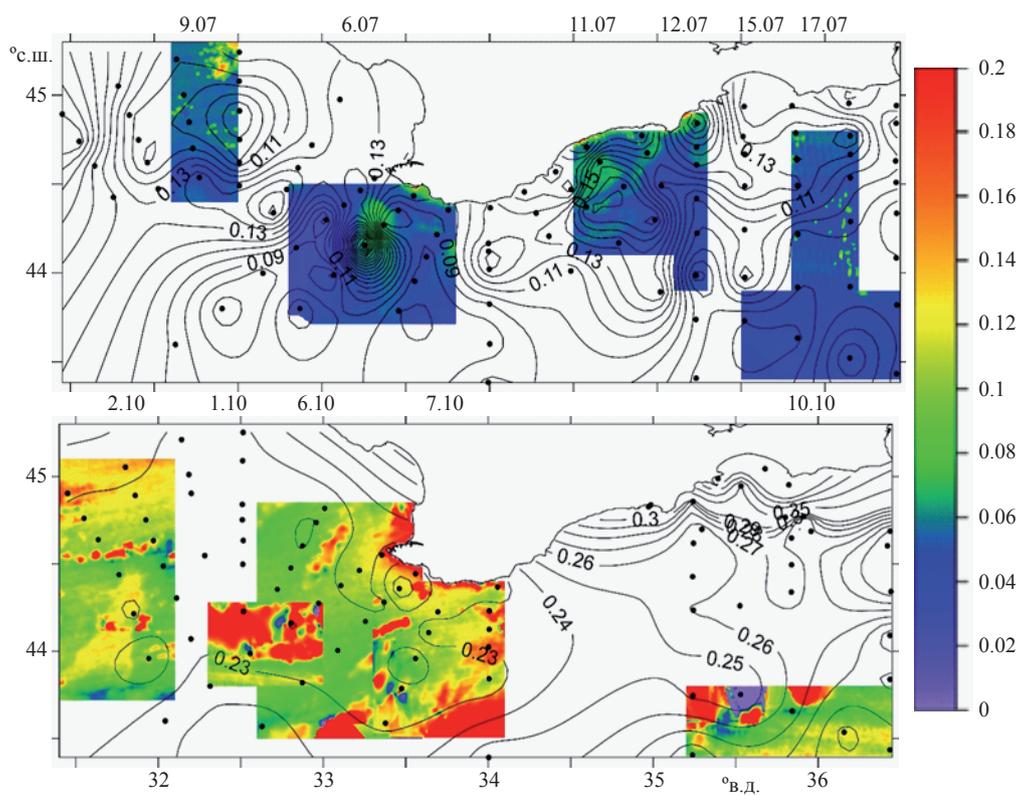


Рис. 4. Распределение поглощения растворенным органическим веществом $a_{\text{org}}(400)$ (m^{-1}).
Контурсы — осредненные значения, рассчитанные по данным ПОС. Цветные врезки —
моментальные значения по спутниковым данным в конкретный день, указанный сверху карты.

Fig. 4. Distribution of dissolved organic matter absorption $a_{\text{org}}(400)$ (m^{-1}).
Contours show averaged distribution calculated from BAC. The colored patches are instantaneous
distributions according to satellite data on a particular day indicated at the top of the map.