

УДК 551.463.5

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

© 2023 г. Б. В. Коновалов*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

*e-mail: bvkonovalov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.07.2021 г.

После доработки 28.01.2022 г.

Принята к публикации 13.07.2022 г.

На основе анализа материалов 20-ти экспедиций ИО РАН, проведенных в различных районах прибрежной зоны российского сектора Черного моря в период с 1999 по 2021 гг., получены эмпирические уравнения связи между глубиной видимости белого диска Z_6 и массовыми концентрациями общего взвешенного вещества (ВВ) и ее минеральной (ВМВ) и органической (ВОВ) фракций (Свв, Свмв и Свов соответственно). Значения Z_6 зафиксированы в диапазоне от 0.1 до 21 м, концентрации ВМВ – от 0.11 до 104 мг/л, ВОВ – от 0.09 до 2.0 мг/л и хлорофилла a (Сха) – от 0.03 до 4.4 мкг/л. Проведена оценка погрешности при расчетах по указанным уравнениям. Коэффициенты детерминации $r^2 \approx 0.85$ (для \lg Свв и \lg Свмв) и 0.72 (для \lg Свов). Выявлено влияние концентрации ВОВ на точность расчета Свмв и концентрации хлорофилла a на точность расчета Свов. Сделан вывод о возможности использования эмпирических формул, относящихся ко всему массиву, для расчета концентраций указанных фракций взвеси на всей исследованной акватории. Предложено рассматривать метод оценки содержания фракций взвеси на основе полученных эмпирических уравнений в качестве регионального варианта метода пассивного зондирования верхнего слоя моря с использованием белого диска.

Ключевые слова: Черное море, пассивное зондирование, белый диск, минеральная взвесь, органическая взвесь

DOI: 10.31857/S0030157423010057, **EDN:** ANHZYP

ВВЕДЕНИЕ

Измерение максимальной глубины видимости белого диска Z_6 , которая считается количественной мерой относительной прозрачности воды, является основой одного из методов пассивного зондирования верхней толщи морских и пресноводных бассейнов. Метод широко используется при изучении световых полей и для определения некоторых гидрооптических характеристик. Привлекательность его – в простоте использования и низкой стоимости, и часто результаты измерений прозрачности этим методом являются единственным источником информации об оптических свойствах водоема.

С конца 19-го века метод определения относительной (условной) прозрачности воды с помощью белого диска был рекомендован в качестве стандартного. Белый диск был назван по имени и в честь итальянского священника – профессора П.А. Секки (Pietro Angelo Secchi) в связи с тем, что Секки впервые на основе изучения массива данных регулярных натуральных измерений, проведенных под руководством Чиальди [27], тщатель-

но проанализировал влияние на видимость диска многочисленных факторов [28].

В научной литературе (как в отечественной, так и в зарубежной) бытует представление о том, что такие измерения впервые были проведены в период с 1815 по 1818 гг. во время второго кругосветного плавания на бриге “Рюрик” под командованием лейтенанта Отто Коцебу. Однако более чем за 60 лет до той экспедиции, в которой были проведены работы под руководством П.А. Секки, и за 12 лет до экспедиции на бриге “Рюрик” подобные регулярные измерения прозрачности проводились во время первой русской кругосветной экспедиции в период с 1803 по 1806 гг. Члены экспедиции швейцарский ученый (математик, физик, астроном), будущий иностранный член-корреспондент Российской Императорской Академии Наук Иоганн Каспар Горнер вместе со своим помощником лейтенантом Ермолаем Левенштерном “...измеряли прозрачность морской воды в Атлантике с помощью обычной фаянсовой тарелки, прикрепленной к лоту” [15 (цит. по [21]), 31]. Причины, по которым публикации И. Горнера в

период с 1804 по 1806 гг. не были введены в научный оборот ни в России, ни за рубежом и о них случайно стало известно лишь спустя 200 лет, обсуждаются в упомянутой работе [21].

Во второй кругосветной экспедиции под командованием Отто Коцебу И. Горнер был ее научным руководителем и разработчиком научной части программы. В его инструкции впервые была изложена и сама идея измерения прозрачности воды с помощью белого диска, и варианты ее реализации в экспедиционных работах [3]. Дополнительная информация по истории применения белого диска содержится в публикациях [23, 29, 37].

В настоящее время количество измерений прозрачности воды с использованием белого диска исчисляется миллионами, а число публикаций, в которых изложены различные методики расчета некоторых гидрооптических характеристик по значению относительной прозрачности воды Z_6 , измеряется многими десятками. В некоторых работах проведен строгий анализ теоретической зависимости величины Z_6 от первичных гидрооптических характеристик и условий наблюдения и разработана теория белого диска (см., например, [17, 29, 32, 33, 36]), в большинстве же публикаций предлагаются относительно простые эмпирические формулы, как правило, применимые лишь для стандартизованных условий [1, 11, 14, 26, 29, 30].

Целью настоящей работы является попытка оценить возможность решения “обратной задачи”. В ней не исследуется влияние на прозрачность воды присутствия в ней оптически активных взвешенных или растворенных веществ, как это делается в упомянутых публикациях, а, наоборот, ставится задача по ее значению оценить содержание в воде некоторых веществ, в частности, концентрации общей взвеси и ее фракций (минеральной и органической), используя при этом опосредованные, статистически достоверные связи между ними и прозрачностью воды.

Впервые количественная оценка зависимости между относительной прозрачностью воды и содержанием в ней взвеси проведена в работе [8]. В этой работе отмечено, что вообще изучению прозрачности морской воды посвящены сотни работ, и только в некоторых из них было указано на существование зависимости прозрачности воды от содержания в ней взвешенных веществ [1, 6, 7, 9, 14, 24, 25, 28, 34, 38]. Однако ни в одной из этих работ, в отличие от работы [8], не было сделано попытки количественно охарактеризовать указанную зависимость. Определения были проведены осенью 1946 г. на 23 станциях в прибрежных водах Каспийского моря в предустьевой зоне р. Куры. Прозрачность была в диапазоне от 2 см до 9 м, концентрация взвеси – от 2.4 до 1568 мг/л. Можно отметить, что методика определения концентрации взвеси, использованная в работе [8],

во многом отличалась от современной (двукратным 20-минутным кипячением фильтров, двукратным фильтрованием, неконтролируемым перепадом давления при фильтровании, продолжительным хранением фильтров перед анализом).

В работах [2, 18, 22] для нескольких акваторий также проведен анализ и обобщение результатов количественной оценки связи между содержанием общей взвеси и относительной прозрачностью. Оказалось, что указанная связь во всех случаях может быть выражена линейным уравнением вида

$$\lg C_{\text{ВВ}} = a + b \lg Z_6, \quad (1)$$

где a в различных акваториях менялось от 0.66 до 1.17 и b – от 0.84 до 1.29. Уравнение из работы [22] как наиболее статистически обеспеченное помещено в табл. 2.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В морских экспедициях, проведенных ИО РАН в Черном море в период с 1999 по 2021 гг., была измерена относительная прозрачность воды по белому диску Z_6 , а также определены концентрации хлорофилла ($C_{\text{Ха}}$) и взвешенных веществ органического ($C_{\text{Вов}}$) и минерального ($C_{\text{Свмв}}$) происхождения. Всего проведено 373 комплексных измерения. Районы и сроки проведения экспедиций указаны в табл. 1. Диапазоны изменения измеренных показателей: $0.1 \leq Z_6 \leq 21$ м; $0.11 \leq C_{\text{Свмв}} \leq 104$ мг/л; $0.09 \leq C_{\text{Вов}} \leq 2.0$ мг/л; $0.03 \leq C_{\text{Ха}} \leq 4.4$ мкг/л. Относительная концентрация ВОВ в общей взвеси $C_{\text{Вов}}^{\text{отн}}$ менялась почти в 50 раз (от 1.1 до 48.7%).

Относительная прозрачность измерялась по максимальной глубине видимости белого диска Z_6 в соответствии методическими рекомендациями в публикациях [5, 10, 20, 35]. Следует отметить, что при измерении прозрачности в очень мутных водах (видимость диска менее 1–1.5 м) или в водах с очень высокой прозрачностью (видимость диска превышает 40–50 м) к указанным рекомендациям необходимо добавить дополнительные требования. В первом случае измерения желательно проводить со шлюпки, а при отсутствии такой возможности – при волнении, не превышающем 1-го балла, минимальной бортовой качке судна и многократности повторных отсчетов. Во втором случае из-за уменьшения углового размера диска и ухудшения его видимости необходимо использовать диск соответственно увеличенного диаметра.

Пробы воды отбирались ведром из подповерхностного водного слоя. Фильтрование проводилось на стекловолоконистые фильтры диаметром 47 мм марки GF/F фирмы Whatman. Перепад давления при фильтровании составлял 0.2 атм. Объ-

Таблица 1. Номера экспедиций, даты, районы проведения работ, расстояния до берега и диапазоны изменения Z_6

№ эксп.	Даты	Районы работ	Расстояние до берега, км	Диапазон изменения Z_6 , м
1	1999 сент., 1999 окт.	Прибрежные воды вблизи г. Геленджик	0.05–8.5 0.1–9.3	11–17 4.5–15.5
2	Май 2007	Приустьевые зоны рек Ашамба, Вулан, Мзымта, Пшада, Сочи, Туапсе	0.02–2.5	0.2–12.8
3	Май 2008	Приустьевая зона р. Вулан	0.08–2.2	2–7
4	Май 2009	Приустьевая зона р. Кудепста	0.05–1.7	0.5–6.7
5	Май 2010	Приустьевая зона рек Кудепста и Мзымта	0.05–1.8	0.6–5.5
6	Май 2011	Приустьевая зона р. Мзымта	0.05–2.0	0.3–3
7	Май 2013	Приустьевая зона рек Битха и Мзымта	0.05–1.7	0.3–7.5
8	Май 2014	Приустьевая зона рек Битха, Кудепста, Мзымта и Сочи	0.05–2.0	1–6.2
9	Май 2015	Феодосийский залив	0.06–7.0	5.5–15
10	Май 2015	Приустьевая зона р. Мзымта	0.05–2.0	0.1–5.5
11	Май 2016	Феодосийский залив	0.05–10.5	4.5–11.5
12	Сент. 2016	Феодосийский залив	0.05–9.1	7–21
13	Май 2017	Феодосийский залив	0.1–4.2	5–8
14	Май–июнь 2018	Прибрежные воды вблизи г. Туапсе и пос. Лазаревское	0.15–0.8	4.5–8
15	Авг.–сент. 2018	Прибрежные воды Абхазии	0.05–0.3	4–5
16	Апр. 2019	Керченский пролив и прибрежная акватория к югу от п-ва Крым	0.05–7.5	1.5–12.5
17	Апр. 2019	Приустьевой р-н р. Кодор	0.05–0.7	2–4.5
18	Сент. 2019	Керченский пролив и прибрежная акватория к югу от пролива	0.05–6.5	1.8–14.5
19	Июль 2020	Керченский пролив и прибрежная акватория к югу от п-ва Крым	0.05–7.5	3.5–10.8
20	Сентябрь 2021	Прибрежные воды вблизи г. Геленджик	0.05–2.0	1.1–8.0

ем профильтрованной воды в зависимости от ее мутности варьировался от 0.2 до 5 литров. Каждый фильтр использовался для определения всех трех характеристик $S_{\text{ха}}$, $S_{\text{вов}}$ и $S_{\text{вмв}}$.

Описание методики фотометрирования фильтров и расчета концентраций компонентов взвеси содержится в работе [13]. Формулы для расчета в этой работе были получены при сопоставлении результатов оптического метода измерений (по спектру показателя поглощения света взвесью, осажденной на фильтр [12]) с данными прямого (весового) метода оценки концентраций (в мг/л). Материалом для указанного сопоставления послужили данные комплексных измерений в семи морских экспедициях в различные районы Мирового океана.

Концентрация общей взвеси рассчитывалась как сумма концентраций ее компонентов. Концентрация хлорофилла a определялась по стандартной спектрофотометрической методике [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты представлены на 7-ми рисунках и в 3-х таблицах. Во всех публикациях, обзор которых содержится во Введении, анализируется связь между относительной прозрачностью и массовой концентрацией общей взвеси. В нашей работе установлена связь прозрачности не только с концентрацией общей взвеси, но также и с концентрациями ее фракций (минеральной и органической). Дополнительно выявлены изменения зависимости попарных связей $\lg Z_6 = f(\lg C_{\text{ВМВ}})$ и $\lg Z_6 = f(\lg S_{\text{вов}})$ от значений третьих показателей (см. ф-лы (3) и (7) и рис. 2 и 4).

В работе [18] также количественно оценена связь между относительной прозрачностью и концентрациями фракций взвеси. Исследования проведения на оз. Байкал. Их результаты для сравнения с нашими также показаны на рис. 1 и 3. Расхождения (минимальные для минеральной фракции и существенные для органической) можно объяснить отличием относительного содержания орга-

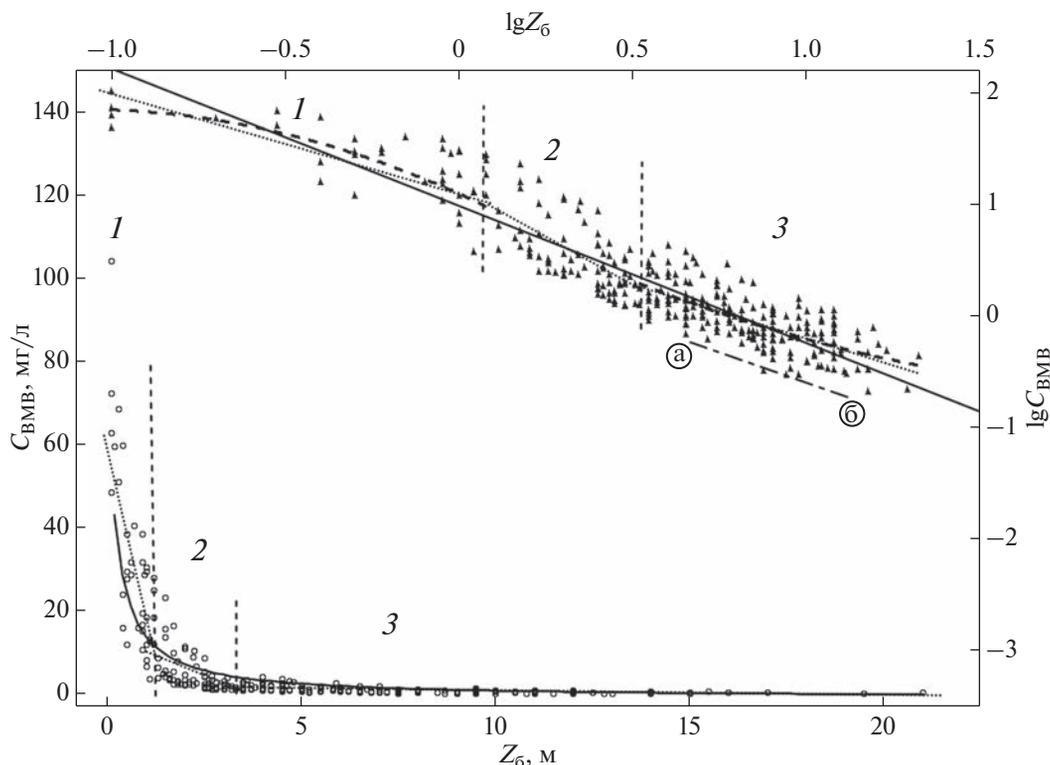


Рис. 1. Связь между концентрацией взвешенного минерального вещества $C_{\text{ВМВ}}$ и относительной прозрачностью воды Z_6 . Сплошные линии – графики функций $\lg C_{\text{ВМВ}} = f(\lg Z_6)$ и $C_{\text{ВМВ}} = f(Z_6)$. Линии точками – линейные графики локальных аппроксимаций. Пунктирные кривые – квадратичные графики локальных аппроксимаций. Вертикальные пунктирные линии – границы между интервалами локальных аппроксимаций. 1, 2 и 3 – номера интервалов. Штрихпунктирная прямая между точками а и б – из работы [18]. Пояснения – в тексте.

ники в пресных водах оз. Байкал по сравнению с черноморскими. Например, при видимости диска 5 м на оз. Байкал величина $C_{\text{ВОВотн}}$ более чем втрое превышает прибрежно-черноморскую.

Ниже анализируются связи между прозрачностью и концентрациями каждой из фракций.

Результаты анализа связей *минеральной* фракции взвеси с прозрачностью показаны на рис. 1 и 2. В верхней части рис. 1 представлен график, отражающий линейную связь между логарифмами величин Z_6 и концентраций $C_{\text{ВМВ}}$ для всего массива данных. В нижней части рисунка для сравнения представлена связь между натуральными значениями $C_{\text{ВМВ}}$ и $C_{\text{Хв}}$. Видно, что при переходе от наиболее мутных вод к водам наиболее прозрачным характер связи существенно меняется. При этом можно выделить три интервала значений Z_6 (для мутных, прозрачных и промежуточных вод), в пределах каждого из которых связь можно аппроксимировать прямой линией, а весь график – гиперболой. Можно показать, что оптимальные положения границ между ними соответствуют значениям Z_6 , равным 1.2 и 3.3 м. На этих границах значения $C_{\text{ВМВ}}$ совпадают для графиков

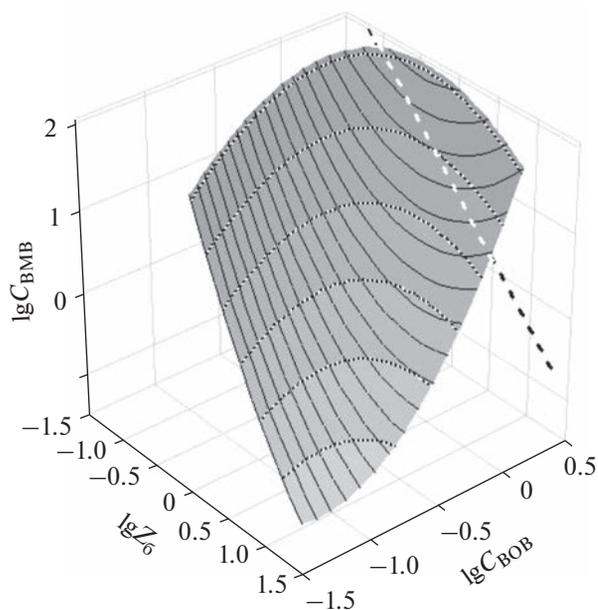


Рис. 2. График функции $\lg C_{\text{ВМВ}} = f(\lg Z_6, \lg C_{\text{ВОВ}})$. Пунктир – график функции $\lg C_{\text{ВМВ}} = f(\lg Z_6)$ (см. формулу (2) и рис. 1) на плоскости YZ .

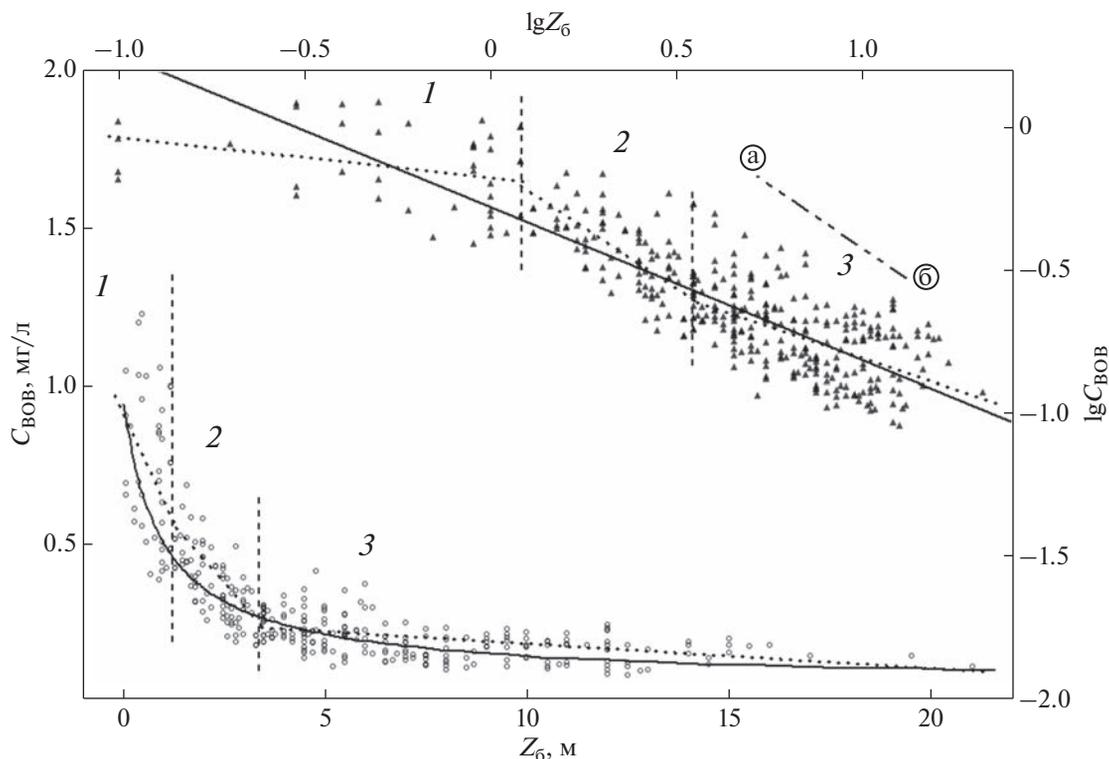


Рис. 3. Связь между концентрацией взвешенного органического вещества C_{BOB} и относительной прозрачностью воды Z_6 . Сплошные линии – графики функций $\lg C_{\text{BOB}} = f(\lg Z_6)$ и $C_{\text{BOB}} = f(Z_6)$. Линии точками – линейные графики локальных аппроксимаций. Вертикальные пунктирные линии – границы между интервалами локальных аппроксимаций. 1, 2 и 3 – номера интервалов. Штрихпунктирная прямая между точками а и б – из работы [18]. Пояснения – в тексте.

смежных интервалов. При проведении локальных аппроксимаций связей между $\lg C_{\text{BMB}}$ и $\lg Z_6$ границы между интервалами находятся при значениях $\lg Z_6$, равных 0.079 и 0.519.

Следует отметить, что положения линий регрессии для отдельных экспедиций в большинстве случаев не совпадали со средней линией. При этом чем более строго по направлению распространения речного плюма располагались точки отбора проб и зондирования диском, тем выше были значения коэффициента корреляции. На отдельных акваториях их значения могли находиться в широких пределах (от 0.2 до 0.95). Аналитическое выражение осредненного графика выглядит следующим образом:

$$\lg C_{\text{BMB}} = 1 - 1.24 \lg Z_6 \quad (r^2 = 0.85) \quad (2)$$

(r^2 – коэффициент детерминации).

На рис. 2 – трехмерный график зависимости $\lg C_{\text{BMB}}$ от двух показателей: $\lg Z_6$ и $\lg C_{\text{BOB}}$. Она может быть выражена квадратным уравнением с тремя переменными:

$$\lg C_{\text{BMB}} = 1.2 + 1.4 \lg C_{\text{BOB}} - 0.38 \lg Z_6 + 1.4 (\lg C_{\text{BOB}})^2 + 1.6 \lg C_{\text{BOB}} \lg Z_6 + 0.49 (\lg Z_6)^2. \quad (3)$$

Можно отметить, что положения линий регрессии, отражающей связь между $\lg C_{\text{BMB}}$ и $\lg Z_6$, для разных $\lg C_{\text{BOB}}$ различаются. При малых концентрациях органической фракции взвеси – это практически прямая линия, незначительно отличающаяся от средней для всего массива. При средних и тем более высоких концентрациях указанная линия заметно искривляется, в особенности в наиболее прозрачных водах.

Как показал анализ полученных нами данных, кроме зависимости прозрачности от концентраций ее фракций существуют также и тесные связи между ними, т.е.:

$$\lg C_{\text{BMB}} = 1.77 + 2.6 \lg C_{\text{BOB}}, \quad (r = 0.81), \quad (4)$$

$$\lg Z_6 = -0.16 + 0.75 \lg C_{\text{BOBотн}}, \quad (r = 0.72), \quad (5)$$

где r – коэффициент корреляции. Наличием этих связей, по-видимому, и можно объяснить криволинейную форму трехмерного графика на рис. 2.

Результаты анализа связей *органической* фракции с прозрачностью представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3, аналогично рис. 1, в верхней части показана связь между логарифмами Z_6 и C_{BOB} , а в нижней – между их натуральными значениями.

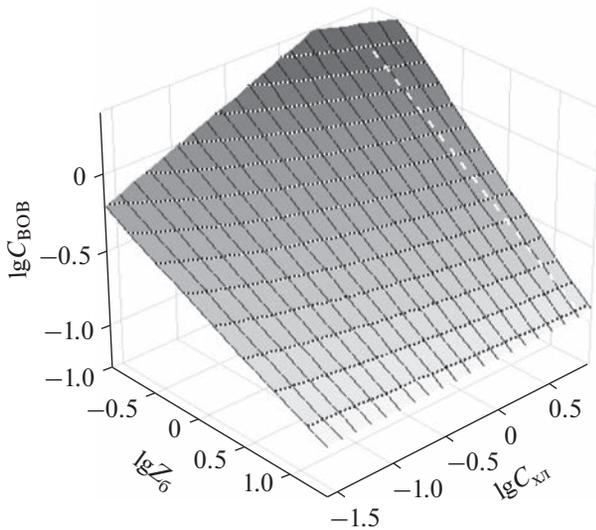


Рис. 4. График функции $\lg C_{\text{BOB}} = f(\lg Z_6, \lg C_{\text{Хл}})$. Пунктир – график функции $\lg C_{\text{BOB}} = f(\lg Z_6)$ (см. формулу (6) и рис. 3) на плоскости YZ.

Верхний график можно аппроксимировать линейным уравнением

$$\lg C_{\text{BOB}} = -0.29 - 0.49 \lg Z_6 \quad (r^2 = 0.71). \quad (6)$$

На трехмерном графике (рис. 4) видно, как на связь между $\lg C_{\text{BOB}}$ и $\lg Z_6$ влияют изменения $\lg C_{\text{Хл}}$.

Данная трехсторонняя связь может быть описана квадратным уравнением

$$\lg C_{\text{BOB}} = -0.24 + 0.19 \lg C_{\text{Хл}} - 0.52 \lg Z_6 + 0.005 (\lg C_{\text{Хл}})^2 - 0.12 \lg C_{\text{Хл}} \lg Z_6 + 0.012 (\lg Z_6)^2. \quad (7)$$

Очевидно, что указанное влияние в большей степени проявляется в более мутных водах: здесь с увеличением $\lg C_{\text{Хл}}$ наблюдается существенно более высокий рост $\lg C_{\text{BOB}}$. Форму трехмерного графика на рис. 4, аналогично графику на рис. 2, можно объяснить наличием связей между прозрачностью и концентрациями органической фракции и хлорофилла:

$$\lg C_{\text{BOB}} = -0.58 + 0.25 \lg C_{\text{Хл}} \quad (r = -0.54), \quad (8)$$

$$\lg Z_6 = 0.51 - 0.34 \lg C_{\text{Хл}} \quad (r = -0.47). \quad (9)$$

Точность расчетов может быть дополнительно повышена при использовании локальных (кусочных) уравнений, относящихся к одному из интервалов, на которые разделены массивы данных о концентрациях $C_{\text{ВМВ}}$ и C_{BOB} (см. рис. 1 и 3 и табл. 2 и 3).

В табл. 3 представлены средние величины ошибок линейных и дробно-линейных аппроксимаций связей как для всего массива данных, так и для каждого интервала изменений Z_6 и $\lg Z_6$. Сопоставление величин этих ошибок позволяет оценить выгоду от использования локальных

Таблица 2. Уравнения линейных и дробно-линейных регрессий и коэффициенты корреляции, отражающие статистические связи между относительной прозрачностью Z_6 и концентрациями общей взвеси $C_{\text{ВВ}}$ и ее фракциями (минеральной – $C_{\text{ВМВ}}$ и органической – C_{BOB})

	$Z_6, \text{ м}$	Уравнение	r
к рис. 1	0.1–1.2	$C_{\text{ВМВ}} = 64 - 47Z_6$	-0.77
	1.2–3.2	$C_{\text{ВМВ}} = 14.1 - 4Z_6$	-0.58
	3.2–21	$C_{\text{ВМВ}} = 1.9 - 0.09Z_6$	-0.51
	0.1–21	$C_{\text{ВМВ}} = 0.44Z_6 / (Z_6 - 0.1)$	-0.45
	0.1–1.2	$\lg C_{\text{ВМВ}} = 1.2 - 0.74 \lg Z_6$	-0.74
	1.2–3.2	$\lg C_{\text{ВМВ}} = 1.2 - 1.8 \lg Z_6$	-0.72
	3.2–21	$\lg C_{\text{ВМВ}} = 0.79 - \lg Z_6$	-0.72
	0.1–21	$\lg C_{\text{ВМВ}} = 1 - 1.23 \lg Z_6$	-0.92
к рис. 3	0.1–1.2	$C_{\text{BOB}} = 0.89 - 0.22Z_6$	-0.35
	0.2–3.3	$C_{\text{BOB}} = 0.84 - 0.18Z_6$	-0.73
	3.3–21	$C_{\text{BOB}} = 0.27 - 0.0089Z_6$	-0.51
	0.1–21	$C_{\text{BOB}} = 0.15Z_6 / (Z_6 - 0.3)$	-0.53
	0.1–1.2	$\lg C_{\text{BOB}} = -0.19 - 0.14 \lg Z_6$	-0.3
	1.2–3.3	$\lg C_{\text{BOB}} = -0.16 - 0.77 \lg Z_6$	-0.72
	3.3–21	$\lg C_{\text{BOB}} = -0.37 - 0.41 \lg Z_6$	-0.57
	0.1–21	$\lg C_{\text{BOB}} = -0.29 - 0.49 \lg Z_6$	-0.85
	0.1–21	$\lg C_{\text{ВВ}} = 1 - 1.14 \lg Z_6$	-0.92
	[22]	0.02–29	$\lg C_{\text{ВВ}} = 1.17 - 1.29 \lg Z_6$

Таблица 3. Средние ошибки аппроксимаций минеральной $C_{\text{ВМВ}}$ (А) и органической $C_{\text{ВОВ}}$ (Б) фракций концентрации общей взвеси (минимальные значения для отдельных интервалов выделены жирным шрифтом, выгода – жирным курсивом; пояснения в тексте)

А								
№ рисунка	1				1			
	$\lg C_{\text{ВМВ}}$				$C_{\text{ВМВ}}$			
№ интервала	1	2	3	1 + 2 + 3	1	2	3	1 + 2 + 3
Квадратичная для интервала	0.13	0.37	–	–	–	–	–	–
Линейная для интервала	0.14	0.39	0.36	–	0.62	0.91	0.53	–
Линейная для всего массива	0.18	0.42	1.56	0.71	–	–	–	–
Гиперболическая для всего массива	–	–	–	–	0.59	0.72	0.77	0.74
Выгода, в %-ах	28	12	77	–	5	21	37	–

Б								
№ рисунка	3				3			
	$\lg C_{\text{ВОВ}}$				$C_{\text{ВОВ}}$			
№ интервала	1	2	3	1 + 2 + 3	1	2	3	1 + 2 + 3
Линейная для интервала	0.61	0.19	0.006	–	0.29	0.24	0.23	–
Линейная для всего массива	0.79	0.17	0.15	0.34	–	–	–	–
Гиперболическая для всего массива	–	–	–	–	0.25	0.18	0.22	0.21
Выгода, в %-ах	23	–11	96	–	14	25	4	–

аппроксимаций. Величина этой выгоды, выраженная в процентах отношения ошибок этих аппроксимаций к ошибкам аппроксимации для всего массива данных, дана в табл. 3А и 3Б жирным курсивом. Очевидно, что наиболее целесообразно использовать уравнения локальных аппроксимаций связей в прозрачных водах, в которых ошибки минимальны (за исключением промежуточных вод при определении $\lg C_{\text{ВОВ}}$).

Уравнения (3) и (7), относящиеся к трехмерным графикам (см. рис. 2 и 4), пока не могут быть рекомендованы для расчетов концентраций ВМВ и ВОВ по величинам Z_6 из-за их низкой статистической обеспеченности и приведены лишь для иллюстрации потенциальных возможностей повышения точности таких расчетов. О погрешностях расчета $C_{\text{ВМВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$, исходя из значений Z_6 , можно судить по графикам, представленным на рис. 5А и 5Б.

Хорошо известно, что относительно невысокие значения погрешностей, если оценивать их также и по суммарному разбросу точек на рис. 1 и 3, вызваны многими причинами: измерения прозрачности проводились при значительной изменчивости характеристик облученности поверхности моря и условий наблюдения, не учитывались присутствие в воде окрашенных растворенных веществ и влияние вертикального распределения взвеси. Помимо этого, на прозрачность влияет

гранулометрический состав взвеси. Это было отмечено еще в работе [8]. Но только в работе [19] проведена ее количественная оценка и показано преобладающее влияние на видимость белого диска мелкой фракции взвеси (≤ 1 мкм). Было установлено, в частности, что при концентрации общей взвеси около 0.35 мг/л прозрачность снижается вдвое (с 36 до 18 м) при пятикратном увеличении концентрации мелкой фракции (с 0.01 до 0.05 мг/л). В этой же работе детально рассмотрена причина такой закономерности.

В нашем исследовании мы не располагали информацией о гранулометрическом составе взвеси. Тем не менее, используя косвенный метод его оценки, удалось подтвердить влияние относительного содержания мелкой фракции взвеси на прозрачность воды. В основе косвенного метода – хорошо известный процесс постепенного изменения состава взвеси в маргинальном фильтре по мере удаления от ее источника (например, от устья реки). В связи с тем, что органические частицы оседают медленнее минеральных, а крупные минеральные частицы выпадают в осадок раньше мелких, неизбежно происходит постепенное увеличение и доли мелкой фракции, и в связи с этим и доли органики в общей взвеси. Поэтому правомерно, по крайней мере на качественном уровне, отслеживать изменения доли мелкой фракции в общей взвеси по изменению

ям относительной концентрации органической фракции.

На рис. 6 изображен трехмерный график связи между концентрацией общей взвеси, относительной концентрацией ее органической фракции и прозрачностью. В аналитическом виде указанная связь может быть выражена в виде линейного (10) или квадратного (11) уравнений:

$$\lg C_{\text{ВВ}} = 1.4 - 0.62C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}} - 0.71\lg Z_6, \quad (10)$$

$$R(z/xy) = 0.94,$$

где $R(z/xy)$ – коэффициент множественной корреляции,

$$\begin{aligned} \lg C_{\text{ВВ}} = & 1.3 - 0.4\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}} - 0.76\lg Z_6 - \\ & - 0.14(\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}})^2 - 0.023\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}}\lg Z_6 + \\ & + 0.11(\lg Z_6)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Убедиться в уменьшении прозрачности при постоянной концентрации общей взвеси, но при увеличении относительного содержания ее органической фракции, можно либо непосредственно по графику, либо аналитически, используя уравнения (10) и (11). На рис. 6 приведен пример с использованием графика. Точки А ($\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}} = 0.5$) и Б ($\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}} = 1.5$) расположены на уровне с $\lg C_{\text{ВВ}} = 0.4$. При переходе из точки А в точку Б величина $\lg Z_6$ уменьшается на порядок: с 1 до 0 (Z_6 – с 11.2 до 1.04 м).

Аналитический подход – решение уравнений (10) и (11), без учета реальных диапазонов изменчивости каждого из трех показателей для конкретного соотношения между двумя другими, – также дает количественные, но явно завышенные результаты (относительные изменения прозрачности могут превышать 200%, а величины Z_6 выходят далеко за пределы зарегистрированных значений). Количественно оценить изменения прозрачности, вызванные преобладанием мелкой взвеси, можно только для тех данных, которые относятся к массиву, проекции контуров которого изображены на рис. 6 в плоскостях XY, YZ и XZ. Это условие было выполнено после разделения всего массива на группы, в каждой из которых величины $\lg C_{\text{ВВ}}$ отличались от среднего значения в ней не более чем на $\pm 10\%$, и учета реальных изменений содержания органики. Снижения прозрачности в связи с ростом относительной концентрации органической фракции взвеси были выявлены отдельно в каждой из групп. Оказалось, что в среднем прозрачность снижалась в 2.4 раза при одновременном увеличении $\lg C_{\text{ВОВ}^{\text{отн}}}$ в среднем в 2.3 раза.

Верификация предлагаемого метода расчета концентраций компонентов взвеси, исходя из значений относительной прозрачности, была

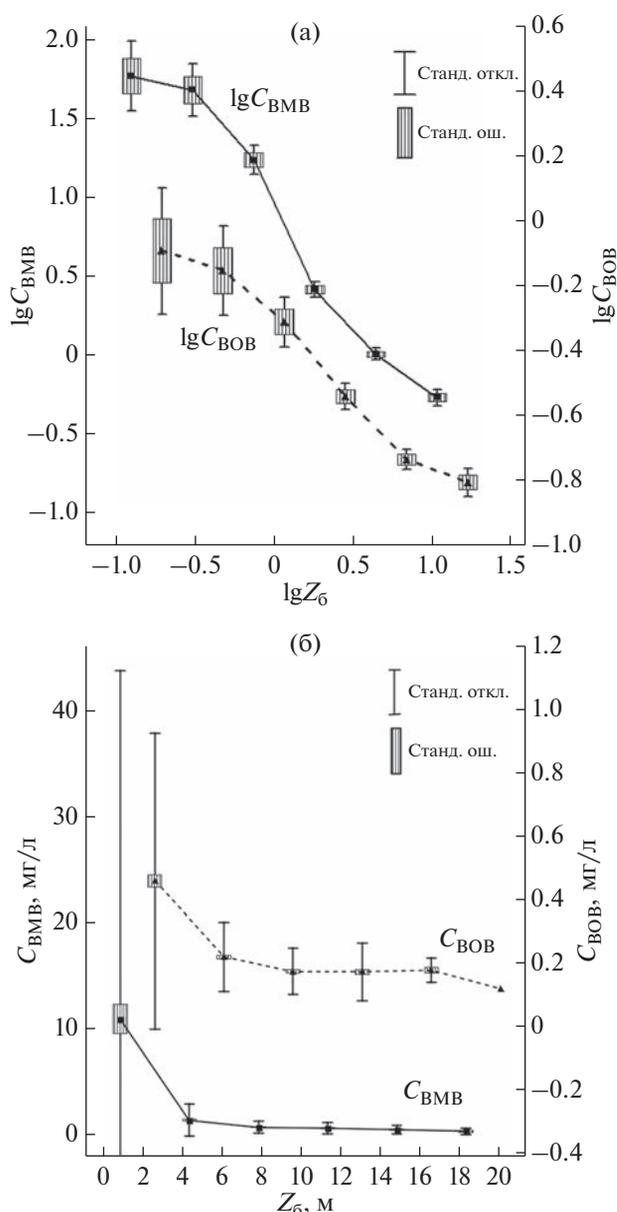


Рис. 5. Зависимости осредненных значений стандартной ошибки при оценке $\lg C_{\text{ВМВ}}$ и $\lg C_{\text{ВОВ}}$ от $\lg Z_6$ – ((а) – верхний рисунок) и при оценке $C_{\text{ВМВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ от Z_6 – ((б) – нижний).

проведена по данным нескольких экспедиций. Сопоставлялись карты распределения трех показателей (глубины видимости белого диска Z_6 , измеренных значений концентраций минеральной $C_{\text{ВМВ}}$ и органической взвеси $C_{\text{ВОВ}}$) и значений этих концентраций, рассчитанных по формулам (2) и (6). На рис. 7 приведен пример такого сопоставления для одного из полигонов (экспедиции № 8 в табл. 1).

На верхней карте 1 – распределение прозрачности; средние карты 2 и 3 построены по изме-

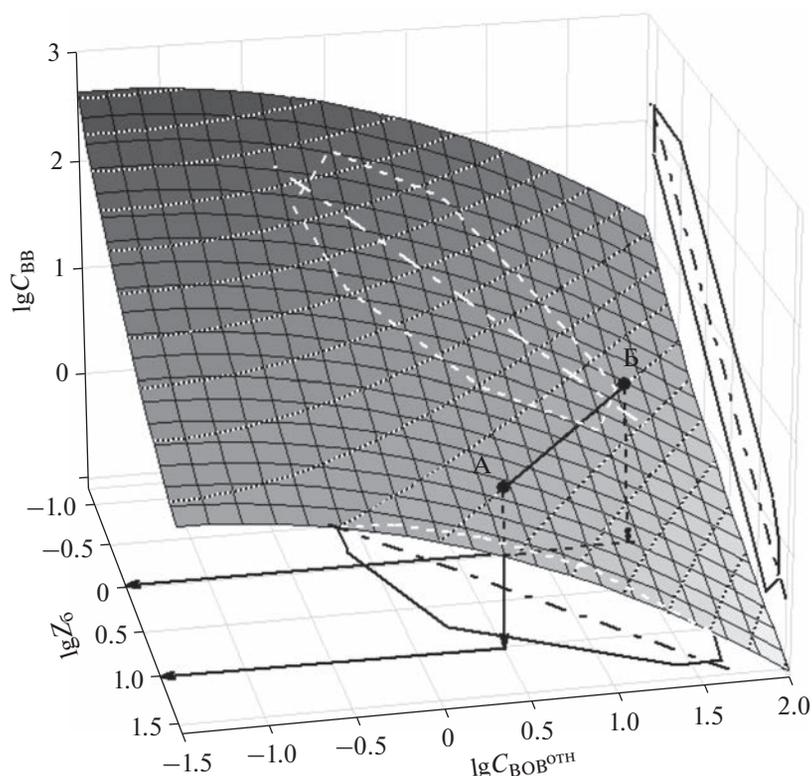


Рис. 6. Изменение связи между массовой концентрацией общей взвеси $\lg C_{BV}$ и значениями относительной прозрачности $\lg Z_0$ с ростом относительного содержания взвешенного органического вещества $\lg C_{BOB}^{отн}$. На плоскостях XY , YZ и XZ – проекции контуров общего массива данных со средними линиями (см. рис. 1 и 3). Точки А и Б и линии со стрелками – пример графического способа оценки снижения прозрачности с ростом $\lg C_{BOB}^{отн}$. Пояснения – в тексте.

ренным значениям $C_{ВМВ}$ и $C_{ВОВ}$, нижние 4 и 5 – по значениям $C_{ВМВ}$ и $C_{ВОВ}$, рассчитанным по формулам (2) и (6). Нельзя не обратить внимания на удивительную схожесть этих распределений на качественном уровне и прежде всего – на практически полное совпадение мест с экстремальными значениями показателей. Очевидные отличия – в том, что на карте 4 по сравнению с картой 5 увеличились и диапазон изменчивости рассчитанных значений $C_{ВМВ}$ (в 1.5 раза), и средняя концентрация (на 11%). На карте 5 по сравнению с картой 3, наоборот, и диапазон, и средние значения уменьшились (соответственно в 1.2 раза и на 11%).

Значения концентраций компонентов взвеси на картах, построенных по данным, рассчитанным на основании формул (2) и (6), безусловно, будут отличаться от истинных. Однако простота методики измерений прозрачности по белому диску и их скорость в сравнении с использованием методики, предполагающей отбор проб и их последующий анализ в лабораторных условиях, позволяют существенно увеличить число определений. В связи с этим при проведении экологического мониторинга в приустьевой зоне (и особенно при наличии в ней плюма) появляется возмож-

ность с приемлемой точностью выявлять основные особенности распределения общей взвеси и ее фракций (в частности, достаточно уверенно определить направление основного потока воды и положение границ проникновения пресноводного материкового стока в море, а также отслеживать их суточные и межсезонные изменения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В прибрежной зоне, охватывающей практически весь российский сектор черноморского побережья, исследована статистическая связь между относительной прозрачностью верхнего слоя моря, определяемой по максимальной глубине видимости белого диска, и концентрациями общей взвеси и ее минеральной и органической фракций. Исследованные акватории характеризовались широким диапазоном изменчивости всех измеренных величин.

Получены два обобщенных эмпирических линейных уравнения для расчета названных концентраций по глубине видимости белого диска. Уравнения связывают логарифмы показателей при относительно высоких значениях коэффици-

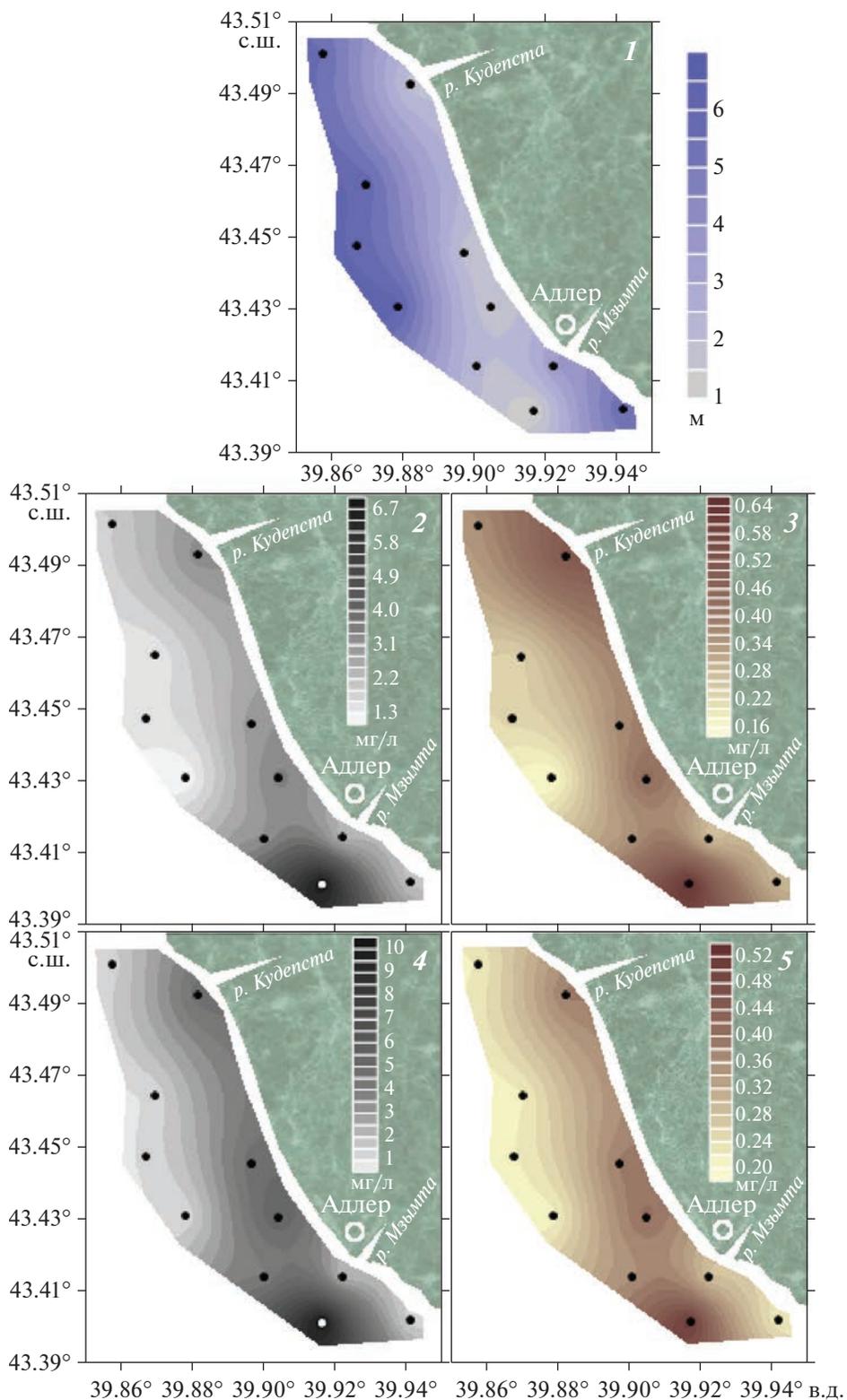


Рис. 7. Сопоставление распределения относительной прозрачности (карта 1) с картами 2 и 3 распределения концентраций минеральной и органической фракций взвеси, построенными по результатам их измерения, и с картами 4 и 5, построенными по результатам их расчетов по формулам (2) и (6).

ентов детерминации ($r^2 = 0.85$ для минеральной взвеси и $r^2 = 0.72$ — для органической).

Дополнительно повысить точность определений можно при использовании уравнений локальной аппроксимации, относящихся отдельно к одному из трех интервалов прозрачности (низкой, высокой и промежуточной), на которые разделены массивы данных о концентрациях $C_{ВМВ}$ и $C_{ВОВ}$.

Величины стандартных погрешностей оценки концентраций также относительно невелики, что позволяет рекомендовать указанные эмпирические уравнения для их практического применения при проведении рутинного экологического мониторинга в исследованных районах (и прежде всего, в приустьевых зонах при наличии плумов).

Установлено, что при одной и той же массовой концентрации общей взвеси с повышением относительного содержания ее органической фракции прозрачность может существенно уменьшиться.

Показана потенциальная возможность повысить точность расчетов, если при определении концентраций минеральной фракции дополнительно использовать информацию о содержании взвеси органического происхождения, а при расчете концентраций органической фракции — информацию о содержании хлорофилла. Для реализации этой возможности необходимо укрупнение базы результатов одновременных измерений прозрачности и комплекса из трех показателей — $C_{ВМВ}$, $C_{ВОВ}$ и $S_{Хл}$.

Максимально повысить точность оценки концентраций общей взвеси и ее фракций по глубине видимости белого диска возможно только при следующих условиях: 1) дополнения комплекса измерений анализом гранулометрического состава взвеси, который можно анализировать относительно простым способом с помощью нефелометра [16]; 2) существенного расширения базы данных, достаточного для выделения в ней отдельных массивов, полученных при стандартизованных характеристиках облученности поверхности моря и условий наблюдения; 3) выделения отдельного массива для вод с низкой прозрачностью ($Z_6 \leq 2-2.5$ м).

Источники финансирования. Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения 075-15-2021-941.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березкин В.С., Гершун А.А., Янишевский Ю.Д. Прозрачность и цвет моря — Л.: Изд-во военно-морской академии ВМВ, 1940. 123 с.
2. Витюк Д.М. Использование визуальных наблюдений для расчета концентрации взвеси в морской воде // Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. Киев: Наукова Думка, 1983. С. 70–72.
3. Горнер И. Инструкция лейтенанту Коцебу о физических наблюдениях // В Отчете О. Коцебу “Путешествие в Южный океан и Берингов пролив для отыскания северо-восточного морского прохода, предпринятое в 1815—1818 гг. на корабле “Рюрик””. Ч. 1. СПб.: 1821. С. 149–181.
4. ГОСТ 17.1.04.02—90. “Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*”. М.: Изд-во стандартов Госкомприроды, 1990. 16 с.
5. ГОСТ 19210—73. Гидрооптические характеристики. Термины и определения. М. Изд-во Госкомитета Стандартов СССР. 1974. 10 с.
6. Зубов Н.Н. Гидрологические работы Морского научного института летом 1928 г. на э/с “Персей” // Труды ГОИН. 1932. Т. 2. Вып. 4.
7. Иванов Р.Н. К теории диска Секки // Журнал геофизики. 1936. Т. 6. Вып. 2–3.
8. Иванов К.И. О зависимости между прозрачностью и содержанием взвешенных веществ // Труды ГОИН. М.-Л.: Гидрометеоздат, 1948. Вып.10/22. С. 117–129.
9. Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Каспийском море в 1914—1915 гг. // Тр. Касп. эксп. 1914—1915 гг. 1921.
10. Козлянинов М.В. Руководство по гидрооптическим измерениям в море // Труды ИО АН. 1961. Т. 47. С. 37–80.
11. Козлянинов М.В. О расчете видимости белого стандартного диска // Океанология. 1980. Т. 20. № 2. С. 329–334.
12. Конавалов Б.В. Определение показателя поглощения света компонентами sestona по спектру поглощения его осадка на мембранном фильтре // Океанология. 1992. Т. 32. № 3. С. 588–593.
13. Конавалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 704–711.
14. Лебедицев А.А. Журнал гидрологических и метеорологических наблюдений в Каспийской экспедиции 1904 г. // Тр. Касп. эксп. 1904 г. 1913. Т. 3.
15. Левенштерн Е.Е. Вокруг света с Иваном Крузенштерном // Сост. А.В. Крузенштерн, О.М. Федорова, Т.К. Шафрановская. СПб. ЦКП ВМФ. 2003. 600 с.
16. Маньковский В.И. Эмпирическая формула для оценки показателя ослабления света в морской воде по глубине видимости белого диска // Океанология. 1978. Т. 18. Вып. 4. С. 750–753.
17. Маньковский В.И. Основы оптики океана. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 1996. 119 с.
18. Маньковский В.И. Оценка концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска // Опт. атм. и океана. 2018. Т. 31. № 4. С. 313–317.
19. Маньковский В.И. Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // Опт. атм. и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 24–28.

20. Определение относительной прозрачности воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. М.: Изд-во ГОИН, 2016. Гл. 14.3. С. 339–340.
21. Федорова И.К. Океанийские заметки И.К. Горнера во время первой русской кругосветной экспедиции (1803–1806). Электронная библиотека МАЭ РАН (Музея антропологии и этнографии им. Петра Великого (Кунсткамера) РАН. 2007. (http://www.kunstkamera.ru/lib/rubrikator//08/08_03/978-5-02-025219-6/).
22. Шемшур В.Е., Владимиров В.Л. Оценка концентрации взвеси в море по глубине видимости белого диска и спектрам восходящего излучения // Океанология. 1989. Т. 29. № 6. С. 946–950.
23. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометиздат, 1983. 278 с.
24. Шиндлер Б. Материалы по гидрологии Карабугаза и средней части Каспийского моря // Тр. Карабугазск. эксп. 1902. Ч. 1.
25. Шулейкин В.В. Гидрографические работы во 2-ой экспедиции 1924 г. // Исследование оптических свойств воды // Тр. Плавающего морского научн. ин-та. 1925. Вып. 19.
26. Aas E., Høkedal J., Sørensen K. Secchi depth in the Oslofjord–Skagerrak area: theory, experiments and relationships to other quantities // Ocean Sciences. 2014. V. 10. P. 177–199.
27. Cialdi C.A. Sul moto ondoso del mare e su le correnti de esso specialment auquelle littorali. 2nd Ed. 1866. P. 258–288. Cited in ONI Transl. A-655, P. 1. Hydrographic Office, 19.
28. Clarke O.L., Jaraes H.K. Laboratory Anahsis of the selective absorption of light by sea water // Optical Society of America. 1939. V. 29. № 2.
29. Gordon H.R., Wouters A.W. Some relations between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters // Appl. Opt. 1978. V. 17. P. 3341–3343.
30. Graham J. Secchi disc observations and extinction coefficients in the central and eastern north Pacific Ocean // Limnol. Oceanogr. 1966. V. 11. P. 184–190.
31. Horner J.C. Nachrichten von der Russischen Entdeckungsreise // Monatliche Correspondenz zur Beforderung der Erd- und Himmelskunde / F.X. V. Zach. Bd. 11. 1805. S. 149–160.
32. Lee Z.P., Shang S., Hu C. et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 169. P. 139–149.
33. Levin J.M., Radomyslskaya T.M. Secchi disk theory: a reexamination // Current Research on Remote Sensing. Proc. of SPIE. 2007. V. 6615. P. 1–11.
34. Pellerson H. Scattering and extinction of light in sea water // Kungl. Vetens. Vitterhets samhal. 1934. Handl. Ser. B. Bd. 4. № 4.
35. Pitarch, J. A Review of Secchi's contribution to marine optics and the foundation of Secchi disk science // Oceanography. 2020. V. 3. № 3. P. 26–37.
36. Preisendorfer R.W. Secchi disk science: visual optics of natural waters // Limnol. Oceanogr. 1986. V. 31. P. 909–926.
37. Wernand M.R. On the history of the Secchi disc // Journal European Optical Society — Rapid Publications. 2010. V. 5. P. 10013S1–10013S6.
38. Witting R. Zusammenfassende ubersicht der hydrographie des bottenischen und finnischen meerbusens und der Nordlichen Ostsee nach den Untersuchungen bis Ende 1910 // Finlandische Hydr. Biol. Unters. 1912. № 7.

Evaluation of Suspended Matter Content in the Coastal Zone of the Northeastern Part of the Black Sea by Relative Transparency

B. V. Konovalov[#]

Institute of Oceanology PP Shirshov RAS, Moscow, 117997 Russia

[#]*e-mail: bvkonovalov@yandex.ru*

Based on the materials of 20 expeditions of the IO RAS conducted in various areas of the coastal zone of the Russian sector of the Black Sea in the period from 1999 to 2021, empirical equations the relationship between the relative transparency (depth of visibility of the white disk Z_d) and the mass concentrations of the total suspended matter-SM and its mineral – SMM and organic – POM fractions (C_{sm} , C_{smm} and C_{som} , respectively) were obtained. The values of Z_d were recorded in the range from 0.1 to 21 m, the concentrations of SMM – from 0.11 to 104 mg/L, POM – from 0.09 to 2.0 mg/l and chlorophyll *a* (C_a) – from 0.03 to 4.4 mcg/l. The relative abundance of the POM in the suspension ranged from 1.1 to 48.7%. The estimation of the error in the calculations according to these equations is carried out. The coefficients of determination $r^2 = 0.85$ (for $\lg C_{sm}$ and $\lg C_{smm}$) and 0.72 (for $\lg C_{som}$). The influence of the concentration of POM – on the accuracy of the calculation of C_{smm} and the concentration of chlorophyll *a* on the accuracy of the calculation of C_{som} was revealed. It is concluded that it is possible to use empirical formulas related to the entire array to calculate the concentrations of these fractions of suspension in the entire studied water area. It is proposed to consider the method of estimating the content of suspension fractions based on the obtained empirical equations as a regional variant of the method of passive sounding of the upper layer of the sea using a white disk.

Keywords: Black Sea, passive sensing, relative transparency (Secchi disk), suspended mineral matter, suspended organic matter