

Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма

В. И. Маньковский, Е. В. Маньковская*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: emankovskaya@mhi-ras.ru*

Поступила 24.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Статья посвящена исследованию взаимных связей показателя ослабления света в разных участках спектра и спектральных связей показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах Южного берега Крыма. Используются данные натурных оптических измерений 2008–2014 гг. со стационарной океанографической платформы, установленной в прибрежных водах Южного берега Крыма в районе п. Кацивели. По данным наблюдений установлены связи показателя ослабления направленного света в восьми участках спектра в диапазоне длин волн 416–640 нм с глубиной видимости белого диска, изменяющейся в пределах от 6 до 17.5 м. Проведено сравнение спектральных распределений показателя ослабления света при разных значениях глубины видимости белого диска в прибрежных водах и в водах глубоководной области моря. В результате сделан вывод, что уравнения связи спектрального показателя ослабления с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах не пригодны для вод глубоководной области. Показано, что особенность таких уравнений связи в прибрежных водах связана с большей концентрацией в них мелкой взвеси. Рассчитаны параметры взаимной корреляции показателей ослабления света в разных участках спектра в прибрежных водах. Высокие коэффициенты корреляции дают возможность восстанавливать распределение показателя ослабления в широком спектральном диапазоне по данным измерений на одной длине волны в любой области спектра. Оптимальной для измерения показателя ослабления света является спектральная область 468–527 нм.

Ключевые слова: спектральный показатель ослабления света, белый диск, диск Секки, прибрежные воды, взвесь, концентрация взвеси, Черное море.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология», № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования».

Для цитирования: Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 65–79. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-65-79

© Маньковский В. И., Маньковская Е. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Spectral Relations of Hydro-Optical Characteristics in Coastal Waters of the South Coast of Crimea

V. I. Mankovsky, E. V. Mankovskaya*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: emankovskaya@mhi-ras.ru*

Submitted 24.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article studies interrelations of the beam attenuation coefficient in different spectrum regions and spectral relations of beam attenuation coefficient to the Secchi depth in the coastal waters of the South Coast of Crimea. The data were used of *in situ* optical measurements obtained in 2008–2014 from a stationary oceanographic platform installed in the coastal waters of the South Coast of Crimea near the village of Katsiveli. According to the measurement data the relation was determined of the beam attenuation coefficient in eight parts of the spectrum in the wavelength range of 416–640 nm to the Secchi depth, which varies from 6 m to 17.5 m. Spectral distributions of the beam attenuation coefficient at different Secchi depths in coastal and deep sea waters were compared. As a result, it is concluded that the relationships between the spectral attenuation coefficient and the Secchi depth in coastal waters are not applicable to deep sea waters. It is shown that the feature of such equations in coastal waters is related to the higher concentration of fine suspended matter in them. Intercorrelation parameters were calculated of beam attenuation coefficients in different spectrum regions in coastal waters. High correlation coefficients make it possible to reconstruct distribution of the attenuation coefficient in a wide spectral range based on measurements at one wavelength in any spectrum region. The optimal spectral region to measure the beam attenuation coefficient is 468–527 nm.

Keywords: spectral beam attenuation coefficient, Secchi disk, coastal waters, suspended matter, suspended matter concentration, Black Sea.

Acknowledgements: the work was performed under state order on topics 0555-2021-0003 “Operational oceanology”, 0555-2021-0005 “Coastal studies”.

For citation: Mankovsky, V.I. and Mankovskaya, E.V., 2021. Spectral Relations of Hydro-Optical Characteristics in Coastal Waters of the South Coast of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 65–79. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-65-79 (in Russian).

Введение

Исследование связей между гидрооптическими характеристиками актуально в практическом плане: эти связи позволяют определять одни характеристики, по которым нет необходимых данных, используя другие с известными измеренными значениями [1–4].

В экспериментах часто устанавливают связь гидрооптических характеристик, измеренных с помощью различного рода фотометров, с глубиной видимости белого диска Z_d [5–18]. Теоретически вопрос о связи белого диска с показателем ослабления направленного света рассматривался с использованием различных подходов в работах [19, 20].

В настоящей работе исследовались связи спектральных показателей ослабления направленного света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах Южного берега Крыма. Такие связи могут использоваться

при проведении мониторинга прибрежной зоны моря, когда для оценки ее экологического состояния необходимы показатели ослабления света, а фотометр-прозрачномер отсутствует. В таких случаях, измерив глубину видимости белого диска, можно получить необходимые данные.

В работе также исследовалась взаимная связь спектральных показателей ослабления направленного света в прибрежных водах. По этим связям можно восстановить распределение показателя ослабления света в широком спектральном диапазоне, используя показатель ослабления, измеренный в одном участке спектра.

Район исследования

Оптические измерения выполнялись на океанографической платформе, установленной в прибрежных водах Южного берега Крыма около пос. Качивели. Платформа расположена на расстоянии около 600 м от берега (в зависимости от точки привязки), глубина моря около платформы переменная – 28 м со стороны берега, 33 м со стороны моря. Географические координаты платформы: 44° 23' с. ш., 33° 59' в. д.

Аппаратура

Показатель ослабления направленного света $\epsilon(\lambda)$ измерялся с помощью лабораторного прозрачномера [21]. Измерения выполнялись в восьми участках спектра: 416, 432, 468, 490, 527, 587, 610, 640 нм. Пробы воды для измерений отбирались с поверхности моря.

Глубина видимости белого диска Z_d определялась по методике, описанной в работе ¹⁾.

Результаты

Измерения $\epsilon(\lambda)$ и Z_d на платформе выполнены в 2008–2014 гг. (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Периоды наблюдений на платформе и глубина видимости белого диска Z_d

Table 1. Periods of observations at the platform and Secchi depth Z_d

Период наблюдений / Observation period	Z_d , м / Z_d , m	Количество измерений / Number of measurements
2008 г., сентябрь / 2008, September	12–17.0	8
2010 г., август / 2010, August	12–17.5	4
2012 г., июль / 2012, July	6–12.5	8
2014 г., август / 2014, August	10–14.5	3

¹⁾ Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л. : Гидрометеиздат, 1977. С. 299–303.

Таблица 2. Параметры связи показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах

Table 2. Parameters of the relation of the beam attenuation coefficient to the Secchi depth in coastal waters

Длина волны, нм / Wave length, nm	Уравнение связи / Relation equation	Коэффициент корреляции R / Correlation coefficient R	Ошибка $S\varepsilon$, 1/м / Error $S\varepsilon$, 1/m	Число измерений / Number of measurements	Диапазон изменения ε , 1/м / Change range ε , 1/m
416	$\varepsilon = 6.98/Z_d - 0.036$	0.971	0.063	13	0.389–1.104
432	$\varepsilon = 6.18/Z_d - 0.014$	0.964	0.058	21	0.329–0.966
468	$\varepsilon = 6.31/Z_d - 0.117$	0.977	0.048	19	0.228–0.943
490	$\varepsilon = 6.41/Z_d - 0.152$	0.969	0.056	20	0.177–0.920
527	$\varepsilon = 6.45/Z_d - 0.158$	0.978	0.052	16	0.182–0.920
587	$\varepsilon = 5.71/Z_d - 0.032$	0.965	0.054	20	0.251–0.897
610	$\varepsilon = 5.49/Z_d + 0.092$	0.954	0.059	19	0.379–1.012
640	$\varepsilon = 5.39/Z_d + 0.168$	0.962	0.058	18	0.435–1.035

Примечание: диапазон изменения $Z_d = 6 \dots 17$ м.

Note: the change range $Z_d = 6 \dots 17$ m.

Рассчитаны уравнения связи значений спектрального показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска $\varepsilon(\lambda_j) = A(\lambda_j)/Z_d + B(\lambda_j)$ (табл. 2) и уравнения взаимной связи спектральных показателей ослабления света $\varepsilon(\lambda_i) = A(\lambda_j)\varepsilon(\lambda_j) + B(\lambda_j)$ (табл. 3). Оценка корреляции между спектральными показателями ослабления $\varepsilon(\lambda)$ приведена в табл. 4. На рис. 1 показан пример связи $\varepsilon(527) = f(Z_d)$ для длины волны 527 нм.

По уравнениям связи между $\varepsilon(\lambda)$ и Z_d рассчитаны спектральные распределения $\varepsilon(\lambda)$ для глубин видимости белого диска: 6, 9, 12, 15 и 18 м (табл. 5, рис. 2).

Обсуждение

Спектральные связи $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$ в прибрежных водах. Уравнения связи $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$ в прибрежных водах характеризуются высокими коэффициентами корреляции. Ошибки определения $\varepsilon(\lambda)$ в разных участках спектра лежат в пределах 0.048–0.063 1/м.

Отметим, что такое количество (восемь) спектральных связей в широком диапазоне длин волн (416–640 нм) установлено впервые. Ранее обычно устанавливалась связь в одном участке спектра, и лишь в работе [18] в водах Средиземного моря установлена связь в трех участках: на длинах волн 416, 506 и 640 нм.

Сравнение спектральных распределений $\varepsilon(\lambda)$ в прибрежной и глубоководной областях моря при разных значениях Z_d показало, что полученные уравнения связи $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$ для прибрежных вод являются региональными, то есть «правильно действующими» только в прибрежных водах.

Таблица 3. Коэффициенты взаимной связи спектральных показателей ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ вида $Y = AX + B$

Table 3. Coefficients of interrelation of spectral beam attenuation coefficients $\varepsilon(\lambda)$ of the form of $Y = AX + B$

Y	X								
	$\varepsilon(416)$	$\varepsilon(432)$	$\varepsilon(468)$	$\varepsilon(490)$	$\varepsilon(527)$	$\varepsilon(587)$	$\varepsilon(610)$	$\varepsilon(640)$	$\varepsilon(550)$
$\varepsilon(416)$	1	<u>1.023</u> 0.046	<u>1.015</u> 0.170	<u>0.983</u> 0.209	<u>0.972</u> 0.214	<u>1.057</u> 0.115	<u>1.097</u> -0.014	<u>1.074</u> -0.064	<u>1.005</u> 0.176
$\varepsilon(432)$	<u>0.968</u> -0.030	1	<u>0.998</u> 0.097	<u>1.005</u> 0.115	<u>1.000</u> 0.120	<u>1.051</u> 0.041	<u>1.121</u> -0.108	<u>1.060</u> -0.160	<u>1.020</u> 0.090
$\varepsilon(468)$	<u>0.977</u> -0.160	<u>0.960</u> -0.071	1	<u>1.015</u> 0.017	<u>1.009</u> 0.020	<u>1.057</u> -0.051	<u>1.124</u> -0.205	<u>1.125</u> -0.267	<u>1.027</u> -0.007
$\varepsilon(490)$	<u>0.986</u> -0.190	<u>0.934</u> -0.081	<u>0.978</u> -0.014	1	<u>0.990</u> 0.015	<u>1.035</u> -0.064	<u>1.103</u> -0.216	<u>1.099</u> -0.274	<u>1.007</u> -0.015
$\varepsilon(527)$	<u>0.995</u> -0.198	<u>0.940</u> -0.085	<u>0.984</u> -0.016	<u>1.006</u> -0.002	1	<u>1.046</u> -0.071	<u>1.114</u> -0.224	<u>1.111</u> -0.278	<u>1.018</u> -0.027
$\varepsilon(587)$	<u>0.909</u> -0.083	<u>0.898</u> -0.014	<u>0.931</u> 0.055	<u>0.946</u> 0.071	<u>0.942</u> 0.074	1	<u>1.056</u> -0.141	<u>1.056</u> -0.193	<u>0.982</u> 0.046
$\varepsilon(610)$	<u>0.885</u> 0.032	<u>0.841</u> 0.127	<u>0.877</u> 0.189	<u>0.893</u> 0.202	<u>0.888</u> 0.205	<u>0.935</u> 0.115	1	<u>1.000</u> -0.049	<u>0.906</u> 0.170
$\varepsilon(640)$	<u>0.882</u> 0.097	<u>0.849</u> 0.182	<u>0.871</u> 0.246	<u>0.881</u> 0.262	<u>0.886</u> 0.257	<u>0.939</u> 0.187	<u>0.998</u> 0.053	1	<u>0.906</u> 0.230

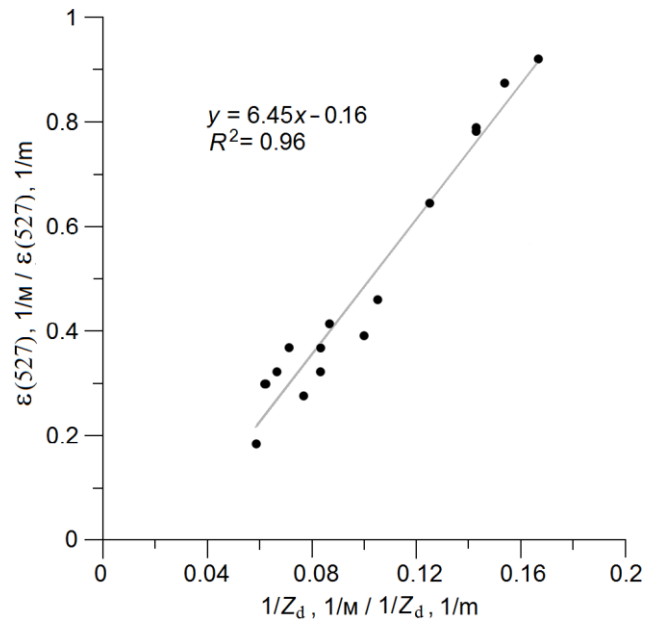
Примечание: коэффициент A находится над чертой, B – под чертой.

Note: coefficient A is over the line, coefficient B is under the line.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между спектральными показателями ослабления света $\varepsilon(\lambda)$

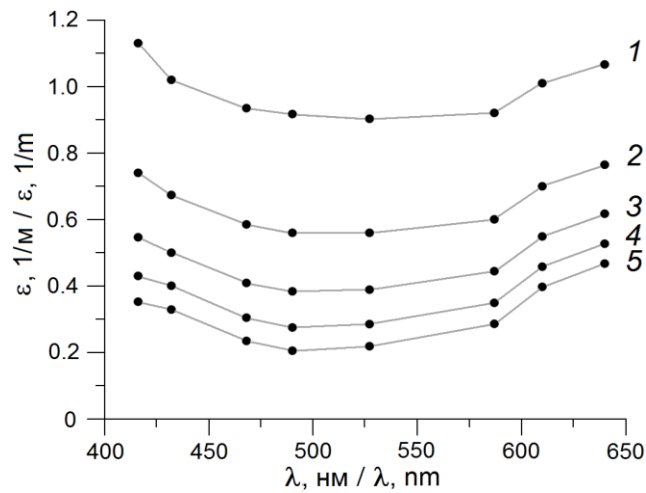
Table 4. Coefficients of correlation between spectral beam attenuation coefficients $\varepsilon(\lambda)$

Y	X							
	$\varepsilon(416)$	$\varepsilon(432)$	$\varepsilon(468)$	$\varepsilon(490)$	$\varepsilon(527)$	$\varepsilon(587)$	$\varepsilon(610)$	$\varepsilon(640)$
$\varepsilon(416)$	1	0.995	0.995	0.985	0.983	0.981	0.980	0.973
$\varepsilon(432)$		1	0.984	0.983	0.983	0.984	0.984	0.988
$\varepsilon(468)$			1	0.996	0.996	0.992	0.993	0.990
$\varepsilon(490)$				1	0.998	0.990	0.992	0.992
$\varepsilon(527)$					1	0.993	0.993	0.992
$\varepsilon(587)$						1	0.994	0.996
$\varepsilon(610)$							1	0.997
$\varepsilon(640)$								1



Р и с . 1 . Связь показателя ослабления света на длине волны 527 нм с глубиной видимости белого диска

Fig . 1 . Relation of the beam attenuation coefficient at 527 nm to the Secchi depth



Р и с . 2 . Спектральное распределение показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$ при глубине видимости белого диска Z_d , равной 6 м (1), 9 м (2), 12 м (3), 15 м (4) и 18 м (5)

Fig . 2 . Spectral distribution of the beam attenuation coefficient $\epsilon(\lambda)$ at a Secchi depth Z_d of 6 m (1), 9 m (2), 12 m (3), 15 m (4) и 18 m (5)

Таблица 5. Значения показателя ослабления света для разной глубины видимости белого диска в прибрежных водах

Table 5. Values of the beam attenuation coefficient for various Secchi depths in coastal waters

Длина волны λ , нм / Wave length λ , nm	Показатель ослабления $\varepsilon(\lambda)$, 1/м, при Z_d , м / Attenuation coefficient $\varepsilon(\lambda)$, 1/m, at Z_d , m				
	6	9	12	15	18
416	1.130	0.740	0.546	0.430	0.352
432	1.020	0.673	0.500	0.400	0.329
468	0.935	0.585	0.409	0.304	0.234
490	0.917	0.560	0.383	0.275	0.205
527	0.903	0.560	0.389	0.285	0.218
587	0.920	0.600	0.444	0.349	0.286
610	1.010	0.700	0.549	0.458	0.397
640	1.066	0.764	0.617	0.527	0.467

На рис. 3 показаны спектры показателя ослабления, измеренные в глубоководной области моря во 2-м рейсе НИС «Горизонт» (июнь 1998 г.) при $Z_d = 10$ м, и в 33-м рейсе НИС «Профессор Колесников» (апрель 1994 г.) при $Z_d = 18$ м. Для таких же глубин видимости белого диска по уравнениям

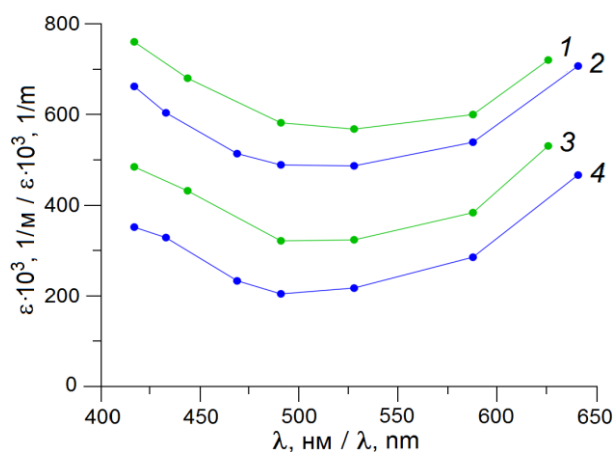


Рис. 3. Спектральное распределение показателя ослабления света в глубоководных (зеленые линии) и прибрежных (синие линии) районах Черного моря при Z_d , равном 10 м (1, 2) и 18 м (3, 4)

Fig. 3. Spectral distribution of the beam attenuation coefficient in deep water (green lines) and coastal (blue lines) areas of the Black Sea at Z_d of 10 m (1, 2) and 18 m (3, 4)

связи (табл. 2) были рассчитаны спектры в прибрежных водах (рис. 3). В обоих случаях показатели ослабления света в спектрах прибрежных вод значительно меньше, чем в спектрах глубоководных.

Глубина видимости белого диска связана с гидрооптическими характеристиками [20]:

$$Z_d = B/(\varepsilon + \alpha), \quad (1)$$

где ε – показатель ослабления направленного света; α – показатель вертикального ослабления дневного света; B – коэффициент.

Величина показателя вертикального ослабления α значительно меньше величины показателя ослабления ε и тесно с ней связана. Вследствие этого изменение ε без учета изменения α можно рассматривать как показатель изменения Z_d . Поэтому будем использовать изменение показателя ослабления света на длине волны 527 нм $\varepsilon(527)$ в этом качестве.

Согласно формуле (1) и значениям показателя ослабления света $\varepsilon(527)$ на рис. 3 величина Z_d в прибрежных водах должна быть больше, чем в водах глубоководной области моря.

Объяснить несогласие графиков на рис. 3 с формулой (1) можно другим составом взвеси в прибрежных водах, а именно – большей концентрацией в них мелкой взвеси.

Ранее в работе [22] показано, как мелкая взвесь влияет на глубину видимости белого диска. Мелкая взвесь рассеивает свет, создающий в воде световую дымку, которая снижает контраст диска. Вследствие этого увеличение концентрации мелкой взвеси приводит к уменьшению значения Z_d [22].

При учете влияния мелкой взвеси на видимость диска формула (1) будет выглядеть так:

$$Z_d = B/(\varepsilon + \alpha + kC_{\text{мелк}}), \quad (2)$$

где $C_{\text{мелк}}$ – концентрация мелкой взвеси; k – коэффициент связи концентрации мелкой взвеси с яркостью световой дымки.

На полигоне в тропических водах Атлантического океана [23] наблюдался пример такого влияния мелкой взвеси на величину Z_d (рис. 4). На двух станциях при одинаковой глубине видимости белого диска ($Z_d = 32$ м) показатели ослабления отличались: $\varepsilon(527) = 0.115$ 1/м на ст. 5137, $\varepsilon(527) = 0.221$ 1/м на ст. 5162.

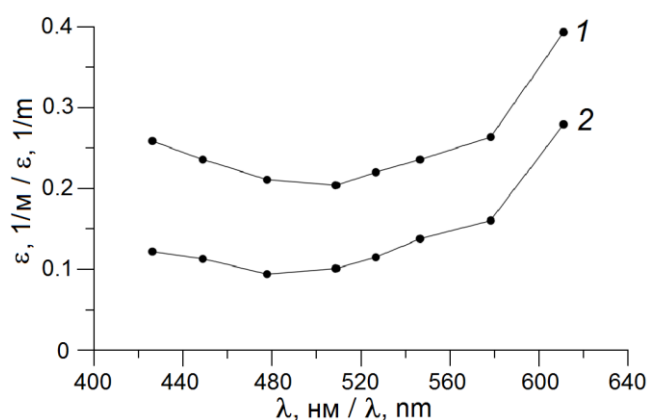
По измерениям индикатрис рассеяния света на этих станциях была определена концентрация мелкой взвеси $C_{\text{мелк}}$, составившая 0.026 мг/л на ст. 5162 и 0.052 мг/л на ст. 5137. Более высокая концентрация мелкой взвеси на ст. 5137, согласно формуле (2), «компенсировала» меньшую величину показателя ослабления, и поэтому глубина видимости белого диска была такой же, как и на ст. 5162. Приняв в формуле (2) коэффициент k равным 4, получим:

– на ст. 5137

$$(\varepsilon + kC_{\text{мелк}}) = (0.115 + 4 \cdot 0.052) = 0.323,$$

– на ст. 5162

$$(\varepsilon + kC_{\text{мелк}}) = (0.221 + 4 \cdot 0.026) = 0.325.$$



Р и с . 4 . Спектральное распределение показателя ослабления света на двух станциях тропического полигона в Атлантическом океане при одинаковой глубине видимости белого диска Z_d , равной 32 м: $C_{\text{мелк}} = 0.026$ мг/л на ст. 5162 (1); $C_{\text{мелк}} = 0.052$ мг/л на ст. 5137 (2)

Fig . 4 . Spectral distribution of the beam attenuation coefficient at two stations of a tropical testing area in the Atlantic Ocean at the same Secchi depth Z_d of 32 m: $C_{\text{fine}} = 0.026$ mg/l at station 5162 (1); $C_{\text{fine}} = 0.052$ mg/l at station 5137 (2)

По аналогии с ситуацией, наблюдавшейся на полигоне в Атлантическом океане (рис. 4), анализ спектров $\epsilon(\lambda)$ в глубоководных и прибрежных районах Черного моря (рис. 3) показывает, что концентрация мелкой взвеси в прибрежных водах больше, чем в глубоководных.

Более высокой (по сравнению с водами глубоководных районов моря) концентрации мелкой взвеси в прибрежных водах есть естественное объяснение.

Мелкая взвесь состоит из минеральных частиц с радиусами менее 1 мкм. Она поступает в море с речными водами и со стоком дождевых вод, а кроме того, образуется в прибрежных водах при волновой абразии берегов и при взмучивании волнами донных осадков. Из прибрежных вод мелкая взвесь переносится с течениями в глубоководную область моря. При этом часть мелкой взвеси выпадает в осадок, и ее концентрация по мере удаления от прибрежных районов уменьшается.

Взаимные связи спектральных показателей ослабления

Коэффициенты взаимной корреляции показателя ослабления во всех участках спектра высоки: $R = 0.973 \dots 0.998$. Минимальный коэффициент корреляции наблюдается между значениями показателя ослабления $\epsilon(\lambda)$, расположенными в наиболее удаленных участках спектра, – $R[\epsilon(416); \epsilon(640)] = 0.973$. Максимальные значения R наблюдаются между значениями $\epsilon(\lambda)$, расположенными в близких участках спектра, – $R[\epsilon(490); \epsilon(527)] = 0.998$; $R[\epsilon(610); \epsilon(640)] = 0.997$.

Таблица 6. Средний коэффициент корреляции показателя ослабления на данной длине волны с показателями ослабления на других длинах волн

Table 6. Average coefficient of correlation between the beam attenuation coefficient at a given wave length and that at other wave lengths

Длина волны λ , нм / Wave length λ , nm	$\langle R \rangle$
416	0.985
432	0.986
468	0.992
490	0.991
527	0.991
587	0.990
610	0.990
640	0.989

Показатели ослабления на длине волны 550 нм вычисляются с использованием соответствующих коэффициентов на длинах волн 527 и 587 нм (см. табл. 3). На рис. 5 представлены для сравнения примеры восстановления спектрального распределения $\varepsilon(\lambda)$ по измеренному значению показателя ослабления света на длине волны 550 нм и 527 нм.

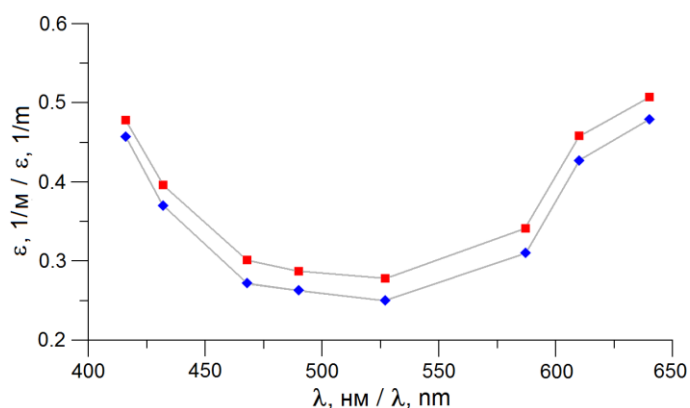


Рис. 5. Спектральное распределение показателя ослабления света, восстановленное по показателям ослабления: на длине волны 550 нм (■) и 527 нм (◆)

Fig. 5. Spectral distribution of the beam attenuation coefficient recovered according to attenuation coefficients: at a wave length of 550 nm (■) and 527 nm (◆)

Заключение

1. По наблюдениям на океанографической платформе в прибрежных водах Южного берега Крыма установлены связи показателя ослабления направленного света в восьми участках спектра в диапазоне длин волн 416–640 нм с глубиной видимости белого диска, изменявшейся от 6 до 17.5 м.

2. Проведено сравнение спектральных распределений $\varepsilon(\lambda)$ при разных значениях Z_d в прибрежных водах и в водах глубоководной области моря, показавшее, что уравнения связи $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$ в прибрежных водах не пригодны для вод глубоководной области.

3. Показано, что особенность уравнений связи $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$ в прибрежных водах связана с большей концентрацией в них мелкой взвеси.

4. Рассчитаны параметры взаимной корреляции показателей ослабления света в разных участках спектра в прибрежных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин И. М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.
2. Левин И. М., Копелевич О. В. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 374–379.
3. Morel A., Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C4. P. 7163–7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
4. Wozniak B., Dera J., Koblentz-Mishke O. J. Bio-optical relationships for estimating primary production in the Ocean // *Oceanologia*. 1992. No. 33. P. 5–38.
5. Взаимосвязь первичных гидрооптических характеристик на 650 нм с глубиной видимости диска Секки и концентрацией сине-зеленых водорослей в Горьковском водохранилище / А. А. Мольков [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
6. Кудрявцева Е. А., Александров С. В. Оценка толщины фотического слоя и ослабления света в водах юго-восточной части Балтийского моря с использованием данных диска Секки // *Естественные и технические науки*. 2017. № 12(114). С. 178–181.
7. Определение трофического статуса пресноводных озер Алтайского края в период 2013–2016 гг. по гидрооптическим характеристикам / И. А. Суторихин [и др.] // *Известия Алтайского государственного университета*. 2017. № 1(93). С. 58–61. doi:10.14258/izvasu(2017)1-10
8. Gordon H. R., Wouters A. W. Some relationships between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters // *Applied Optics*. 1978. Vol. 17, iss. 21. P. 3341–3343. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003341>
9. Pilgrim D. A. The Secchi disc in principle and in use // *Hydrographic Journal*. 1984. Vol. 33. P. 25–30.
10. Graham J. J. Secchi Disc observations and extinction coefficients in the central and eastern North Pacific Ocean // *Limnology and Oceanography*. 1966. Vol. 11, iss. 2. P. 184–190. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.2.0184>

11. *Kullenberg G.* Relationships between Optical Parameters in Different Oceanic Areas // *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday.* Copenhagen : Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, 1980. P. 57–80. (Report (Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi) ; no. 42).
12. *Aas E.* Relations between total quanta blue irradiance and Secchi Disc observations in the Norwegian and Barents Seas // *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday.* Copenhagen : Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, 1980. P. 11–27. (Report (Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi) ; no. 42). URL: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/61687/2/Aas-1980.pdf> (date of access: 20.05.2021).
13. *Matciak M.* Estimation of the attenuation of visible light in waters of the Gulf of Gdansk with the use of Secchi transparency // *Oceanological Studies.* 1997. Vol. 26, iss. 4. P. 35–40.
14. *Маньковский В. И.* Эмпирическая формула для оценки показателя ослабления света в морской воде по глубине видимости белого диска // *Океанология.* 1978. Т. 18, № 4. С. 750–753.
15. *Маньковский В. И.* Связь показателя вертикального ослабления дневного света с глубиной видимости белого диска // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 1. С. 38–43. doi:10.7868/S0030157414010080
16. *Маньковский В. И.* Связь между глубиной видимости белого диска и показателем ослабления излучения для океанических вод // *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов / Г. И. Галазий, К. С. Шифрин (отв. ред.).* Новосибирск : Наука, 1979. С. 100–106.
17. *Маньковский В. И., Земляная Л. А.* Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // *Комплексные океанографические исследования Черного моря.* Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1989. С. 82–86.
18. *Маньковский В. И., Маньковская Е. В.* Корреляционные связи показателя ослабления направленного света с глубиной видимости белого диска в водах Средиземного моря // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : Материалы XXV Международного симпозиума, Новосибирск, 01–05 июля 2019 г.* Новосибирск : Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 2019. С. 466–469.
19. *Шифрин К. С.* Глубина видимости белого диска и цвет моря // *Введение в оптику океана.* Л. : Гидрометеиздат, 1983. Раздел 1.3. С. 23–30.
20. *Levin I. M., Radomyslskaya T. M.* Estimate of water inherent optical properties from Secchi depth // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2012. Vol. 48, iss. 2. P. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S0001433812020065>
21. *Маньковский В. И.* Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // *Системы контроля окружающей среды.* Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 56–60.
22. *Маньковский В. И.* Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 1. С. 24–28. doi:10.15372/AOO20190104
23. *Маньковский В. И., Гринченко Д. В.* Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана // *Морской гидрофизический журнал.* 2018. Т. 34, № 3. С. 254–266. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-254-266

Об авторах:

Маньковский Виктор Иванович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4272-2218**, **ResearcherID: I-5460-2015**, *mankovskiy@mhi-ras.ru*

Маньковская Екатерина Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, *emankovskaya@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Маньковский Виктор Иванович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Маньковская Екатерина Викторовна – сбор информации для исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка графических материалов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Levin, I.M., 2014. Few-Parameter Optical Models of Seawater Inherent Optical Properties. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 7(3), pp. 3–22 (in Russian).
2. Levin, I.M. and Kopelevich, O.V., 2007. Correlations between the Inherent Hydro-Optical Characteristics in the Spectral Range Close to 550 nm. *Oceanology*, 47(3), pp. 344–349. <https://doi.org/10.1134/S000143700703006X>
3. Morel, A. and Maritorena, S., 2001. Bio-Optical Properties of Oceanic Waters: A Reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C4), pp. 7163–7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
4. Wozniak, B., Dera, J. and Koblenz-Mishke, O.J., 1992. Bio-Optical Relationships for Estimating Primary Production in the Ocean. *Oceanologia*, (33), pp. 5–38.
5. Molkov, A.A., Kapustin, I.A., Shchegolkov, Yu.B., Vodeneeva, E.L. and Kalashnikov, I.N., 2018. On Correlation between Inherent Optical Properties at 650 nm, Secchi Depth and Blue-Green Algal Abundance for the Gorky Reservoir. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 11(3), pp. 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
6. Kudryavtseva, E.A. and Aleksandrov, S.V., 2017. [Assesment of the Photic Zone Depth and Light Attenuation in the Waters of the South-East Part of the Baltic Sea using the Secchi Disc Data]. *Natural and Technical Sciences*, (12), pp. 178–181 (in Russian).
7. Sutorikhin, I.A., Akulova, O.B., Bukaty, V.I. and Frolenkov, I.M., 2017. Evaluation of Trophic Status of Freshwater Lakes in Altai Krai in 2013–2016 with Hydro-Optical Characteristics. *Izvestiya of Altai State University*, (1), pp. 58–61. doi:10.14258/izvasu(2017)1-10
8. Gordon, H.R. and Wouters, A.W., 1978. Some Relationships between Secchi Depth and Inherent Optical Properties of Natural Waters. *Applied Optics*, 17(21), pp. 3341–3343. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003341>
9. Pilgrim, D.A., 1984. The Secchi Disc in Principle and in Use. *Hydrographic Journal*, 33, pp. 25–30.

10. Graham, J.J., 1966. Secchi Disc Observations and Extinction Coefficients in the Central and Eastern North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 11(2), pp. 184–190. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.2.0184>
11. Kullenberg, G., 1980. Relationships between Optical Parameters in Different Oceanic Areas. In: Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi, 1980. *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday*. Copenhagen: Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, pp. 57–80.
12. Aas, E., 1980. Relations between Total Quanta Blue Irradiance and Secchi Disc Observations in the Norwegian and Barents Seas. In: Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi, 1980. *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday*. Copenhagen: Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, pp. 11–27. Available at: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/61687/2/Aas-1980.pdf> [Accessed: 20 May 2021].
13. Matciak, M., 1997. Estimation of the Attenuation of Visible Light in Waters of the Gulf of Gdansk with the Use of Secchi Transparency. *Oceanological Studies*, 26(4), pp. 35–40.
14. Man'kovsky, V.I., 1978. [An Empirical Formula for Evaluation of the Beam Attenuation Coefficient in the Sea Water by the Secchi Depth]. *Okeanologia*, 18(4), pp. 750–753 (in Russian).
15. Mankovsky, V.I., 2014. Relation between the Diffuse Attenuation Coefficient and the Secchi Depth. *Oceanology*, 54(1), pp. 32–37. <https://doi.org/10.1134/S0001437014010081>
16. Man'kovsky, V.I., 1979. [An Empirical Formula for the Evaluation of the Beam Attenuation Coefficient in the Sea Water from the Secchi Depth]. In: G. I. Galaziy and K. S. Shifrin, eds., 1979. [*Optical Methods of Studying Oceans and Inland Water Bodies*]. Novosibirsk: Nauka, pp. 100–106 (in Russian).
17. Man'kovsky, V.I. and Zemlyanaya, L.A., 1992. Relationship between White Disc Visibility and the Light Attenuation Index in the Black Sea. In: V. N. Eremeev, ed., 1992. *Complex Oceanographic Research on the Black Sea*. Utrecht: VSP BV, pp. 61–65.
18. Mankovsky, V.I. and Mankovskaya, E.V., 2019. Spectral Relations of the Beam Attenuation Coefficient with Secchi Disk Depth for the Mediterranean Sea Waters. The Influence of Sea Water Components on the Shape of Beam Attenuation Coefficient Spectra in Waters of Different Trophic State. In: O. A. Romanovskii and G. G. Matvienko, eds., 2019. *Proceedings of SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1–5 July 2019*. Novosibirsk, 1120850. doi:10.1117/12.2540809
19. Shifrin, K.S., 1983. [The Secchi Depth and Colour of the Sea]. In: K. S. Shifrin, 1983. [*Introduction to Ocean Optics*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, pp. 23–30 (in Russian).
20. Levin, I.M. and Radomyslskaya, T.M., 2012. Estimate of Water Inherent Optical Properties from Secchi Depth. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(2), pp. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S0001433812020065>
21. Mankovsky, V.I., 2012. [Spectral Laboratory Variable-Baseline Transparency Meter]. In: MHI, 2012. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 56–60.

22. Mankovsky, V.I., 2019. Influence of the Composition of Suspended Matter on the Secchi Disk Depth. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(3), pp. 284–288. <https://doi.org/10.1134/S1024856019030138>
23. Man'kovsky, V.I. and Grinchenko, D.V., 2018. Suspended Matter and Its Composition from the Data on Light Scattering at the Large-Scale Polygon in the Northern Part of the Tropical Atlantic Ocean. *Physical Oceanography*, 25(3), pp. 235–246. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-235-246

About the authors:

Viktor I. Mankovsky, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-4272-2218**, **ResearcherID: I-5460-2015**, mankovskiy@mhi-ras.ru

Ekaterina V. Mankovskaya, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Contribution of the authors:

Viktor I. Mankovsky – problem statement, results processing, analysis and description, article text preparation

Ekaterina V. Mankovskaya – information collection, results analysis and discussion, visual material preparation, article text editing

All the authors have read and approved the final manuscript.