

Корреляции между параметрами индикатрис рассеяния света в поверхностных водах Средиземного моря

В. И. Маньковский, Е. В. Маньковская ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ emankovskaya@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г., после доработки – 02.04.2021 г.

Цель. Цель работы – изучение взаимных связей между параметрами индикатрис рассеяния по данным их измерений в поверхностных водах Средиземного моря.

Методы и результаты. В работе использованы данные измерений индикатрис рассеяния в пробах воды, взятых в нескольких районах южной части Средиземного моря от Гибралтарского пролива до моря Леванта, а также в Эгейском море в центральной части и возле пролива Дарданеллы (май 1998 г.). Рассчитаны следующие параметры индикатрис рассеяния: общий показатель рассеяния, коэффициент асимметрии, коэффициент вариации. Максимальные и минимальные значения составили соответственно 0,21 и 0,09 м⁻¹ для показателя рассеяния; 77,8 и 33,9 для коэффициента асимметрии. Коэффициент вариации угловых показателей рассеяния изменялся в пределах 35–79 % с максимумом на угле 7,5° и минимумом на угле 162,5°. Получены связи коэффициента вариации с углом рассеяния, коэффициента асимметрии с показателем рассеяния и угловых показателей рассеяния с суммарным показателем рассеяния. Они все имеют высокие (более 0,9) коэффициенты корреляции. Общей связи коэффициента вариации с углом рассеяния не соответствует значение коэффициента при угле 2°, равное 51,7 %. Объясняется это разным вкладом в индикатрису рассеяния света крупной и мелкой взвеси. При угле, равном 2°, основной вклад дает крупная (органическая) взвесь, при углах со значениями более 7,5° – мелкая (минеральная) взвесь.

Выводы. Величины коэффициента вариации угловых показателей рассеяния под углами, равными 2° и превышающими 7,5°, показывают изменчивость в Средиземном море концентрации крупной и мелкой взвеси соответственно. Полученное уравнение связи коэффициента асимметрии индикатрисы с общим показателем рассеяния в водах Средиземного моря близко к аналогичному уравнению связи в тропических водах Атлантического океана. Для определения общего показателя рассеяния по величине углового показателя рассеяния для индикатрис Средиземного моря оптимальным является угол, равный 3,5°.

Ключевые слова: индикатриса рассеяния, параметры, асимметрия, вариация, показатель рассеяния, угол рассеяния, Средиземное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0005 и № 0555-2021-0003.

Для цитирования: Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Корреляции между параметрами индикатрис рассеяния света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 554–564. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-554-564

Correlations between the Parameters of the Light Volume Scattering Functions in the Mediterranean Sea Surface Waters

V. I. Mankovsky, E. V. Mankovskaya ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ emankovskaya@mhi-ras.ru

Purpose. The aim of the work is to study relationships between the parameters of the light volume scattering functions based on the data of their measurements in the Mediterranean Sea surface waters.

Methods and Results. The data of measurements of the light volume scattering functions in the water samples taken in a few regions of the southern Mediterranean Sea, namely from the Strait of Gibraltar to the Levant Sea, as well as in the central part of the Aegean Sea and near the Dardanelles Strait (May, 1998) were used. The following parameters of the volume scattering functions were calculated: total scattering coefficient, and asymmetry and variation coefficients. The maximum and minimum values of the scattering coefficient were 0.21 and 0.09 m⁻¹, respectively; and those for the asymmetry coefficient – 77.8 and 33.9. The variation coefficient of the angle scattering coefficients changed within 35–79 %, its maximum and minimum values fell on the angles 7.5° and 162.5°, respectively. Obtained were the relations between the variation coefficient and the scattering angle, the asymmetry coefficient and the scattering coefficient, and the angle scattering coefficients and the total scattering coefficient. All of them possess high (more than 0.9) correlation coefficients. The coefficient value (51.7 %) at the angle 2° does not correspond to general relation of the variation coefficient to the scattering angle. This fact is explained by different contributions of coarse and fine suspended matter to the light volume scattering function. At the angle 2°, the main contribution is made by a coarse (organic) suspended matter, whereas at the angles exceeding 7.5° – by a fine (mineral) suspension.

Conclusions. The values of the variation coefficient of the angle scattering coefficient at the angles equal to 2° and exceeding 7.5° demonstrate variability of the coarse and fine suspended matter in the Mediterranean Sea, respectively. The equation for the relation between the asymmetry coefficient of the light volume scattering functions and the total scattering coefficient obtained for the Mediterranean Sea waters is close to the analogous one obtained for the Atlantic Ocean tropical waters. The angle 3.5° is optimal for determining the total scattering coefficient using the angle scattering coefficient for the Mediterranean Sea functions.

Keywords: volume scattering function, parameters, asymmetry, variation, scattering coefficient, scattering angle, Mediterranean Sea

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task on themes No. 0555-2021-0005 and No. 0555-2021-0003.

For citation: Mankovsky, V.I. and Mankovskaya, E.V., 2021. Correlations between the Parameters of the Light Volume Scattering Functions in the Mediterranean Sea Surface Waters. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(5), pp. 514-524. doi:10.22449/1573-160X-2021-5-514-524

Введение

Основной задачей гидрооптики океана является изучение первичных гидрооптических характеристик исследуемого района. К первичным характеристикам относят физические величины, характеризующие оптические свойства океанской воды. Эти величины не зависят от условий освещенности, а определяются химическим составом воды, термодинамическим состоянием и, главное, наличием в воде оптически активных примесей в виде растворов и взвесей. К основным первичным гидрооптическим характеристикам относятся показатели поглощения, рассеяния, ослабления, а также индикатриса рассеяния (угловое распределение рассеянного света).

Информация о характеристиках рассеяния света необходима при решении многих задач, связанных с оптикой океана, например [1–3]. Поэтому актуальным является исследование рассеяния света в водах различных районов Мирового океана [4–15]. Однако часто трудно найти информацию о гидрооптических характеристиках в заданном районе. В таком случае используются мало-параметрические оптические модели, связывающие между собой различные первичные гидрооптические характеристики и позволяющие по одной измеренной характеристике определить ряд других [16–20]. В работе [8] приведены индикатрисы рассеяния света, измеренные в Средиземном море, и некоторые их характеристики. В настоящей работе, на основе данных измерений, приведенных в работе [8], рассматриваются взаимные связи между некоторыми параметрами индикатрисы.

Установление взаимных связей между параметрами индикатрисы имеет практическое значение: это дает возможность по одному известному параметру оценивать другой, о котором отсутствуют необходимые данные [21]. Особый практический интерес представляет связь суммарного показателя рассеяния света σ с угловыми показателями рассеяния $\sigma(\theta)$, которая позволяет определить суммарный показатель рассеяния, измеряя не все значения функции углового распределения показателя рассеяния $\sigma(\theta)$ в направлениях $\theta = 0-180^\circ$, а только показатель рассеяния в одном из направлений $\sigma(\theta)$. Теоретическое и практическое исследование данного вопроса проводилось в работах [22, 23]. В настоящей работе такое исследование выполнено применительно к водам Средиземного моря.

Район и время исследования

Измерения индикатрис рассеяния света в Средиземном море были выполнены в экспедиции Морского гидрофизического института во 2-м рейсе НИС «Горизонт» (май 1998 г.). Районы измерений располагались в Эгейском море и в южной части моря от Гибралтарского пролива до моря Леванта (рис. 1). Пробы воды, в которых измерялись индикатрисы, отбирались на протяжении всего маршрута на ходу судна.



Р и с. 1. Маршрут НИС «Горизонт» в Средиземном море
F i g. 1. Route of R/V “Gorizont” in the Mediterranean Sea

Аппаратура и методика измерений

Индикатрисы рассеяния света измерялись нефелометром¹ в пробах воды, отбиравшихся с поверхности моря. В табл. 1 приведены технические характеристики нефелометра.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Технические характеристики нефелометра
Technical characteristics of a nephelometer

Характеристика / Characteristic	Значение / Value
Углы измерений $\sigma(\theta)$, ° / Angles of measurements $\sigma(\theta)$, °	2; 7,5; 12,5; далее через 5 до 162,5 / 2; 7,5; 12,5; further in 5 to 162,5
Спектральная область измерений, нм / Spectral range of measurements, nm	520 (± 40)
Погрешность измерений $\sigma(\Theta)$, % / Error of measurements $\sigma(\Theta)$, %	10

Измерения показателя рассеяния в нефелометре производятся в интервале углов 2–162,5°. Показатели рассеяния в области малых углов находились путем экстраполяции индикатрисы в эту область по формуле $\lg\sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для определения коэффициентов A , B , C использовались значения $\sigma(\theta)$, измеренные при углах 2; 7,5; 12,5°. В результате рассчитывались показатели рассеяния на углах: 0,25; 0,75; 1,25; 1,75; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5°. На углах, больших 162,5°, принималось $\sigma(\theta) = \text{const}$.

Параметры индикатрисы

В качестве характеристики рассеяния света в гидрооптике используется функция углового распределения показателя рассеяния $\sigma(\theta)$ в направлениях $\theta = 0-180^\circ$. В теории рассеяния света индикатрисой рассеяния называется функция $\chi(\theta) = 4\pi\sigma(\theta)/\sigma$, где σ – показатель рассеяния [24]. Функция $\chi(\theta)$ показывает вероятность рассеяния света в разных направлениях. В настоящей работе термин «индикатриса рассеяния» применяется к функции $\sigma(\theta)$, показывающей количество рассеянного света в разных направлениях.

Рассчитывались следующие интегральные параметры индикатрисы:

– показатель рассеяния σ , м^{-1} , по формуле
$$\sigma = 2\pi \int_0^{180} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta;$$

– коэффициент асимметрии K – по формуле
$$K = \frac{\int_0^{90} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_{90}^{180} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta}$$

¹ Маньковский В. И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев : Наукова думка, 1981. С. 87–89.

Результаты измерений и их обсуждение

Всего измерено 32 индикатрисы. Максимальные и минимальные значения параметров индикатрисы, наблюдавшиеся в Средиземном море, составили соответственно: 0,21 и 0,09 м⁻¹ для показателя рассеяния; 77,8 и 33,9 для коэффициента асимметрии.

Вариации $\sigma(\theta)$. Для всего массива индикатрис были рассчитаны коэффициенты вариации показателей рассеяния ($\Delta(\theta)$, %) при разных углах:

$$\Delta(\theta) = \delta[\sigma(\theta)] / \langle \sigma(\theta) \rangle,$$

где $\delta[\sigma(\theta)]$ – среднеквадратическое отклонение: $\langle \sigma(\theta) \rangle$ – средняя величина.

Значения $\Delta(\theta)$ при разных углах рассеяния показаны на рис. 2. В диапазоне углов 7,5–162,5° коэффициент вариации аппроксимируется функцией $\Delta(\theta) = 152,6 \theta^{-0,3}$ ($R = 0,91$).

Максимальное значение $\Delta(\theta)$ наблюдается при угле рассеяния 7,5° и составляет $\Delta(7,5^\circ) = 79$ %. С увеличением угла рассеяния коэффициент вариации снижается и при угле 162,5° составляет $\Delta(162,5^\circ) = 35$ %.

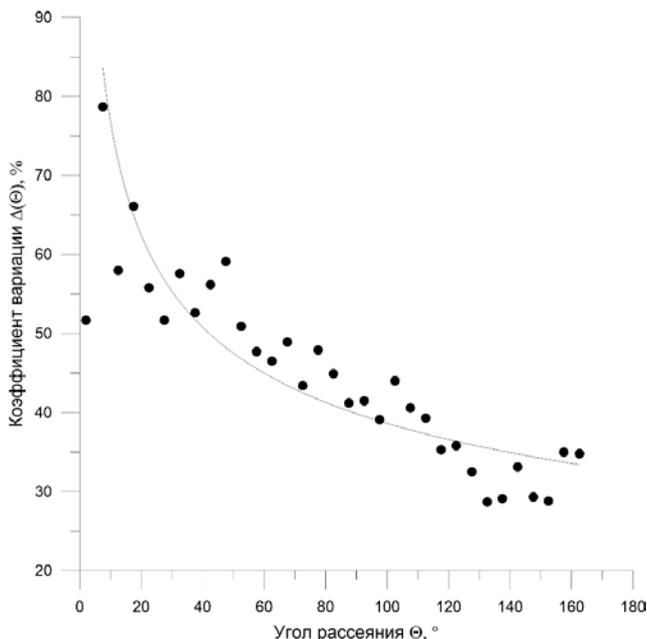


Рис. 2. Коэффициент вариации показателя рассеяния в зависимости от направления рассеяния
Fig. 2. Variation coefficient of the scattering coefficient depending on direction of scattering

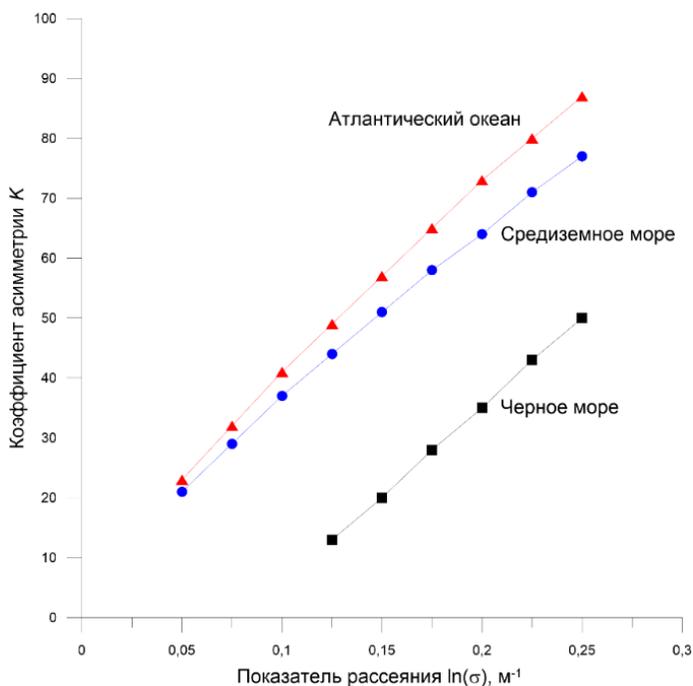
Общей связи (рис. 2) не соответствует коэффициент вариации $\Delta(2^\circ) = 51,7$ %. Объясняется это разным вкладом в индикатрису рассеяния света крупной и мелкой взвеси [25]. При малых углах основной вклад в рассеяние света дает крупная взвесь. Так, при $\theta = 2^\circ$ вклад крупной взвеси втрое превышает вклад мелкой взвеси. При угле $\theta = 7,5^\circ$ вклад мелкой взвеси выше

вклада крупной взвеси в 4 раза, при $\theta = 15^\circ$ – в 30 раз, а при $\theta = 162,5^\circ$ – примерно в 100 раз. То есть, в Средиземном море коэффициенты вариации при угле 2° отражают изменчивость концентрации крупной (органической) взвеси, а при углах $\theta > 7,5^\circ$ – мелкой (минеральной) взвеси.

Связь коэффициента асимметрии с показателем рассеяния. В Средиземном море, как и в других водоемах, наблюдалась связь коэффициента асимметрии индикатрисы с показателем рассеяния: при возрастании показателя рассеяния коэффициент асимметрии увеличивается.

Уравнение связи $K = f(\sigma)$ в водах Средиземного моря, по данным работы [13], имеет вид $K = 232\sigma^{0,8}$ ($R = 0,95$). В работе [26] показано, что коэффициенты связи $K = f(\sigma)$ зависят от состава взвеси в воде данного водоема и имеют региональный характер.

При сопоставлении уравнений связи $K = f(\sigma)$ в Средиземном море и в других водоемах [9, 11, 26] получено, что уравнения, описывающие связь для Средиземного моря и для полигона в тропических водах Атлантического океана [11], близки (рис. 3). Это, очевидно, обусловлено тем, что в Средиземное море через Гибралтарский пролив поступают атлантические воды [27], движущиеся на восток в южной части моря, в которой и проводились измерения индикатрисы рассеяния света.



Р и с. 3. Связь коэффициента асимметрии с показателем рассеяния в водах Средиземного, Черного морей и Атлантического океана

F i g. 3. Relation between the asymmetry coefficient and the scattering coefficient in the waters of the Mediterranean and Black seas, and the Atlantic Ocean

Отметим, что зависимость $K = f(\sigma)$ в Черном море, представленная на рис. 3, отличается от аналогичных зависимостей в Средиземном море и в водах Тропической Атлантики существенно меньшими значениями коэффициента асимметрии индикатрис. Объяснить это можно высокими значениями концентрации мелкой (минеральной) взвеси в водах Черного моря. Коэффициенты асимметрии индикатрисы рассеяния на таких частицах имеют намного меньшую величину по сравнению с индикатрисами рассеяния на крупных (органических) частицах.

Связь угловых показателей рассеяния с суммарным показателем рассеяния. В работах [22, 23, 28] исследовался вопрос о возможности определения общего показателя рассеяния путем измерения не всей индикатрисы, а только показателя рассеяния при некотором фиксированном угле $\sigma(\theta)$. Для этого необходимо определить, при каком угле ошибка расчета σ по величине $\sigma(\theta)$ будет наименьшей.

В [28] рассчитывалось среднеквадратическое отклонение функции $\sigma(\theta)/\sigma$ при разных углах рассеяния. Показатели рассеяния $\sigma(\theta)$ в [28] измерялись на 4, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135°. Согласно результатам измерений в разных районах Мирового океана, минимальное среднеквадратическое отклонение функции $\sigma(\theta)/\sigma$ наблюдалось при угле 4°.

Однако в этом вопросе оставалась неопределенной область углов θ в диапазоне 4–15° и менее 4°. Эта область углов исследовалась в работах [22, 23]. Показатели рассеяния в области малых углов в [22, 23] определялись по методике, описанной в настоящей статье. Рассчитывался коэффициент корреляции σ с величинами $\sigma(\theta)$. Результаты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Максимумы корреляции суммарного показателя рассеяния σ с показателем рассеяния при разных углах $\sigma(\theta)$ [22]
Maximums of correlation between the total scattering coefficient σ and the scattering coefficient at different angles $\sigma(\theta)$ [22]

Район / Region	Угол, соответствующий максимуму коэффициента корреляции $\theta(R_{\max})$, ° / The angle corresponding to the maximum of correlation coefficient $\theta(R_{\max})$, °	Максимум коэффициента корреляции R_{\max} / Maximum of the correlation coefficient R_{\max}
Средиземное море / Mediterranean Sea	3,0	0,99
Северная Атлантика / North Atlantic	4,0	0,98
Черное море / Black Sea	5,0	0,97
Среднее / Average	4,5	0,96

Аналогичные расчеты были выполнены в настоящей работе по результатам измерений индикатрис в Средиземном море. На рис. 4 представлен график связи коэффициента корреляции σ с величиной $\sigma(\theta)$ в зависимости от угла рассеяния. Максимальный коэффициент корреляции $R_{\max} = 0,98$ приходится на угол θ , равный $3,5^\circ$. Ранее, в работе [22], было найдено: $\theta(R_{\max}) = 3,0^\circ$. Разница небольшая и может быть следствием разных статистических данных, использованных при расчетах.

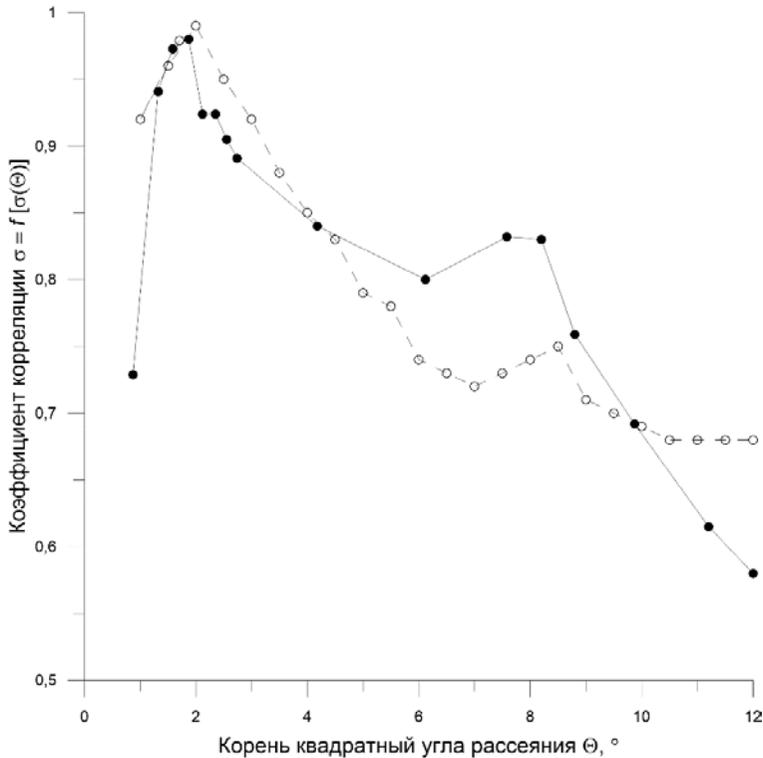
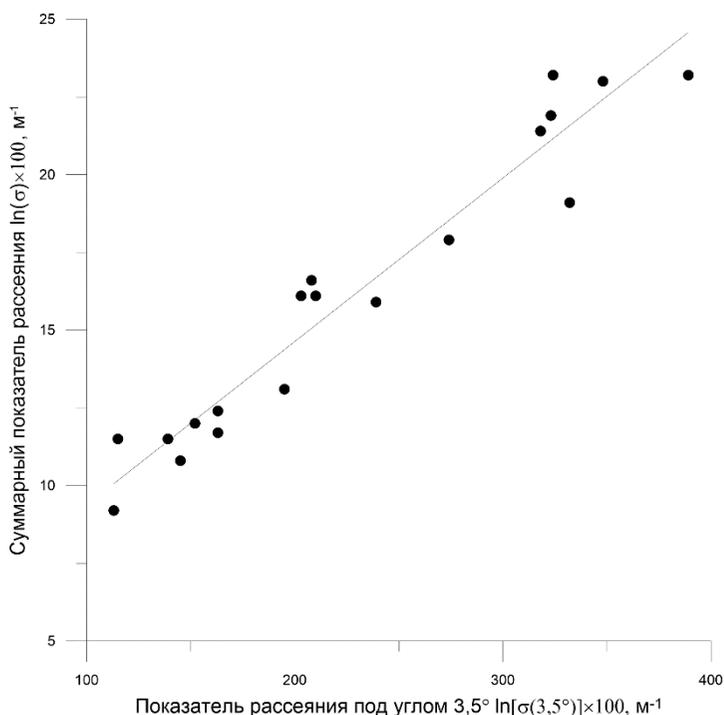


Рис. 4. Коэффициент корреляции общего рассеяния с угловым рассеянием при разных углах рассеяния в Средиземном море (сплошная линия) и по модельным индикатрисам (штриховая линия)
Fig. 4. Coefficient of correlation between the total scattering and the angle scattering at different scattering angles in the Mediterranean Sea (solid line) and based on the model functions (dashed line)

На рис. 4 также показан для сравнения ход коэффициента корреляции $\sigma = f[\sigma(\theta)]$, рассчитанный по модельным индикатрисам [29]. Максимальный коэффициент корреляции для модельных индикатрис приходится на угол θ , равный $4,0^\circ$. Примечательно, что для экспериментальных и модельных индикатрис коэффициент корреляции с увеличением угла рассеяния постепенно уменьшается, за исключением области углов $50-80^\circ$, в которой наблюдается его некоторое увеличение.

На рис. 5 для вод Средиземного моря показана связь суммарного показателя рассеяния с показателем рассеяния в направлении $\theta = 3,5^\circ$. Уравнение связи σ , m^{-1} : $\sigma = 0,053\sigma(3,5^\circ)^{0,8}$, коэффициент корреляции $R = 0,97$.



Р и с. 5. Связь общего показателя рассеяния с показателем рассеяния под углом $3,5^\circ$ в водах Средиземного моря

F i g. 5. Relation between the total scattering coefficient and the scattering coefficient at the angle 3.5° in the Mediterranean Sea waters

Заклучение

Анализ рассмотренных в работе взаимных связей между некоторыми параметрами индикатрис рассеяния в поверхностных водах Средиземного моря показывает следующее.

1. Коэффициент вариации угловых показателей рассеяния $\Delta(\theta)$ для индикатрис моря изменяется в пределах 35–79 % с максимумом на $7,5^\circ$ и минимумом на $162,5^\circ$. Общей зависимости $\Delta(\theta)$ от угла рассеяния θ не соответствует значение $\Delta(2^\circ) = 51,7\%$. Объясняется это разным вкладом в индикатрису рассеяния света крупной и мелкой взвеси. При угле θ , равном 2° , основной вклад дает крупная (органическая) взвесь, при углах θ , больших $7,5^\circ$, – мелкая (минеральная) взвесь. Соответственно, величины $\Delta(\theta)$ на этих углах показывают вариации в Средиземном море концентрации крупной и мелкой взвеси.

2. Сравнение связи коэффициента асимметрии индикатрисы K с общим показателем рассеяния σ в водах Средиземного моря с известными в литературе данными о такой связи в водах других водоемов показало, что она близка к связи в тропических водах Атлантического океана. Это можно объяснить тем, что в Средиземное море через Гибралтарский пролив поступают атлантические воды, движущиеся на восток в южной части моря, в которой и проводились измерения индикатрис рассеяния света.

3. Оптимальным углом для определения общего показателя рассеяния σ по величине $\sigma(\theta)$ для индикатрис Средиземного моря является угол θ , равный $3,5^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шибанов Е. Б. Расчет параметров глубинного режима в море с использованием данных об индикатрисе рассеяния света морской водой // Процессы в геосредах. 2020. № 2 (24). С. 738–745.
2. Оптические методы исследования океана: дистанционные и контактные наблюдения / Е. Б. Шибанов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тезисы докладов XXIV Международного симпозиума. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С. P18–P27. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
4. Inherent optical properties of the Sargasso Sea / G. Kullenberg [et al.]. Copenhagen : København Universitet, Institut for Fysisk Oceanografi, 1970. 18 p. (Institute of Physical Oceanography Report ; No. 11).
5. Petzold T. J. Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters : final report. San Diego, USA : University of California, 1972. 79 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/73p3r43q> (date of access: 09.09.2021).
6. Светорассеивающие свойства морской воды в различных районах / О. В. Копелевич [и др.] // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. М. : Наука, 1974. С. 113–116.
7. Measurement and modeling of volume scattering functions for phytoplankton from Norwegian coastal waters / E. Marken [et al.] // Journal of Marine Research. 2017. Vol. 75, no. 5. P. 579–603. <https://doi.org/10.1357/002224017822109514>
8. Mankovsky V. I., Haltrin V. I. Light scattering phase functions measured in waters of Mediterranean Sea // OCEANS '02 MTS/IEEE : conference proceedings. Piscataway : IEEE, 2002. Vol. 4. P. 2368–2373. doi:10.1109/OCEANS.2002.1191998
9. Mankovsky V. I., Solov'ev M. V. Seawater phase scattering functions in the Black Sea // Current problems in optics of natural waters (ONW'2013) : VII International conference, St.-Petersburg, Russia, September 10–14, 2013 : proceedings. Saint Petersburg : Nauka, 2013. P. 293–296.
10. Shybanov E. B., Lee M. E. Light scattering properties of seawater in the central and north-western part of the Black Sea // Current problems in optics of natural waters (ONW'2013) : VII International conference, St.-Petersburg, Russia, September 10–14, 2013 : proceedings. Saint Petersburg : Nauka, 2013. P. 252–257.
11. Маньковский В. И. Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 1–6. doi:10.15372/AOO20180806
12. Measurements and modeling of the volume scattering function in the coastal northern Adriatic Sea / J.-F. Berthon [et al.] // Applied Optics. 2007. Vol. 46, iss. 22. P. 5189–5203. <https://doi.org/10.1364/AO.46.005189>
13. Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Пространственная изменчивость оптических характеристик вод в южной части Средиземного моря в весенний период (май 1998 года) // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 53–65. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-53-65
14. Measurements of scattering function of sea water in Southern Baltic / W. Freda [et al.] // The European Physical Journal Special Topics. 2007. Vol. 144, iss. 1. P. 147–154. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2007-00119-6>

15. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) / M. Chami [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. Vol. 110, iss. C11. C11020. doi:10.1029/2005JC003008
16. Левин И. М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.
17. 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.
18. Oishi T. Significant relationship between the backward scattering coefficient of sea water and the scatterance at 120° // Applied Optics. 1990. Vol. 29, iss. 31. P. 4658–4665. <https://doi.org/10.1364/AO.29.004658>
19. Левин И. М., Радомысльская Т. М. Оценка гидрооптических характеристик по глубине видимости диска Секки // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 2. С. 239–246.
20. Haltrin V. I. Empirical algorithms to restore a complete set of inherent optical properties of seawater using any two of these properties // Canadian Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 26, iss. 5. P. 440–445. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10855275>
21. Маньковский В. И., Шемшур В. Е. Связи между интегральными характеристиками морских индикатрис рассеяния света // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26, № 3. С. 325–327.
22. Маньковский В. И. О соотношении между интегральным показателем рассеяния света морских вод и показателем рассеяния в фиксированном направлении // Морские гидрофизические исследования. Севастополь : МГИ, 1971. № 6 (56). С. 145–154.
23. Маньковский В. И. Экспериментальные и теоретические данные о точке пересечения индикатрис рассеяния света морской взвесью // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11, № 12. С. 1284–1293.
24. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М. ; Л. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1951. 288 с.
25. Копелевич О. В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. Физическая модель ослабления // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Моница. М. : Наука, 1983. С. 208–234.
26. Маньковский В. И. Изменение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света природных вод, содержащих органические частицы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 3. С. 373–378. doi:10.7868/S0002351516030081
27. Средиземное море // Океанографическая энциклопедия / Под ред. Р. У. Фейрбриджа. Пер. с англ. Л. : Гидрометеиздат, 1974. С. 489–495.
28. Копелевич О. В., Буренков В. И. О нефелометрическом методе определения общего показателя рассеяния света морской водой // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Том 7, № 12. С. 1280–1289.
29. Morel A. Indicatrices de diffusion calculees par la theorie de mie pour les systemes polydisperses, en vue de l'application aux particules marines : rapport. Villefrancne-sur-mer, France : Centre de recherches Oceanographiques, 1973. P. 1–75.

Об авторах:

Маньковский Виктор Иванович, старший научный сотрудник, отдел оптики и биофизики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. 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, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru