

## Параметры индикатрис рассеяния света и состав взвеси в зоне апвеллинга на экваторе в Индийском океане

В. И. Маньковский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ [mankovskiy@mhi-ras.ru](mailto:mankovskiy@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 01.06.2022;  
принята к публикации 25.06.2022.

### Аннотация

**Цель.** Цель статьи – представить и обсудить результаты измерений индикатрис рассеяния света, их параметры, а также рассчитанный по индикатрисам состав взвеси в зоне апвеллинга на экваторе в западной части Индийского океана.

**Методы и результаты.** Данные измерений индикатрисы рассеяния света и глубины видимости белого диска получены в 10-м рейсе НИС «Академик Вернадский» в феврале 1975 г. В районе экватора был сделан океанографический разрез по  $54,5^\circ$  в. д. от  $2^\circ$  ю. ш. до  $2^\circ$  с. ш. со станциями через  $0,5^\circ$ . На разрезе наблюдался подъем вод в районе экватора. Рассчитаны параметры индикатрисы: показатель рассеяния, коэффициент асимметрии, вытянутость индикатрисы. По измеренным индикатрисам рассчитаны параметры взвеси: массовая и численная концентрации органических и минеральных частиц, средний размер органических частиц. В максимуме апвеллинга на  $0,4^\circ$  ю. ш. показатель рассеяния  $\sigma$  составил  $0,849$  1/м, в фоновых водах на  $2^\circ$  с. ш. –  $0,207$  1/м. Увеличение коэффициента асимметрии индикатрисы при возрастании показателя рассеяния определяется соотношением  $K = 255\sigma + 6$  ( $R = 0,97$ ). Проведено сравнение параметров индикатрис и состава взвеси в зонах апвеллинга на экваторе в Индийском и Атлантическом океанах, показавшее более высокую концентрацию мелких (минеральных) взвешенных частиц в водах Атлантического океана. В максимуме апвеллинга массовая концентрация общей взвеси  $C_{\text{сум}}$  составила  $0,938$  мг/л, в фоновых водах  $0,364$  мг/л. Установлена зависимость среднего радиуса органических частиц от концентрации взвеси.

**Выводы.** Установлено общее для Индийского и Атлантического океанов значение угла  $\theta_{\text{max}}$ , равное  $3,5^\circ$ , при котором восстановление общего показателя рассеяния по измерению рассеяния в данном направлении оптимально. Основу массовой концентрации взвеси на разрезе составляют органические частицы. Полученная связь размеров частиц органической взвеси с концентрацией взвеси в водах зоны апвеллинга подтверждает предыдущие исследования: при увеличении продуктивности размеры частиц уменьшаются, и наоборот, в низкопродуктивных водах размеры частиц возрастают.

**Ключевые слова:** индикатриса рассеяния, показатель рассеяния, коэффициент асимметрии, белый диск, органическая взвесь, минеральная взвесь, размер частиц

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0003.

**Для цитирования:** Маньковский В. И. Параметры индикатрис рассеяния света и состав взвеси в зоне апвеллинга на экваторе в Индийском океане // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 5. С. 499–511. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-499-511

# Parameters of the Light Volume Scattering Functions and Composition of Suspension in the Upwelling Zone at the Equator in the Indian Ocean

V. I. Mankovsky

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
✉ [mankovskiy@mhi-ras.ru](mailto:mankovskiy@mhi-ras.ru)

## Abstract

**Purpose.** The paper is aimed at presenting and discussing the results of measurements of the light volume scattering functions and their parameters, and also the suspension composition calculated from the light volume scattering functions in the upwelling zone at the equator in the western Indian Ocean.

**Methods and Results.** The measurement data of the light volume scattering function and the Secchi disk depth were obtained in the 10<sup>th</sup> cruise of the R/V “Akademik Vernadsky” in February, 1975. In the equator region, an oceanographic section was carried out along 54.5 °E from 2 °S up to 2 °N with the stations located in each 0.5°. The section data showed a water rise in this region. The following light scattering function parameters were calculated: the scattering and asymmetry coefficients, and the light volume scattering function elongation. Based on the light volume scattering functions, the following suspension parameters were calculated: mass and numerical concentrations of the organic and mineral particles, and average size of the organic particles. At the upwelling maximum at 0.4 °S, the scattering coefficient  $\sigma$  was 0.849 1/m, in the background waters at 2° N – 0.207 1/m. Increase in the asymmetry coefficient of the light volume scattering function with the scattering coefficient is determined by relation  $K = 255\sigma + 6$  ( $R = 0.97$ ). The parameters of the light volume scattering functions and the suspension composition in the upwelling zones at the equator in the Indian and Atlantic oceans were compared; the results showed a higher concentration of small (mineral) suspended particles in the waters of the Atlantic Ocean. At the upwelling maximum, the mass concentration of total suspension  $C_{\text{total}}$  constituted 0.938 mg/l, and in the background waters – 0.364 mg/l.

**Conclusions.** The common value of angle  $\theta_{\text{max}}$  for the Indian and Atlantic oceans is found to be 3.5°. The obtained relationship between the particle size of organic suspension and the suspension concentration in the upwelling zone confirms the previous studies, namely, productivity increase is accompanied by decrease of the particle sizes, and vice versa, in the low-productivity waters, the particle sizes increase. The bulk of the mass suspension concentration at the section consists of organic particles.

**Keywords:** scattering function, scattering coefficient, asymmetry coefficient, Secchi disk, organic suspension, mineral suspension, particle size

**Acknowledgments:** the study was carried out within the framework of the state assignment of MHI RAS on theme No. FNNN-2021-0003.

**For citation:** Mankovsky, V.I., 2022. Parameters of the Light Volume Scattering Functions and Composition of Suspension in the Upwelling Zone at the Equator in the Indian Ocean. *Physical Oceanography*, 29(5), pp. 480-490. doi:10.22449/1573-160X-2022-5-480-490

## Введение

Рассеяние света частицами воды и ее примесями характеризуется таким оптическим параметром, как индикатриса рассеяния (угловое распределение рассеянного света). Данная величина зависит от длины волны и угла рассеяния.

Информация об индикатрисах рассеяния света необходима при решении многих задач в гидрооптике: расчете световых полей в море, создании приборов подводного видения, разработке алгоритмов измерения биооптических характеристик океанских вод со спутников и др. [1–5]. По индикатрисам рассеяния света можно определять концентрацию содержащейся в воде общей

взвеси и ее фракций – органической и минеральной. Поэтому актуальным является исследование рассеяния света в водах различных районов Мирового океана (работы <sup>1</sup> и [6–9]).

Данные о функциях рассеяния света, полученные путем измерения спектрального углового показателя рассеяния света в различных водоемах, многочисленны. Поэтому информация о результатах контактных измерений этой величины представляет определенный интерес, а данные таких наблюдений важны независимо от времени их получения.

В настоящей работе представлены и обсуждаются результаты измерений индикатрис рассеяния света в западной части Индийского океана. Данные получены в 10-м рейсе НИС «Академик Вернадский» в феврале 1975 г. В районе экватора был сделан океанографический разрез по 54,5° в. д. от 2° ю. ш. до 2° с. ш. Станции на разрезе располагались через 0,5°. На разрезе наблюдался подъем вод в районе экватора. До 2019 г. эти данные считались утерянными, что обуславливает необходимость их освещения и публикации.

В экспедиции измерялись: индикатриса рассеяния света и глубина видимости белого диска. В работе приводятся результаты измерений индикатрис рассеяния света, их параметры, рассчитанный по индикатрисам состав взвеси в зоне апвеллинга на экваторе в западной части Индийского океана.

### Аппаратура и методика измерений

Индикатриса рассеяния света измерялась нефелометром <sup>2</sup> (табл. 1) на глубинах от 5 до 105 м.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

#### Технические характеристики нефелометра Nephelometer specifications

| Характеристика / Characteristic  | Значение / Value               |
|--|--------------------------------|
| Углы измерений $\sigma(\Theta)$ , ° /<br>Measurement angles $\sigma(\Theta)$ , °       | 2; 7,5; далее через 5 до 162,5 |
| Спектральная область измерений, нм /<br>Spectral range of measurements, nm             | 520 ( $\pm$ 40)                |
| Погрешность измерений $\sigma(\Theta)$ , % /<br>Measurement error $\sigma(\Theta)$ , % | 10                             |
| Максимальная глубина погружения, м /<br>Maximum depth, m                               | 150                            |

Минимальный угол, на котором в нефелометре определяется показатель рассеяния света, составляет 2°. Необходимые для расчетов показатели рассеяния света на углах  $\theta$ , меньших 2°, находились путем экстраполяции

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Маньковский В. И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР / Отв. ред. Б. Н. Малиновский, В. Т. Черепин. К. : Наукова Думка, 1981. С. 87–89.

измеренной индикатрисы в эту область по формуле  $\lg\sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$ . Для нахождения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  использовались измеренные показатели рассеяния  $\sigma(\theta)$  на углах  $\theta$ , равных 2; 7,5; 12,5°. На углах более 162,5° принималось  $\sigma(\theta) = \text{const}$ .

Глубина видимости белого диска определялась по стандартной методике.

### 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  $\sigma$  – показатель рассеяния<sup>3</sup>. 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 [6].

Рассчитывались следующие параметры индикатрисы:

– показатель рассеяния  $\sigma$  ( $\text{м}^{-1}$ ):  $\sigma = 2\pi \int_0^{180} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta$ ;

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

– вытянутость индикатрисы:  $L(2,90) = \lg[\sigma(2)/\sigma(90)]$ .

### Формулы расчета взвеси

Для расчета характеристик взвеси по индикатрисам рассеяния использовались формулы из работы<sup>4</sup> и [10]. Численная и массовая концентрация частиц в воде рассчитывалась для трех фракций с радиусами  $r$ , равными 0,2÷0,5, 0,5÷1,0 мкм и более 1,0 мкм. Частицы с радиусом в диапазоне 0,2÷0,5 мкм, 0,5÷1,0 мкм составляют минеральную фракцию взвеси, с радиусом более 1,0 мкм – органическую. При расчете массовой концентрации плотность минеральных частиц принимают равной  $2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , плотность органических –  $1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ .

Для расчета концентрации частиц с радиусом  $r$  более 1,0 мкм используется показатель рассеяния  $\sigma(\theta)$  на угле  $\theta = 1^\circ$ , для частиц с радиусом 0,2÷0,5 мкм и 0,5÷1,0 мкм – на углах  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 6^\circ$ . В табл. 2 приведены коэффициенты для расчета численности частиц  $N$  и их массовой концентрации  $C$  по формуле  $N(C) = m \cdot \sigma(\theta) + n$  [11].

<sup>3</sup> Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.; Л., 1951. 288 с.

<sup>4</sup> Копелевич О. В., Маштаков Ю. Л., Буренков В. И. Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды с помощью погружаемого малоуглового измерителя рассеяния // Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975. С. 54–60.

**Значения коэффициентов регрессии  $m$ ,  $n$  и среднеквадратических относительных ошибок  $\delta$  определения параметров взвеси**  
**Values of the regression coefficients  $m$ ,  $n$  and rms relative errors  $\delta$  in determining the suspension parameters**

| Радиус частиц $r$ ,<br>мкм /<br>Radius of particles $r$ , $\mu\text{m}$ | Угол рассеяния $\theta$ , ° /<br>Scattering angle $\theta$ , ° | Численность частиц<br>$N$ , млн/л /<br>Number of particles<br>$N$ , mln/l |      |            | Массовая концентрация<br>$C$ , мг · м <sup>-3</sup> /<br>Mass concentration<br>$C$ , mg · m <sup>-3</sup> |      |            |
|---|--|---|------|------------|---|------|------------|
|   |  | $m$   | $n$  | $\delta N$ | $m$   | $n$  | $\delta C$ |
| 0,2–0,5   | 45   | $3 \cdot 10^4$  | -1,0 | 0,29       | $8,9 \cdot 10^3$  | -3,0 | 0,16       |
| 0,5–1,0   | 6  | 9,5   | 0,2  | 0,14       | 24,0  | 0,5  | 0,14       |
| > 1,0   | 1  | 0,2   | 0,3  | 0,35       | 12,0  | 16,0 | 0,20       |

В работе [10] для расчета характеристик взвеси  $\xi$  приводится обобщенная формула

$$\xi = A \left[ B - \lg \frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)} \right]^P + C \lg \left[ \frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)} \right] + D.$$

По отношению  $\lg[\sigma(0,5)/\sigma(2,0)]$  определяется средний радиус органических частиц  $r_{\text{орг}}$ . Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $P$  в формуле находятся в [10] по специальной таблице.

### Результаты и их обсуждение

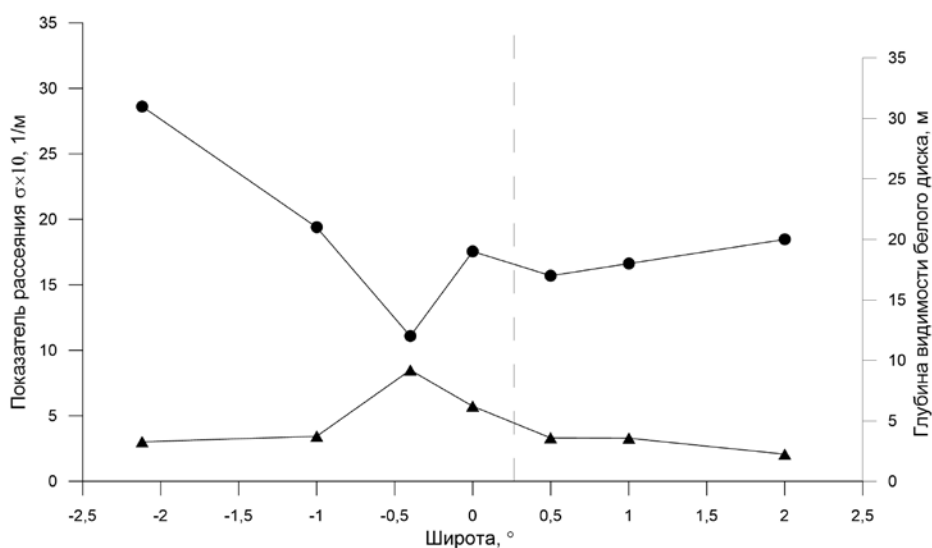
*Параметры индикатрис.* На рис. 1 показано распределение на разрезе показателя рассеяния света на глубине 5 м и глубины видимости белого диска. В максимуме апвеллинга на  $0,4^\circ$  ю. ш. показатель рассеяния  $\sigma$  составил  $0,849$  1/м, в фоновых водах на  $2^\circ$  с. ш.  $-0,207$  1/м. Параметры индикатрис на разрезе представлены в табл. 3. Рассмотрим их изменчивость.

Данные табл. 3 показывают увеличение коэффициента асимметрии индикатрисы при возрастании показателя рассеяния. Такая связь по данным из работы [11] наблюдается во всех природных водах, и она имеет региональный характер. В нашем случае связь  $K = f(\sigma)$  выражается формулой ( $R = 0,97$ )  $K = 255\sigma + 6$ .

По данным измерений индикатрис рассеяния света в тропической зоне Атлантического океана [6] рассчитана связь  $K = f(\sigma)$  для вод апвеллинга на экваторе ( $1^\circ$  ю. ш. –  $2^\circ$  с. ш.;  $20,5^\circ$ – $22,0^\circ$  з. д.). Формула связи ( $R = 0,96$ ):  $K = 353\sigma + 2$ .

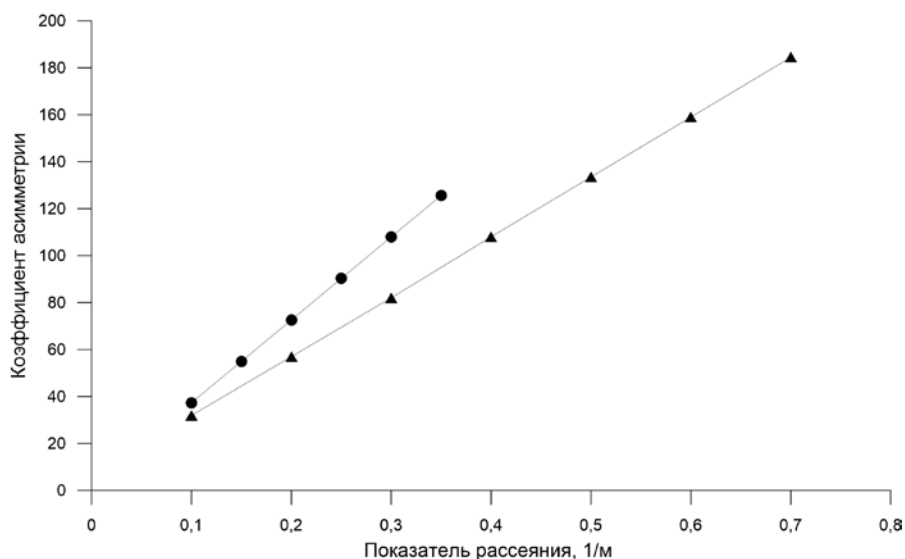
На рис. 2 показаны связи  $K = f(\sigma)$  для вод апвеллинга на экваторе в Индийском и Атлантическом океанах. Меньший наклон линии связи  $K = f(\sigma)$  в Индийском океане, согласно работе [11], свидетельствует о более высокой концентрации в воде мелких (минеральных) взвешенных частиц по сравнению с водами в Атлантическом океане. Это подтверждают расчеты состава взвеси. Среднее отношение концентрации минеральных частиц

к общей концентрации взвеси в Индийском океане  $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}}$  составляет 0,17, в Атлантическом океане – 0,06.



**Р и с. 1.** Показатель рассеяния на глубине 5 м (▲) и глубина видимости белого диска (●) на разрезе через экватор (обозначен штриховой линией) по 54,5° в. д.

**F i g. 1.** Scattering coefficient at the 5 m depth (▲) and Secchi depth (●) at the section across the equator (indicated by a dashed line) along 54.5° E



**Р и с. 2.** Связь коэффициента асимметрии с показателем рассеяния в зоне апвеллингов на экваторе в Индийском (▲) и Атлантическом (●) океанах

**F i g. 2.** Relationship between the asymmetry and scattering coefficients in the upwelling zone at the equator in the Indian (▲) and Atlantic (●) oceans

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Параметры индикатрис в разных точках разреза**  
**Parameters of the light volume scattering functions at different points of the section**

| Координаты /<br>Coordinates                            | Глубина, м /<br>Depth, m | Показатель<br>рассеяния $\sigma$ ,<br>1/м / Scattering<br>coefficient $\sigma$ ,<br>1/m | Коэффициент<br>асимметрии /<br>Asymmetry<br>coefficient | Вытянутость /<br>Elongation |
|--|--------------------------|---|---|-----------------------------|
| 02° 07' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>02° 07' S, 54° 31' E | 5                        | 0,301   | 45,4  | 4,26                        |
| 02° 07' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>02° 07' S, 54° 31' E | 42                       | 0,274   | 43,2  | 4,19                        |
| 02° 07' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>02° 07' S, 54° 31' E | 75                       | 0,260   | 39,6  | 4,12                        |
| 02° 07' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>02° 07' S, 54° 31' E | 105                      | 0,239   | 37,0  | 4,12                        |
| 01° 01' ю. ш., 54° 29' в. д. /<br>01° 01' S, 54° 29' E | 5                        | 0,343   | 90,5  | 4,32                        |
| 00° 26' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>00° 26' S, 54° 31' E | 5                        | 0,849   | 163,0   | 4,55                        |
| 00° 26' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>00° 26' S, 54° 31' E | 20                       | 0,616   | 170,0   | 4,57                        |
| 00° 26' ю. ш., 54° 31' в. д. /<br>00° 26' S, 54° 31' E | 57                       | 0,308   | 99,5  | 4,41                        |
| 00° 00' с. ш., 54° 26' в. д. /<br>00° 00' N, 54° 26' E | 5                        | 0,573   | 145,0   | 4,59                        |
| 00° 29' с. ш., 54° 25' в. д. /<br>00° 29' N, 54° 25' E | 5                        | 0,331   | 94,0  | 4,45                        |
| 01° 00' с. ш., 54° 37' в. д. /<br>01° 00' N, 54° 37' E | 5                        | 0,329   | 71,8  | 4,25                        |
| 02° 00' с. ш., 54° 30' в. д. /<br>02° 00' N, 54° 30' E | 5                        | 0,207   | 55,7  | 4,32                        |

Угловые показатели рассеяния  $\sigma(\theta)$  связаны с общим показателем рассеяния  $\sigma$  ( $\text{м}^{-1}$ ):  $\sigma = 2\pi \int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta$ . Установив формулу связи  $\sigma = f[\sigma(\theta)]$  для некоторого угла, можно по величине  $\sigma(\theta)$  определять показатель рассеяния, не измеряя всю индикатрису.

В работах <sup>5</sup> и [12–13] исследовалось, при каком угле  $\theta_{\max}$  связь  $\sigma = f[\sigma(\theta)]$  наиболее тесная. Было установлено, что значения данного угла различаются для разных водоемов и находятся в интервале 3–5°.

Данный вопрос исследовался для вод в районе настоящих работ. Для определения  $\theta_{\max}$  рассчитывался коэффициент корреляции между  $\sigma(\theta)$  и  $\sigma$  при разных углах. Величина  $\theta_{\max}$  соответствует максимальному значению коэффициента корреляции. Такой угол найден равным 3,5°. Уравнение связи для этого угла имеет вид ( $R = 0,99$ )

$$\sigma = 0,041\sigma(3,5) + 0,096.$$

Аналогичные расчеты для вод апвеллинга на экваторе в Атлантическом океане дали такую же величину  $\theta_{\max}(3,5^\circ)$ . Уравнение связи ( $R = 0,98$ ):

$$\sigma = 0,057\sigma(3,5) + 0,025.$$

В табл. 4 приведены значения угла  $\theta_{\max}$  в разных водоемах.

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

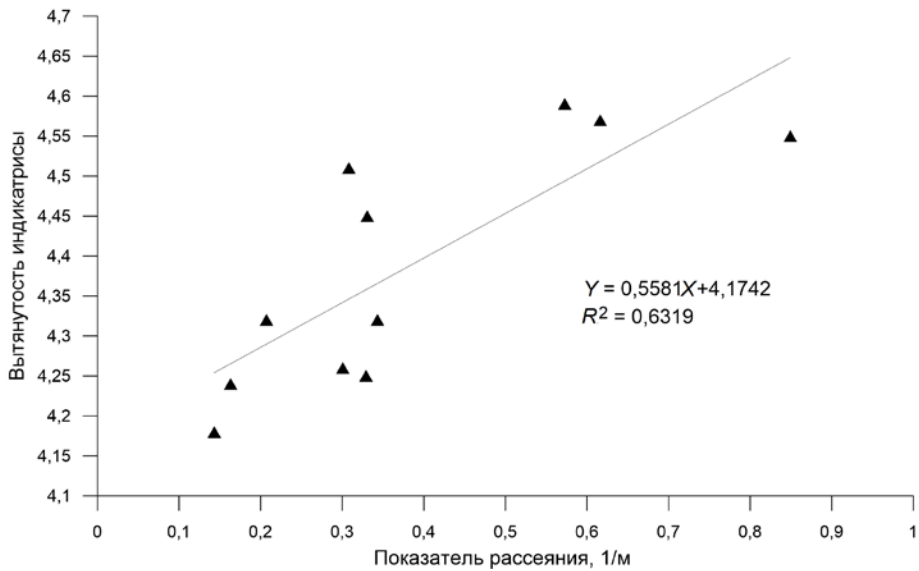
**Значения угла  $\theta_{\max}$ , при котором наблюдается максимальное значение коэффициента корреляции углового показателя рассеяния с суммарным рассеянием**  
**Values of the angle  $\theta_{\max}$ , at which the maximum value of correlation coefficient of the angle scattering coefficient with total scattering is observed**

| Район / Region   | $\theta_{\max}, ^\circ /$ | Коэффициент корреляции / Correlation coefficient | Источник данных / Data source            |
|--|---------------------------|--|--|
| Индийский океан, зона апвеллинга на экваторе / Indian Ocean, upwelling zone at the equator       | 3,5                       | 0,99   | Настоящая работа / Present paper         |
| Атлантический океан, зона апвеллинга на экваторе / Atlantic Ocean, upwelling zone at the equator | 3,5                       | 0,98   | Настоящая работа / Present paper         |
| Средиземное море / Mediterranean Sea   | 3,5                       | 0,98   | [13]                                     |
| Черное море / Black Sea  | 5,0                       | 0,97   | Работа <sup>5</sup> / Paper <sup>5</sup> |

По связям между параметрами индикатрисы в районе работ можно отметить еще связь вытянутости индикатрисы  $L(2,90)$  с показателем рассеяния  $\sigma$  (рис. 3). Как видно из рисунка, имеется большой разброс точек от линии регрессии, но в целом с увеличением показателя рассеяния вытянутость индикатрисы возрастает.

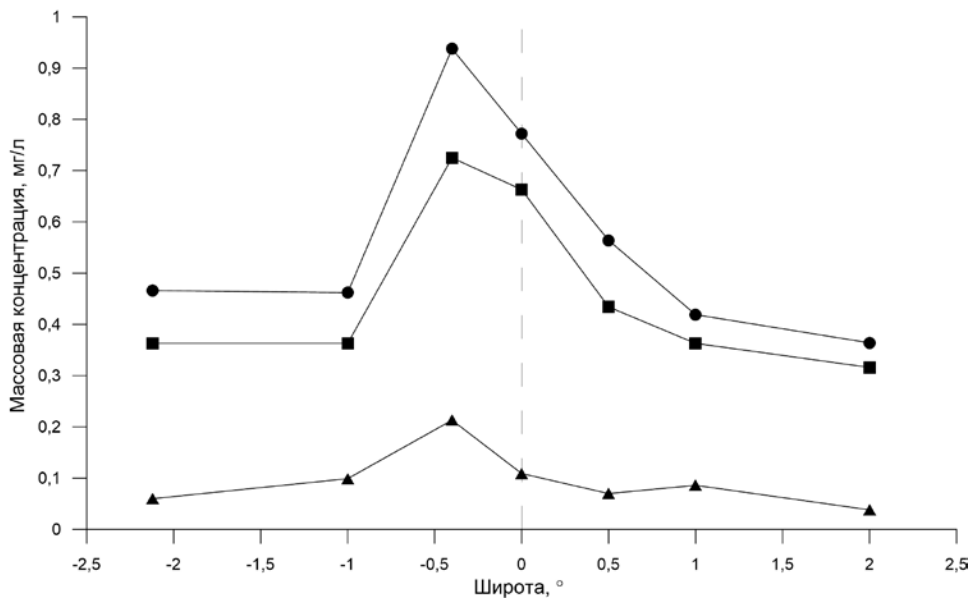
<sup>5</sup> Маньковский В. И. О соотношении между интегральным показателем рассеяния света морских вод и показателем рассеяния в фиксированном направлении // Морские гидрофизические исследования. Севастополь : МГИ, 1971. № 6 (56). С. 145–154.





**Р и с. 3.** Связь вытянутости индикатрисы с показателем рассеяния в водах на разрезе через экватор

**F i g. 3.** Relationship between the light volume scattering function elongation and the scattering coefficient in the waters at the section across the equator



**Р и с. 4.** Распределение на разрезе на глубине 5 м массовой концентрации взвеси: минеральной  $C_{\text{мин}}$  (▲), органической  $C_{\text{орг}}$  (■), суммарной  $C_{\text{сум}}$  (●)

**F i g. 4.** Distribution of the suspension mass concentration (mineral  $C_{\text{мин}}$  (▲), organic  $C_{\text{орг}}$  (■) and total  $C_{\text{total}}$  (●) at the section at the 5 m depth

*Параметры взвеси.* По измеренным на разрезе индикатрисам рассеяния света рассчитывались следующие параметры взвеси: массовая ( $C$ ) и численная ( $N$ ) концентрации органических и минеральных частиц, средний размер органических частиц ( $r_{орг}$ ). Результаты расчетов представлены в табл. 5.

На рис. 4 показано распределение на разрезе массовой концентрации взвеси на глубине 5 м. В максимуме апвеллинга на широте  $0,4^\circ$  ю. ш. концентрация взвеси  $C_{сум}$  составила  $0,938$  мг/л, в фоновых водах на  $2,00^\circ$  с. ш. –  $0,364$  мг/л.

Т а б л и ц а 5  
T a b l e 5

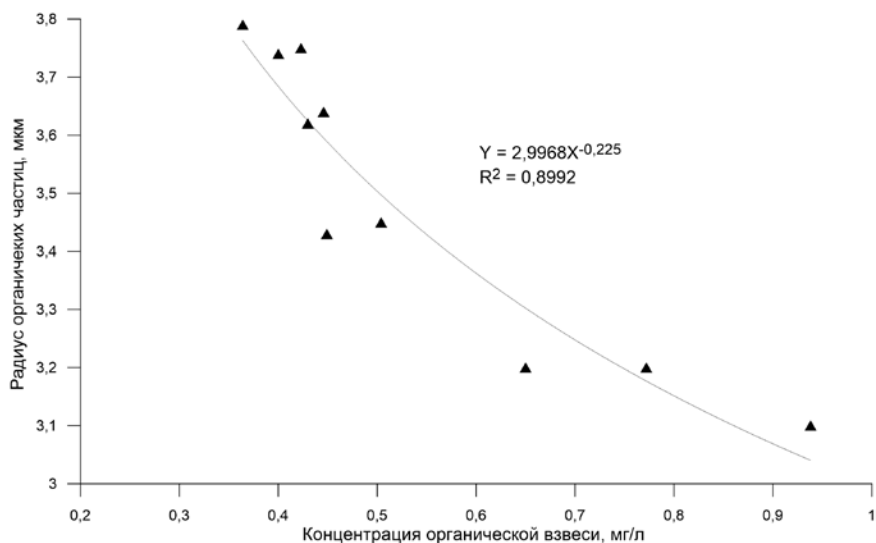
**Параметры взвеси на разрезе**  
**Suspension parameters at the section**

| Координаты / Coordinates  | Глубина, м / Depth, m | $C_{орг}$ , мг/л / $C_{org}$ , mg/l | $C_{мин}$ , мг/л / $C_{min}$ , mg/l | $C_{сум}$ , мг/л / $C_{total}$ , mg/l | $N_{орг}$ , млн/л / $N_{org}$ , mln/l | $N_{мин}$ , млн/л / $N_{min}$ , mln/l | $r_{орг}$ , мкм / $r_{org}$ , mn |
|---|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| $02^\circ 07'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $02^\circ 07' S, 54^\circ 31' E$ | 5                     | 0,363                               | 0,060                               | 0,423                                 | 5,8                                   | 146                                   | 3,75                             |
| $02^\circ 07'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $02^\circ 07' S, 54^\circ 31' E$ | 42                    | 0,371                               | 0,075                               | 0,446                                 | 6,2                                   | 190                                   | 3,64                             |
| $02^\circ 07'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $02^\circ 07' S, 54^\circ 31' E$ | 75                    | 0,363                               | 0,067                               | 0,430                                 | 6,1                                   | 169                                   | 3,62                             |
| $02^\circ 07'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $02^\circ 07' S, 54^\circ 31' E$ | 105                   | 0,326                               | 0,074                               | 0,400                                 | 5,5                                   | 185                                   | 3,74                             |
| $01^\circ 01'$ ю. ш., $54^\circ 29'$ в. д. / $01^\circ 01' S, 54^\circ 29' E$ | 5                     | 0,363                               | 0,099                               | 0,462                                 | 5,8                                   | 155                                   | 3,35                             |
| $00^\circ 26'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $00^\circ 26' S, 54^\circ 31' E$ | 5                     | 0,725                               | 0,213                               | 0,938                                 | 12,1                                  | 345                                   | 3,10                             |
| $00^\circ 26'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $00^\circ 26' S, 54^\circ 31' E$ | 20                    | 0,542                               | 0,154                               | 0,650                                 | 9,0                                   | 212                                   | 3,20                             |
| $00^\circ 26'$ ю. ш., $54^\circ 31'$ в. д. / $00^\circ 26' S, 54^\circ 31' E$ | 57                    | 0,496                               | 0,045                               | 0,541                                 | 4,0                                   | 77                                    | 3,72                             |
| $00^\circ 00'$ с. ш., $54^\circ 26'$ в. д. / $00^\circ 00' N, 54^\circ 26' E$ | 5                     | 0,663                               | 0,109                               | 0,772                                 | 11,0                                  | 152                                   | 3,20                             |
| $00^\circ 29'$ с. ш., $54^\circ 25'$ в. д. / $00^\circ 29' N, 54^\circ 25' E$ | 5                     | 0,434                               | 0,070                               | 0,504                                 | 7,3                                   | 129                                   | 3,45                             |
| $01^\circ 00'$ с. ш., $54^\circ 37'$ в. д. / $01^\circ 00' N, 54^\circ 37' E$ | 5                     | 0,363                               | 0,086                               | 0,449                                 | 6,1                                   | 181                                   | 3,43                             |
| $02^\circ 00'$ с. ш., $54^\circ 30'$ в. д. / $02^\circ 00' N, 54^\circ 30' E$ | 5                     | 0,316                               | 0,038                               | 0,364                                 | 6,2                                   | 83                                    | 3,79                             |

Основу массовой концентрации взвеси на разрезе составляют органические частицы. Среднее отношение концентрации органической взвеси к концентрации суммарной взвеси  $C_{орг}/C_{сум}$  равно  $0,83$ . Аналогичный показатель в водах апвеллинга в районе экватора ( $1^\circ$  ю. ш. –  $2^\circ$  с. ш.;  $20,5^\circ$ – $22,0^\circ$  з. д.)

в тропической зоне Атлантического океана, по данным работы [14], составил 0,94.

В работе [15] установлено, что размеры органических частиц в природных водах изменяются в зависимости от их продуктивности (трофности, т. е. содержания питательных веществ): при увеличении продуктивности размеры частиц уменьшаются, и наоборот, в низкопродуктивных водах размеры частиц возрастают. Такая связь наблюдалась и на разрезе в Индийском океане. На рис. 5 показано изменение среднего радиуса органических частиц в зависимости от концентрации взвеси.



**Р и с. 5.** Связь среднего радиуса органических частиц  $r_{\text{орг}}$  с концентрацией органической взвеси  $C_{\text{орг}}$

**Fig. 5.** Relationship between the average radius of organic particles  $r_{\text{org}}$  and the organic suspension concentration  $C_{\text{org}}$

В работе [15] показано, что изменение размеров органических частиц происходит вследствие изменения видового состава фитопланктона, связанного, в свою очередь, с продуктивностью вод. В эвтрофных (высокопродуктивных) водах преобладают мелкоразмерные виды, а в олиготрофных (низкопродуктивных) – крупноразмерные.

### Заключение

В работе представлены данные о параметрах индикатрис рассеяния света в зоне апвеллинга на экваторе в западной части Индийского океана. В максимуме апвеллинга на  $0,4^\circ$  ю. ш. показатель рассеяния  $\sigma$  составил 0,849 1/м. Увеличение коэффициента асимметрии индикатрисы при возрастании показателя рассеяния определяется соотношением  $K = 255\sigma + 6$  ( $R = 0,97$ ). Сравнение с аналогичным соотношением для вод апвеллинга в Атлантическом океане показало меньший наклон линии связи для Индийского океана, что говорит о более высокой концентрации в воде мелких (минеральных) взвешенных частиц.

Установлено значение угла  $\theta_{\max}$ , равное  $3,5^\circ$ , при котором восстановление общего показателя рассеяния по измерению рассеяния в данном направлении оптимально. Уравнение связи имеет вид  $\sigma = 0,041\sigma(3,5) + 0,096$  ( $R = 0,99$ ). Такая же величина  $\theta_{\max}(3,5^\circ)$  получена для вод апвеллинга на экваторе в Атлантическом океане.

По индикатрисам рассеяния света рассчитана концентрация взвеси и ее состав. В максимуме апвеллинга массовая концентрация общей взвеси  $C_{\text{сум}}$  составила 0,938 мг/л, в фоновых водах 0,364 мг/л. Основу массовой концентрации взвеси на разрезе составляют органические частицы. Полученная связь размеров частиц органической взвеси с концентрацией взвеси в водах апвеллинга подтверждает предыдущие исследования: при увеличении продуктивности размеры частиц уменьшаются, и наоборот, в низкопродуктивных водах размеры частиц возрастают.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petzold T. J.* Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters: final report. Warminster, USA: Naval Air Development Center, 1972. 79 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/73p3r43q> (date of access: 27.07.2022).
2. *Lee M. E., Korchemkina E. N.* Volume Scattering Function of Seawater // Light Scattering, Radiative Transfer and Remote Sensing. / A. Kokhanovsky (ed.). Cham : Springer, 2018. Chapter 4. P. 151–195. (Springer Series in Light Scattering; vol. 2). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70808-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70808-9_4)
3. *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.
4. 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, 2–5 июля 2018, г. Томск. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С. P18–P27.
5. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Lee [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
6. *Маньковский В. И.* Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 634–639. doi:10.15372/AOO20180806
7. *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.
8. 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>
9. 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>
10. *Ощепков С. Л., Сорокина Е. А.* Методика экспрессного восстановления дисперсности и концентрации морской взвеси из измерений индикатрис рассеяния // Океанология. 1988. Т. 28, вып. 1. С. 157–161.
11. *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

12. *Копелевич О. В., Буренков В. И.* О нефелометрическом методе определения общего показателя рассеяния света морской водой // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7, № 12. С. 1280–1289.
13. *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
14. *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
15. *Маньковский В. И., Маньковская Е. В.* Определение по индикатрисам рассеяния света размеров частиц взвешенного органического вещества и исследование их связи с трофностью вод // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 11. С. 863–866. doi:10.15372/AOO20201106

*Об авторе:*

**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**, **Scopus Author ID: 6506047768**, [mankovskiy@mhi-ras.ru](mailto:mankovskiy@mhi-ras.ru)