

УДК 551.463.5

Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана

В.И. Маньковский*

Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Поступила в редакцию 27.03.2018 г.

Приводятся параметры индикатрис рассеяния света, измеренных на крупномасштабном полигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана. Рассматривается связь параметров индикатрис с динамикой вод. Приведены индикатрисы, измеренные в водах основных течений и в районах подъема и опускания вод. Представлены предельные значения параметров индикатрис, наблюдавшиеся в водах полигона. Найдена связь коэффициента асимметрии индикатрис с показателем рассеяния света. В апвеллинге параметры данной связи отличаются от таковой для остальных вод полигона. Установлена связь показателя рассеяния с показателем ослабления света.

Ключевые слова: индикатриса рассеяния, вытянутость индикатрисы, коэффициент асимметрии индикатрисы, средний косинус угла рассеяния, средний угол рассеяния, показатель рассеяния, показатель ослабления; scattering function, stretch of scattering function, asymmetry coefficient of scattering function, middle cosine of angle of scattering function, middle angle of scattering function, total scattering coefficient, beam attenuation coefficient.

Введение

Информация о характеристиках рассеяния света необходима при решении многих задач в оптике океана. Поэтому актуальным является исследование рассеяния света в водах различных районов Мирового океана [1–3]. В этом плане тропические воды Атлантического океана слабо изучены. Известна лишь одна работа, в которой приводятся данные о связи коэффициента асимметрии индикатрис рассеяния света с показателем рассеяния в этих водах [4]. В настоящей работе представлены параметры индикатрис, измеренных на крупномасштабном полигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана. Рассматриваются связь параметров индикатрис с динамикой вод на полигоне, их взаимные корреляции.

Район исследования

Исследования выполнены в 47-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (июнь–сентябрь 1986 г.) на тропическом полигоне с границами: 1° ю.ш. – 12° с.ш.; 16–32,5° з.д. Гидрологические разрезы на полигоне выполнялись с шагом 1,5° по долготе, станции на разрезах располагались через 0,5° по широте.

* Виктор Иванович Маньковский (mankovskiy@mhi-gas.ru).

Аппаратура и методика измерений

Индикатрисы рассеяния света измерялись нефелометром [5] в пробах воды с глубины 3 м. В табл. 1 приведены технические характеристики нефелометра.

Таблица 1
Технические характеристики нефелометра

Характеристика	Значение
Углы измерений $\sigma(\theta)$, град	2; 7,5...(5)...162,5
Спектральная область измерений, нм	520(± 40)
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$, %	10

Измерения показателя рассеяния в нефелометре производятся в интервале углов 2–162,5°. Необходимые для расчетов характеристик рассеяния света показатели рассеяния при углах $\theta < 2^\circ$ находились путем экстраполяции индикатрисы в эту область по формуле $\ln\sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для определения коэффициентов A, B, C использовались величины $\sigma(\theta)$, измеренные при углах 2; 7,5; 12,5°. На углах $> 162,5^\circ$ 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 величина $\chi(\theta) = 4\pi\sigma(\theta)/\sigma$, где σ – суммарный показатель рассеяния [6]. В данной работе термин «индикатриса рассеяния» применяется к функции $\sigma(\theta)$.

В качестве параметров индикатрисы рассчитывались:

– суммарный показатель рассеяния (m^{-1}):

$$\sigma = 2\pi \int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta; \quad (1)$$

– коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния

$$K = \frac{\int_0^{90} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_{90}^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta}; \quad (2)$$

– средний косинус угла рассеяния

$$\langle \cos\theta \rangle = \frac{\int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta}; \quad (3)$$

– средний угол рассеяния

$$\langle \theta \rangle = \frac{\int_0^{180} \sigma(\theta) \theta \sin\theta d\theta}{\int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta}; \quad (4)$$

– угол половины суммарного показателя рассеяния

$$\theta(0,5\sigma) = \frac{\int_0^{\theta(0,5\sigma)} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_0^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta} = 0,5; \quad (5)$$

– вытянутость индикатрисы

$$\sigma(2, 90) = \lg \left[\frac{\sigma(2)}{\sigma(90)} \right]. \quad (6)$$

Результаты измерений и их обсуждение

Параметры индикатрис и динамика вод. Динамика вод на полигоне (рис. 1) определялась крупномасштабными течениями: Северным пассатным течением (СПТ), Южным пассатным течением (ЮПТ), Межпассатным противотечением (МПТ). В западной части экваториальной зоны полигона на поверхность выходило течение Ломоносова (ТЛ).

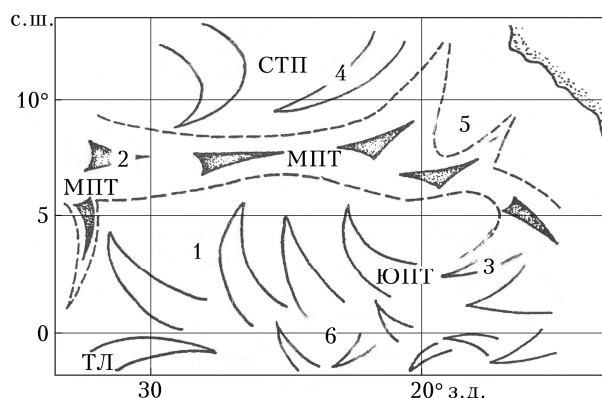


Рис. 1. Схема крупномасштабных течений на полигоне. Цифрами показаны точки, в которых измерялись индикатрисы. Составлена П.Д. Ломакиным (начальник отряда гидрологии в 47-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов»)

На полигоне имелись обширные области опускания и подъема вод. Области опускания: антициклонический круговорот между МПТ и ЮПТ, конвергенция потоков в МПТ. Области подъема: дивергенция МПТ в его восточной части, экватор.

В табл. 2 приведены координаты измерения индикатрис в водах основных течений и в районах опускания и подъема вод. В табл. 3 представлены индикатрисы в местах измерений, а в табл. 4 – их интегральные параметры.

Параметры индикатрис в рассматриваемых водах (табл. 4) отражают их динамику – низкие значения показателя рассеяния света наблюдались в областях опускания вод, высокие – в областях подъема. Видна связь параметров индикатрисы с показателем рассеяния: при его возрастании K , $\cos\theta$ и $\sigma(2; 90)$ увеличиваются, θ уменьшается.

Предельные значения параметров индикатрисы. В табл. 5 приведены минимальные и максимальные значения параметров индикатрисы, наблюдавшиеся на полигоне. Для сравнения в табл. 5 приведены аналогичные величины параметров

Таблица 2

Точки измерения индикатрис

Точка	Район	с.ш.	з.д.
1	Тропический антициклонический круговорот	04°30'	28°00'
2	Межпассатное противотечение	07°30'	31°00'
3	Южное пассатное течение	03°30'	16°00'
4	Северное пассатное течение	11°20'	23°30'
5	Дивергенция межпассатного противотечения	09°30'	17°30'
6	Подъем вод на экваторе	00°00'	23°30'

Таблица 3

Индикатрисы рассеяния света в водах полигона						
θ , град	$\ln\theta$, m^{-1}					
	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6
0,25 ⁺	1,642	1,702	1,582	1,802	1,892	1,962
0,75 ⁺	1,352	1,402	1,362	1,552	1,662	1,702
1,25 ⁺	1,072	1,112	1,152	1,312	1,432	1,462
1,5 ⁺	9,942	0,972	1,052	1,192	1,332	1,342
1,75 ⁺	0,812	0,842	0,952	1,082	1,222	1,222
2	0,672	0,702	0,852	0,962	1,112	1,102
2,5 ⁺	0,442	0,462	0,682	0,762	0,922	0,892
3,5 ⁺	0,012	0,022	0,352	0,382	0,572	0,502
4,5 ⁺	-0,368	-0,368	0,062	0,042	0,252	0,162
5,5 ⁺	-0,678	-0,688	-0,188	-0,238	-0,008	-0,128
6,5 ⁺	-0,928	-0,948	-0,388	-0,478	-0,038	-0,378
7,5	-1,288	-1,318	-0,678	-0,818	-0,528	-0,698
12,5	-1,658	-1,708	-1,108	-1,338	-0,968	-1,168
15 ⁺	-1,768	-1,828	-1,268	-1,538	-0,948	-1,358
17,5	-1,868	-1,968	-1,428	-1,738	-1,328	-1,538
22,5	-2,088	-2,148	-1,698	-1,978	-1,638	-1,818
27,5	-2,238	-2,348	-1,948	-2,238	-1,868	-2,068
30 ⁺	-2,328	-0,438	-2,058	-2,318	-1,978	-2,168
32,5	-2,428	-2,538	-2,178	-2,398	-2,088	-2,278
37,5	-2,588	-2,708	-2,378	-2,558	-2,278	-2,438
42,5	-2,728	-2,858	-2,538	-2,658	-2,578	-2,538
45 ⁺	-2,798	-2,908	-2,628	-2,738	-2,578	-2,618
47,5	-2,858	-2,948	-2,718	-2,818	-2,568	-2,688
52,5	-2,998	-3,088	-2,828	-2,918	-2,688	-2,788
57,5	-3,108	-3,148	-2,998	-3,018	-2,808	-2,928
62,5	-3,188	-3,288	-3,088	-3,128	-2,938	-2,998
67,5	-3,268	-3,368	-3,148	-3,218	-3,028	-3,108
72,5	-3,358	-3,408	-3,218	-3,258	-3,108	-3,208
77,5	-3,398	-3,508	-3,328	-3,348	-3,138	-3,248
82,5	-3,438	-3,548	-3,338	-3,388	-3,188	-3,338
87,5	-3,498	-3,548	-3,378	-3,438	-3,218	-3,388
90 ⁺	-3,498	-3,548	-3,378	-3,468	-3,268	-3,418
92,5	-3,508	-3,558	-3,388	-3,508	-3,318	-3,448
97,5	-3,508	-3,558	-3,388	-3,508	-3,268	-3,398
102,5	-3,458	-3,608	-3,398	-3,518	-3,328	-3,408
107,5	-3,468	-3,618	-3,408	-3,468	-3,338	-3,468
112,5	-3,488	-3,598	-3,428	-3,488	-3,308	-3,438
117,5	-3,508	-3,568	-3,408	-3,458	-3,288	-3,408
122,5	-3,478	-3,528	-3,408	-3,378	-3,308	-3,328
127,5	-3,408	-2,458	-3,318	-3,358	-3,248	-3,358
132,5	-3,398	-3,448	-3,358	-3,348	-3,248	-3,348
137,5	-3,338	-3,438	-3,358	-3,278	-3,198	-3,278
142,5	-3,238	-3,388	-3,288	-3,288	-3,168	-3,238
147,5	-3,178	-3,398	-3,278	-3,218	-3,088	-3,178
152,5	-2,998	-4,308	-3,208	-3,138	-2,998	-3,098
157,5	-3,178	-3,328	-3,198	-3,178	-2,948	-3,128
162,5	-3,158	-3,158	-3,158	-3,158	-2,978	-3,088
167,5 ⁺	-3,158	-3,158	-3,158	-3,158	-2,978	-3,088
172,5 ⁺	-3,158	-3,158	-3,158	-3,158	-2,978	-3,088
177,5 ⁺	-3,158	-3,158	-3,158	-3,158	-2,978	-3,088

Примечание. Знак «+» стоит при углах θ , на которых измерения не производились, а величина показателя рассеяния $\sigma(\theta)$ получена расчетным путем.

Таблица 4

Параметры индикатрис в разных водах						
Точка	σ , m^{-1}	K	$\langle \cos\theta \rangle$	$\langle \theta \rangle$, град	$\sigma(2; 90)$	Z_6 , м
1	0,094	34	0,927	9,7	4,17	35
2	0,099	45	0,944	7,9	4,26	32
3	0,154	53	0,944	9,6	4,24	26
4	0,170	62	0,956	7,1	4,44	28
5	0,253	56	0,955	7,9	4,38	21
6	0,235	77	0,962	6,6	4,52	20

Примечание. Z_6 — глубина видимости белого диска в данном месте.

индикатрисы в тропических водах Индийского океана [7] и в Черном море [8]; порядок величин предельных значений параметров здесь одинаков.

Связь коэффициента асимметрии индикатрисы с показателем рассеяния $K = f(\sigma)$. На рис. 2

показано распределение на полигоне показателя рассеяния и коэффициента асимметрии индикатрисы. Видна пространственная связь между этими параметрами: при возрастании σ увеличивается K . Обращает на себя внимание район дивергенции

Таблица 5

Предельные значения параметров индикатрисы

Район	$\sigma, \text{ м}^{-1}$	K	$\langle \cos\theta \rangle$	$\langle \theta \rangle, \text{ град}$	$\theta(0,5\sigma), \text{ град}$	$\lg\sigma(2; 90)$
Атлантический океан	0,046–0,315	24–108	0,891–0,974	4,7–14,0	1,3–4,2	3,83–4,62
Индийский океан	–	10–85	0,750–0,960	8,0–30,0	–	–
Черное море	0,16–0,66	29–137	0,882–0,968	–	–	–

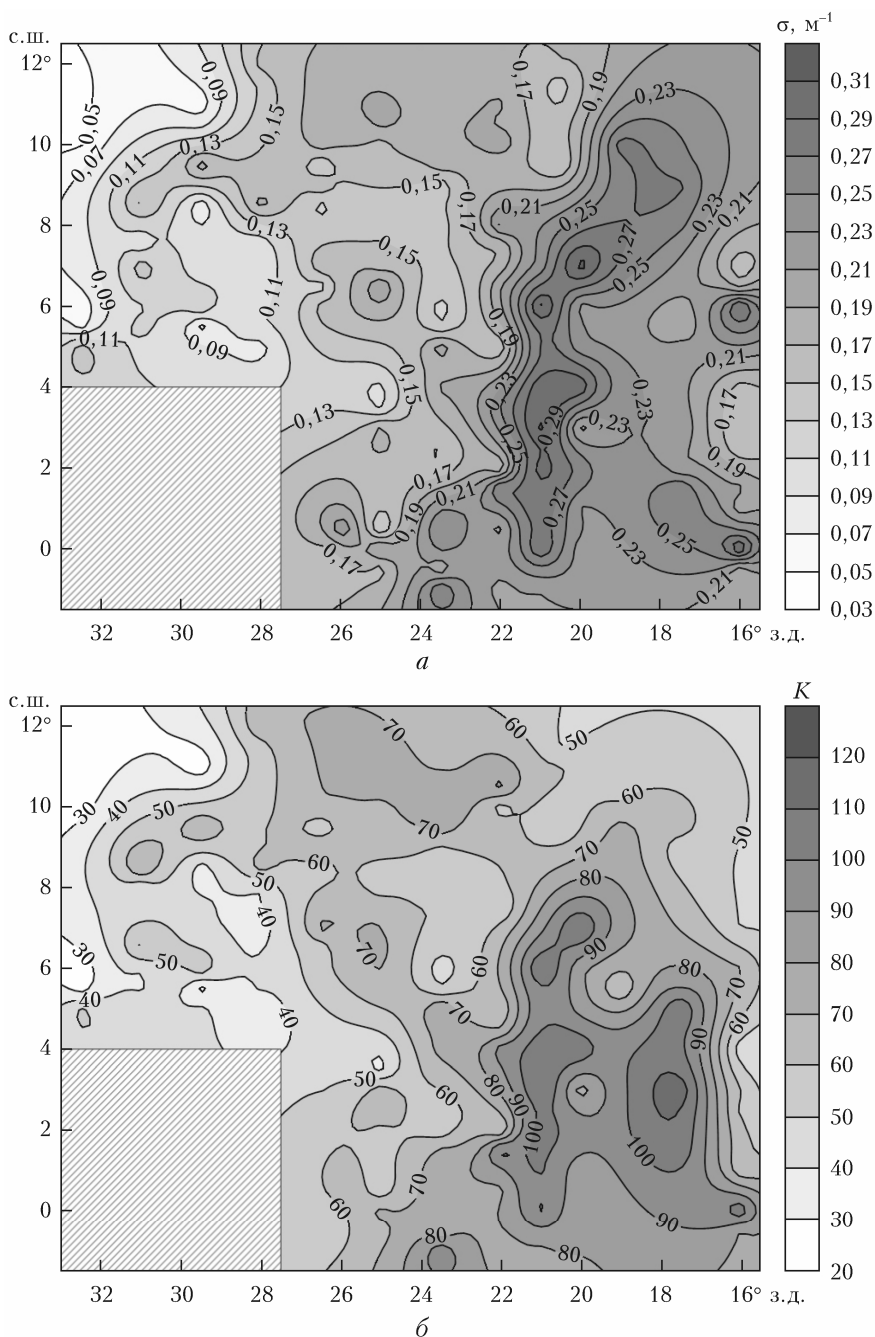


Рис. 2. Распределение на полигоне показателя рассеяния света σ (а); коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния K (б)

МПТ (апвеллинг), в котором при тех же показателях рассеяния коэффициенты асимметрии меньше, чем в других районах полигона.

На рис. 3, а показана связь $K = f(\sigma)$ в водах полигона. В районе дивергенции МПТ данная связь значительно отличается от таковой в остальных районах.

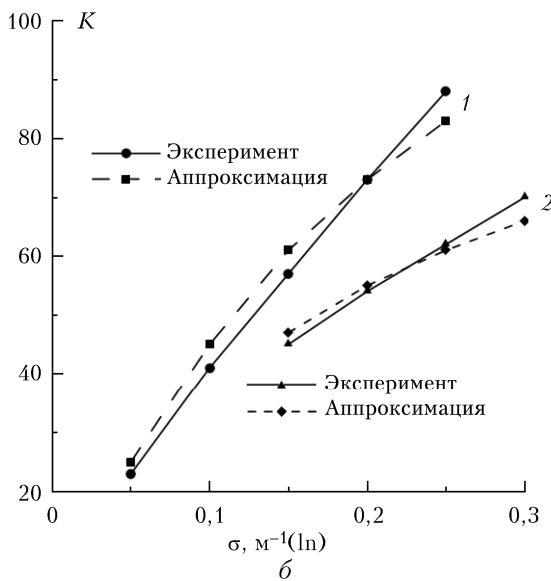
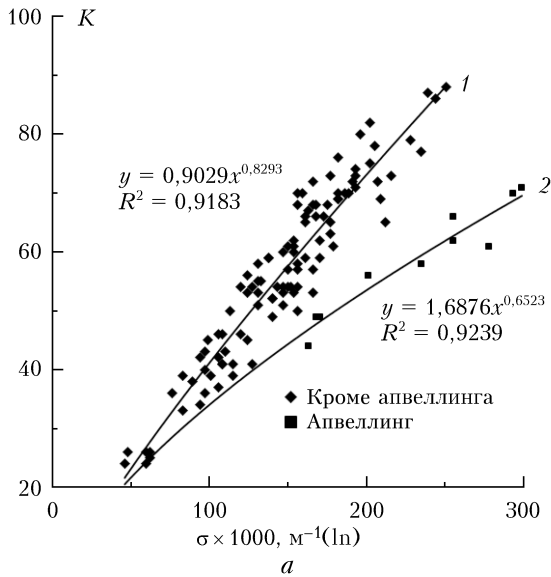


Рис. 3. Связь коэффициента асимметрии индикатрисы с показателем рассеяния (а) (ромбики – воды полигона, кроме апвеллинга, в районе дивергенции МПТ; квадратики – воды в районе апвеллинга); аппроксимация этой связи (б). Параметры аппроксимации: 1 – основные воды полигона: $\sigma_{\text{фон}} = 0,046 \text{ м}^{-1}$, $K_{\text{фон}} = 25$, $K_{\text{орг}} = 180$; 2 – районы апвеллинга: $\sigma_{\text{фон}} = 0,046 \text{ м}^{-1}$, $K_{\text{фон}} = 20$, $K_{\text{орг}} = 110$

В работах [9, 10] установлено, что связь $K = f(\sigma)$ носит региональный характер. Механизм связи исследован в [11], где показано, как влияют на ее параметры размеры рассеивающих свет биологических частиц, а также рассеяние в фоновых водах.

По модели работы [11] обе связи, показанные на рис. 3, а, аппроксимированы. При аппроксимации берутся минимальные значения показателя рассеяния $\sigma_{\text{фон}}$ и коэффициента асимметрии индикатрисы $K_{\text{фон}}$ в данных водах, а затем по методу наименьших квадратов отклонений подбирается органическая взвесь с коэффициентом асимметрии индикатрисы рассеяния $K_{\text{орг}}$. На рис. 3, б показаны результаты аппроксимации. Коэффициенты асимметрии индикатрис для органических частиц, принятых при аппроксимации представленных связей, показывают, что их размеры в апвеллинге меньше.

Связь показателя рассеяния с показателем ослабления $\sigma = f(\epsilon)$. В [12] установлено, что в океанических водах наблюдается тесная корреляция между показателями рассеяния и ослабления света ($\lambda = 550 \text{ нм}$), выражаемая формулой

$$\sigma = 0,944\epsilon - 0,048. \quad (7)$$

Подобного типа корреляции выявлены и в других публикациях [13–16].

На рис. 4 показана связь показателя рассеяния с показателем ослабления в водах тропического полигона ($\lambda = 520 \text{ нм}$).

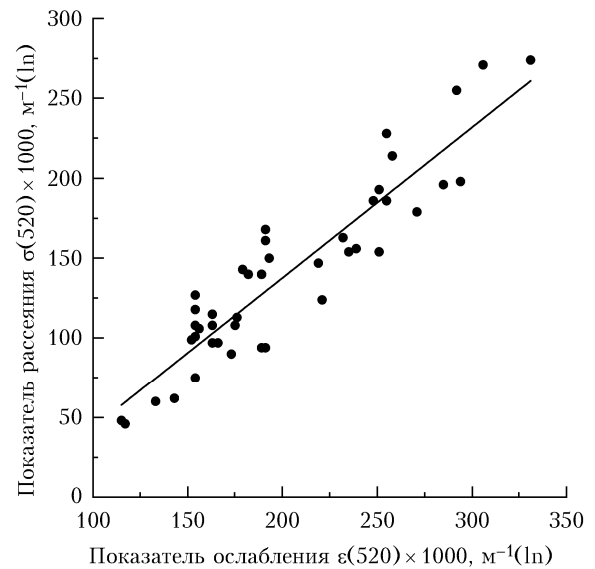


Рис. 4. Зависимость показателя рассеяния от показателя ослабления в водах полигона ($\lambda = 520 \text{ нм}$)

Для сравнения в табл. 6 приведены формулы связи в разных водах. Подробный анализ таких связей, использующихся при разработке малопараметрических гидрооптических моделей, выполнен в работе [17].

Заключение

1. Получены параметры индикатрис рассеяния света в северной части тропических вод Атлантического океана.

2. Параметры индикатрис отражают динамику вод в районе.

Формулы связи показателя рассеяния с показателем ослабления в разных водах

Район	Формула связи	Длина волны, нм	Диапазон ϵ , M^{-1}	Литература
Озеро Байкал	$\sigma = 0,924\epsilon - 0,054$	480	0,23–1,84	12
Тропическая Атлантика	$0,941\epsilon - 0,050$	520	0,12–0,34	Настоящая работа
Черное море	$0,936\epsilon - 0,058$	525	0,10–0,50	13
Океанические воды	$0,944\epsilon - 0,048$	550	0,08–0,60	11
Океанические и прибрежные воды	$0,949\epsilon - 0,072$	550	0,20–3,93	15, 16
Балтийское море	$0,939\epsilon - 0,077$	555	0,15–2,73	14

3. Выявлены предельные значения параметров индикатрис.

4. Установлены корреляционные связи: а) коэффициента асимметрии индикатрисы с показателем рассеяния света; б) показателя рассеяния с показателем ослабления света.

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002.

- Mankovsky V.I., Solovev M.V.* Seawater phase scattering functions in the Black Sea // Proc. II Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", 8–12 September, 2003. St. Petersburg, Russia. P. 293–296.
- Mankovsky V.I., Haltrin V.I.* Light scattering phase functions measured in waters of Mediterranean Sea // Oceans 2002 MTS-IEEE Proc. 2002. V. 4. P. 2368–2373. DOI: 10.1109/OCEANS.2002.1191998.
- Haltrin V.I., Li M.E., Mankovsky V.I., Shibanov E.B., Weidemann A.D.* Integral properties of angular light scattering coefficient measured in various natural waters // Proc. II Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", 8–12 September, 2003. St. Petersburg, Russia. P. 252–257.
- Маньковский В.И.* Изменчивость индикатрисы рассеяния света в поверхностных слоях тропической Атлантики // Оптика моря и атмосф.: тез. докл. X пленума «Оптика океана». Л.: Изд-во ГОИ, 1988. С. 180–182.
- Маньковский В.И.* Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев: Наук. думка, 1981. С. 87–89.
- Буренков В.И., Васильков А.П.* Термины и определения // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 6–18.
- Копелевич О.В.* Светорассеивающие свойства морской воды // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983.
- Маньковский В.И.* Индикатрисы рассеяния света и рассчитанный по ним состав взвеси в Черном море // Мор. гидрофиз. журн. 2005. № 1. С. 63–76.
- Маньковский В.И.* Характеристики индикатрис рассеяния света в водах озера Байкал // Автоматизация лимнологических исследований и световой режим водоемов. Новосибирск: Наука, 1984. С. 125–137.
- Mankovsky V.I.* The optical characteristics of the South Atlantic Ocean waters near 20°E, 37–55°S // Proc. VII Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", 10–14 September, 2013. St. Petersburg, Russia. P. 92–96.
- Маньковский В.И.* Изменение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света природных вод, содержащих органические частицы [Электронный ресурс] // Физика атмосф. и океана. 2016. Т. 52, № 3. С. 373–378. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26159615_61617562.pdf (дата обращения: 16.02.2018).
- Левин И.М., Копелевич О.В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм [Электронный ресурс] // Океанология. 2007. № 3. С. 374–379. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_9515134_55476205.pdf (дата обращения: 16.02.2018).
- Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.* Оптические характеристики вод и их взаимные корреляции в озере Байкал // Физика атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 512–520. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17845426_51118752.pdf (дата обращения: 16.02.2018).
- Mankovsky V.I.* Investigation of connection between absorption coefficient and beam attenuation coefficient in Black Sea waters // Proc. VIII Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", 8–12 September, 2015. St. Petersburg, Russia. P. 118–120.
- Levin I., Darecki M., Sagan S., Radomyslskaya T.* Relation between inherent optical properties in the Baltic sea for application to the underwater imaging problem [Electronic resource] // Oceanologia. 2013. V. 55, N 1. P. 11–26. URL: https://ac.els-cdn.com/S0078323413500017/1-s2.0-S0078323413500017-main.pdf?_tid=8917c684-1321-11e8-873a-0000aacb361&acdnt=1518789719_859ed2194614023f0f878eabbb2cd182 (last access: 16.02.2018).
- Morel A., Prieur I.* Analysis of variation in ocean color [Electronic resource] // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22, N 4. P. 709–722. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.4319/lo.1977.22.4.0709/pdf> (last access: 16.02.2018).
- Левин И.М.* Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды [Электронный ресурс] // Фундам. и прикл. гидрофиз. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22. URL: <http://hydrophysics.info/wp-content/uploads/2014/11/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD1.pdf> (дата обращения: 16.02.2018).

V.I. Mankovsky. Parameters of the light-scattering phase function in the tropical Atlantic waters.

The results of measurements of the light-scattering phase function in the tropical Atlantic are represented. The parameters of the scattering functions in water of the principal large-scale tropical currents are presented. The relations of the scattering function asymmetry coefficient with the total scattering coefficient and the total scattering coefficient with the beam attenuation coefficient are established.