

В.И. Маньковский

Оптические характеристики вод южной части Атлантического океана в районе 20° восточной долготы, 37 – 55° южной широты

На океанографическом разрезе, выполненном в южной части Атлантического океана по 20° в. д. от 37° до 55° ю. ш., измерены оптические характеристики вод – показатель ослабления направленного света, индикатриса рассеяния света, индекс цвета воды, глубина видимости белого диска. Высокая пространственная изменчивость всех оптических характеристик на разрезе обусловлена наличием зон подъема и опускания вод. В южной и северной частях разреза связь коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния с показателем рассеяния различна. Связь суммарного показателя рассеяния с показателем рассеяния в данном направлении имеет максимальную корреляцию на угле 4,5°. По индикатрисам рассеяния рассчитан состав взвеси на разных глубинах в зонах подъема и опускания вод.

Ключевые слова: показатель ослабления, индикатриса рассеяния, индекс цвета, глубина видимости белого диска.

До 1970-х годов данные об оптических характеристиках вод Атлантического океана южнее 40° ю. ш. отсутствовали, имелись сведения лишь о глубине видимости белого диска. В январе 1975 г. экспедицией Морского гидрофизического института АН УССР в 10-м рейсе НИС «Академик Вернадский» был сделан океанографический разрез по 20° в. д. от 37° до 55° ю. ш. Отрядом оптики моря МГИ в данном районе океана впервые были выполнены измерения гидрооптических характеристик – показателя ослабления направленного света, индикатрисы рассеяния света, индекса цвета воды. По результатам этих измерений в работе рассматриваются оптические характеристики вод и их особенности в указанном районе Атлантического океана в летний период Южного полушария. Отметим, что подобных гидрооптических измерений в этом районе в последующие годы не проводилось.

Аппаратура и методика измерений. Показатель ослабления направленного света ϵ . Величина ϵ измерялась на длине волны 505 нм. Измерения проводились зондирующим прозрачномером [1] до глубины 400 м.

Индикатриса рассеяния света $\sigma(\theta)$. Для измерений индикатрисы рассеяния (длина волны 520 нм) использовался нефелометр [2], $\sigma(\theta)$ измерялась на углах 2; 7,5°, далее через 5° до 162,5°. При расчете суммарного показателя рассеяния индикатриса $\sigma(\theta)$ в области малых углов аппроксимировалась формулой $\lg \sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для определения коэффициентов A, B, C использовались $\sigma(\theta)$, измеренные на углах 2; 7,5; 12,5°. При углах более 162,5° принималось условие $\sigma(\theta) = \text{const}$.

Индикатрисы измерялись на дискретных горизонтах до глубины 200 м.

Индекс цвета воды $I_{\text{цв}}$ измерялся на ходу прибором [3], установленным в сквозной шахте в центральной части корпуса судна. Прибор измерял отно-

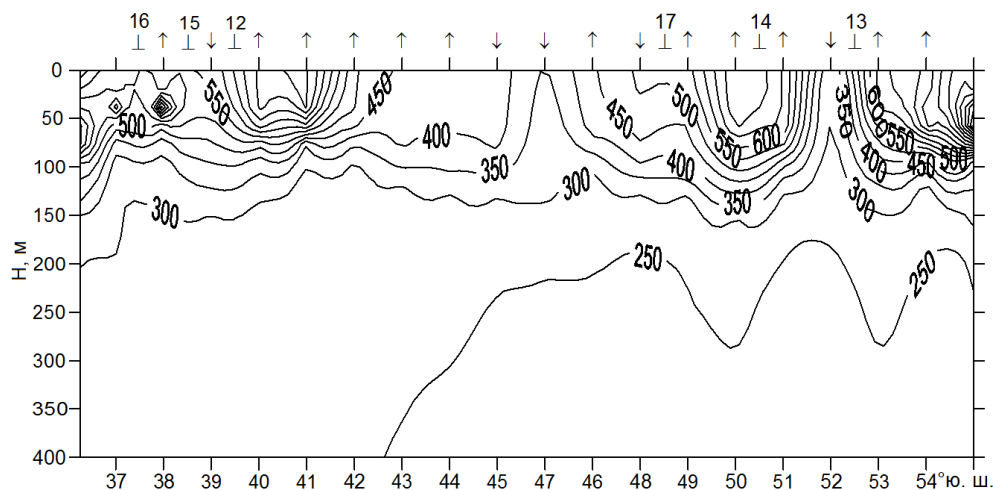
шение яркостей выходящего из толщи вод света $I_{\text{цв}} = B(\lambda_1) \uparrow / B(\lambda_2) \uparrow$ на длинах волн $\lambda_1 = 530$ нм, $\lambda_2 = 420$ нм.

Глубина видимости белого диска Z_0 определялась по стандартной методике с использованием белого диска диаметром 30 см. Измерения выполнялись при волнении до трех баллов.

Расположение станций и режим измерений на разрезе. Станции на разрезе располагались через один градус широты. При движении судна на юг выполнялись измерения показателя ослабления света. При обратном движении по разрезу измерялись индикатрисы рассеяния и глубина видимости белого диска. Индекс цвета измерялся при движении судна в обоих направлениях.

Оптические характеристики вод на разрезе. Приводимые далее величины показателей ослабления и рассеяния света даются при натуральном основании логарифма (\ln).

Показатель ослабления направленного света $\epsilon(505)$. На рис. 1 показано распределение на разрезе $\epsilon(505)$, $\text{м}^{-1}(\ln)$. В верхней части рисунка стрелками отмечены зоны подъема и опускания вод, которые были определены в экспедиции по гидрологическим данным. Значками \perp и числами при них показана глубина видимости белого диска.



Р и с. 1. Распределение на разрезе показателя ослабления $\epsilon(505) \cdot 10^3, \text{м}^{-1}$. Стрелками отмечено положение зон подъема и опускания вод. Знак \perp с числом показывает глубину видимости белого диска (м)

Максимальные значения показателя ослабления наблюдались в поверхностных слоях до глубин 60 – 80 м (до слоя скачка плотности). В этих же слоях зафиксирована наибольшая пространственная изменчивость $\epsilon(505)$, которая была связана с зонами подъема и опускания вод на разрезе.

В зонах подъема $\varepsilon(505)$ в поверхностных слоях значительно возрастал и составлял на глубине 0 м $0,55 - 0,90 \text{ м}^{-1}$, на 55° ю. ш. на глубине 50 м наблюдалось его максимальное значение, $\varepsilon(505) = 1,25 \text{ м}^{-1}$.

В зонах опускания на глубине 0 м показатель ослабления был равен $0,35 - 0,40 \text{ м}^{-1}$.

Глубже 200 м поле показателя ослабления было слабоградиентным и не зависящим от зон подъема и опускания вод. Значения $\varepsilon(505)$ на этих глубинах были равны $0,23 - 0,27 \text{ м}^{-1}$.

Глубина видимости белого диска Z_6 . Вследствие плохих погодных условий измерений Z_6 было выполнено немного. Все измерения проходили в районах подъема вод, где значения Z_6 изменялись в пределах 12 – 17 м (рис. 1).

Оценки Z_6 по ее связи с показателем ослабления света из работы [4] $Z_6 = 7,7/\varepsilon(505)$ показали, что в зонах опускания вод на 46 и 52° ю. ш. (зона Антарктической конвергенции) она составляла 22 и 26 м. Наблюдавшиеся на разрезе значения Z_6 совпадали с приведенными в [5] для данного района на климатической карте в летний сезон Южного полушария, $\langle Z_6 \rangle = 15 - 25$ м.

По значениям Z_6 были сделаны оценки показателя вертикального ослабления дневного света $\alpha(525)\downarrow$ с использованием связи $\alpha(525)\downarrow = f(Z_6)$ из работы [6]. По этим данным определены оптические типы вод на разрезе по классификации Н. Ерлова [7]. При изменении Z_6 на разрезе в пределах 12 – 17 м показатель вертикального ослабления $\alpha(525)\downarrow$, согласно [6], составил $0,1 - 0,08 \text{ м}^{-1}$. Согласно табл. 27 из работы [7], это соответствует III – II типам вод. При максимальном значении $Z_6 = 26$ м на 52° ю. ш. $\alpha(525)\downarrow = 0,060 \text{ м}^{-1}$, что соответствует типу вод 1В.

Для сравнения укажем, что на карте распределения оптических типов вод [7] в южной части Тихого океана в секторе 140° в. д. – 160° з. д., $45 - 60^\circ$ ю. ш. показаны такие же типы вод – 1В, II, III. Примечательно, что тип вод 1В в Тихом океане наблюдался в районе 145° в. д. на 55° ю. ш., где, согласно климатическим данным [8], расположена зона Антарктической конвергенции. В Атлантическом океане на 20° в. д. эта зона в летний период Южного полушария расположена в районе 51° ю. ш. [8]. Во время проведения наблюдений на разрезе по 20° в. д. летом 1975 г. эта зона находилась на 52° ю. ш.

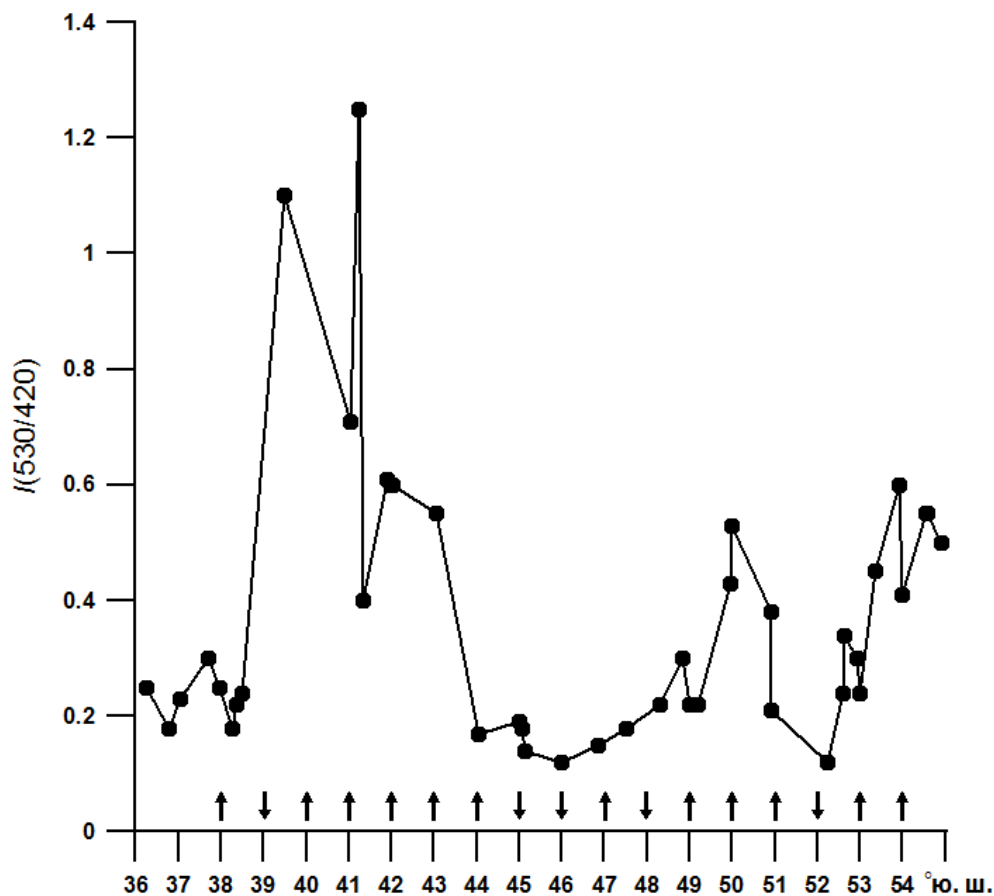
Индекс цвета воды $I_{\text{цв}}$ (530/420). Характер распределения индекса цвета на разрезе (рис. 2) аналогичен распределению показателя ослабления в поверхностном слое (рис. 1), что обусловлено теми же гидрологическими факторами – наличием зон подъема и опускания вод. Значение индекса цвета изменялось от 0,12 в зоне опускания на 52° ю. ш. до 1,25 в зоне подъема на $40 - 41^\circ$ ю. ш.

По индексу цвета была выполнена оценка продуктивности вод с использованием формулы из работы [9]:

$$\lg C_{\text{хл.а}}, \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3} = 0,74 \lg I_{\text{цв}}(550/440) - 0,53. \quad (1)$$

Отметим, что, согласно [10], измеренный на разрезе индекс цвета $I_{\text{цв}}(530/420)$ был на 40% больше, чем указано в работе [9]. Соответствующий расчет показал, что значение $I_{\text{цв}}(550/440)$ на разрезе составляло $0,09 - 0,9$ и, согласно формуле (1), $C_{\text{хл.а}} = 0,05 - 0,27 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Таким образом, по продуктив-

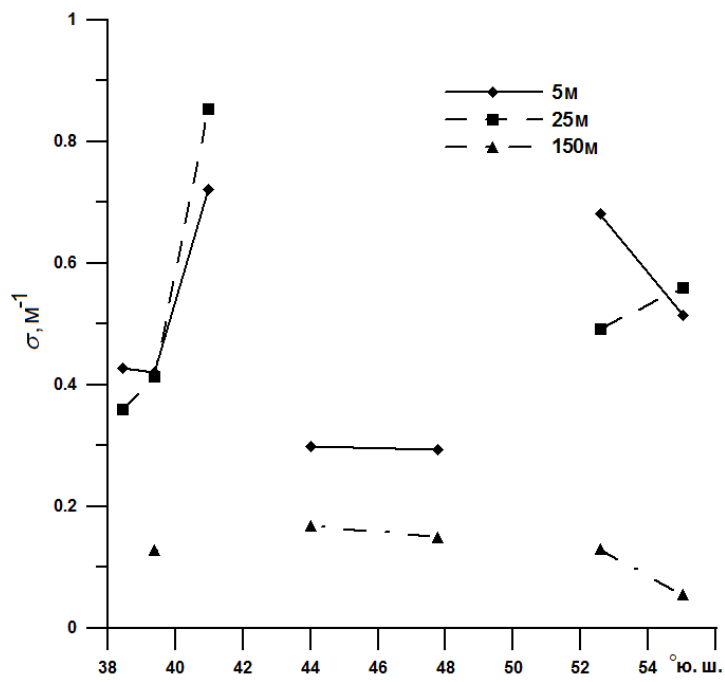
ности воды на разрезе можно разделить на два типа – олиготрофные ($C_{\text{хл.а}} < 0,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, $I_{\text{цв}} < 0,32$) и мезотрофные ($C_{\text{хл.а}} = 0,1 - 0,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, $I_{\text{цв}} = 0,32 - 1,43$). Около 60% вод относилось к мезотрофному типу.



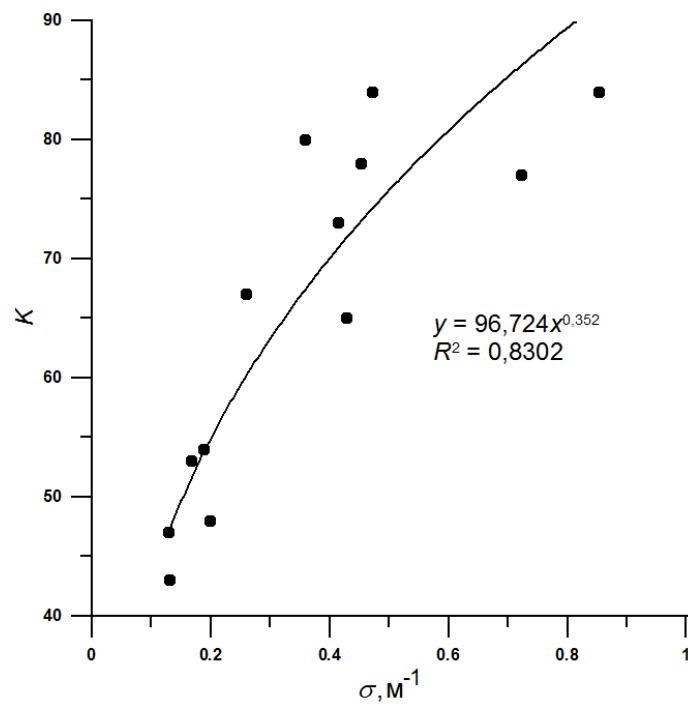
Р и с. 2. Распределение на разрезе индекса цвета воды $I(530/420)$

Индикатриса $\sigma(\theta)$ и суммарный показатель рассеяния σ . На рис. 3 показан показатель рассеяния σ на глубинах 5, 25 и 150 м в точках разреза, где были проведены соответствующие измерения. Распределение σ на глубинах 5 и 25 м так же, как и $\varepsilon(505)$ в поверхностных слоях, отражает динамику вертикального движения вод на разрезе – они значительно больше в районах подъема вод по сравнению с районами опускания.

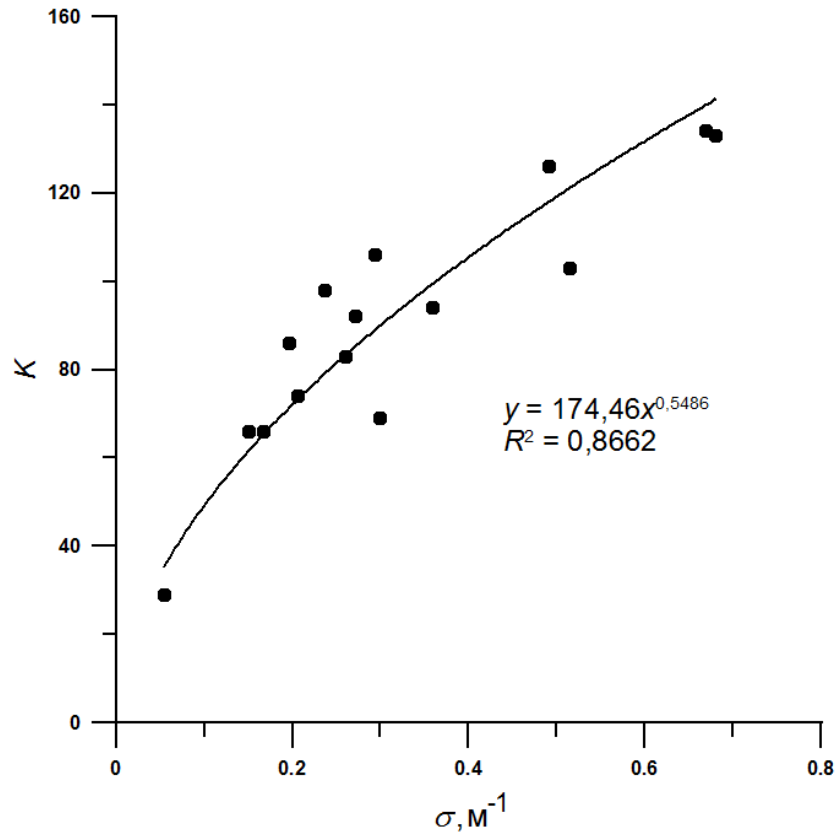
Наблюдалась связь коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния $K = \sigma\uparrow/\sigma\downarrow$, где $\sigma\uparrow$ и $\sigma\downarrow$ – рассеяние в переднюю и заднюю полусферы ($\sigma\uparrow + \sigma\downarrow = \sigma$), с суммарным показателем рассеяния σ . Установлено, что связь $K = f(\sigma)$ в районах 37 – 41° ю. ш. и 44 – 55° ю. ш. была различной: в южной части разреза коэффициенты асимметрии при тех же показателях рассеяния были значительно больше (рис. 4, 5).



Р и с. 3. Распределение на разрезе показателя рассеяния света σ , м^{-1}



Р и с. 4. Связь коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния K с показателем рассеяния σ на разрезе в районе 37 – 41° ю. ш.



Р и с. 5. Связь коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния K с показателем рассеяния σ на разрезе в районе $44 - 55^\circ$ ю. ш.

Такую изменчивость связи $K = f(\sigma)$ можно объяснить изменчивостью размеров рассеивающих частиц, а именно: при их увеличении возрастает коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния. С учетом этого можно сделать вывод, что в южной части разреза средний размер частиц был больше.

Подобная пространственная изменчивость связи $K = f(\sigma)$ в океанских водах наблюдалась ранее в северной тропической зоне Атлантического океана – в ее западной части коэффициенты асимметрии при тех же показателях рассеяния были меньше, чем в восточной [11]. Например, при $\sigma = 0,2 \text{ м}^{-1}$ в западной части $K = 54$, в восточной части $K = 75$.

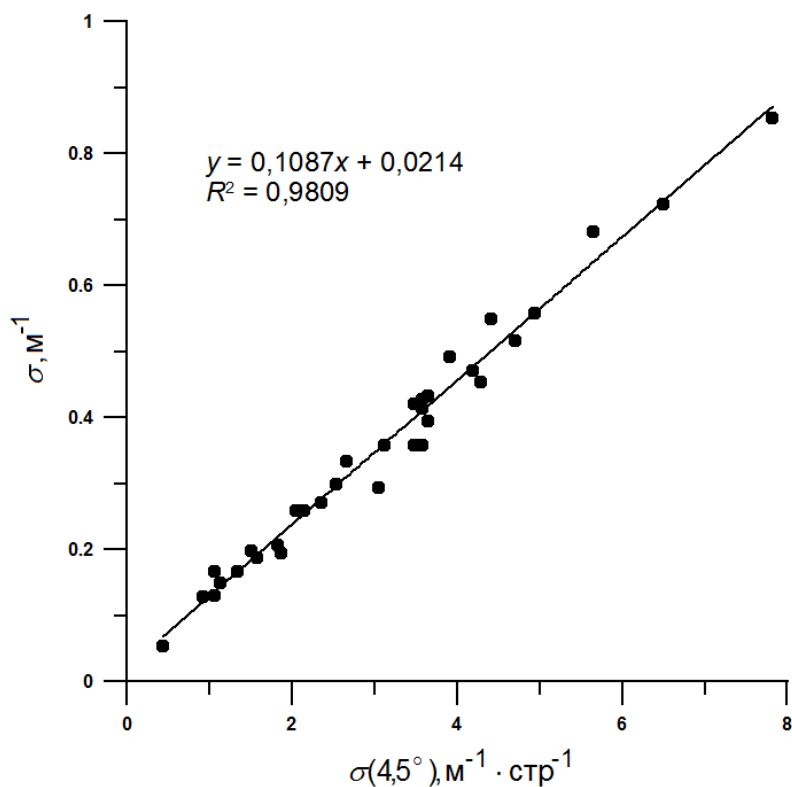
Отметим, что расчет коэффициента асимметрии по связям, представленным на рис. 4 и 5 для разных частей разреза, при $\sigma = 0,2 \text{ м}^{-1}$ совпадает с данными работы [11] для западной и восточной частей Тропической Атлантики: в районе $37 - 41^\circ$ ю. ш. $K = 55$, в районе $44 - 55^\circ$ ю. ш. $K = 72$.

В работе [12] исследовалась связь суммарного показателя рассеяния ($\lambda = 520 \text{ нм}$) с показателями рассеяния на разных углах. Было установлено, что максимальная корреляция ($r = 0,963$) между σ и $\sigma(\theta)$ наблюдается при угле рассеяния $4,5^\circ$:

$$\sigma = 0,11 \sigma(4,5) + 0,016. \quad (2)$$

При расчетах в [12] использованы измерения индикатрис рассеяния в северной части Атлантического океана, а также в Черном и Средиземном морях. Для сравнения подобные расчеты были выполнены по измерениям индикатрис рассеяния на разрезе по 20° в. д. в южной части Атлантического океана (рис. 6). Они показали, что и здесь максимальная корреляция ($r = 0,99$) между σ и $\sigma(\theta)$ наблюдается при $\theta = 4,5^\circ$ и связь имеет аналогичный вид:

$$\sigma = 0,1087\sigma(4,5) + 0,0214. \quad (3)$$



Р и с. 6. Связь на разрезе суммарного показателя рассеяния σ с показателем рассеяния $\sigma(\theta)$ на угле $\theta = 4,5^\circ$

Сравнение формул (2) и (3) показывает, что значения входящих в них коэффициентов близки.

По измерениям индикатрис рассеяния была рассчитана структура взвеси в зонах подъема и опускания вод на разрезе с использованием формул из работ [13, 14]. По данным [13] определялся средний радиус органических $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ и минеральных $\langle r_{\text{мин}} \rangle$ частиц и параметр дисперсности минеральных частиц ν (параметр Юнге). По данным [14] рассчитывалась массовая и численная концентрация трех фракций взвеси, содержащих частицы с радиусами 0,2 – 0,5 мкм; 0,5 – 1 мкм; > 1 мкм. Частицы с радиусами 0,2 – 1 мкм считались минеральными, с радиусами более 1 мкм – органическими. Результаты расчетов представлены в таблице.

Характеристики индикатрис рассеяния и структура взвеси в районах опускания и подъема вод

$H, \text{м}$	$\sigma, \text{м}^{-1}(\ln)$	K	$\langle \cos \theta \rangle$	$C_{\text{сум}}, \text{мг/л}$	$C_{0,2-0,5}/C_{\text{сум}}$	$N_{\text{сум}}, \text{млн/л}$	$N_{0,2-0,5}/N_{\text{сум}}$	$\langle r_{\text{орг}} \rangle, \text{мкм}$	$\langle r_{\text{мин}} \rangle, \text{мкм}$	ν
47°45' ю. ш., 20°00' в. д., зона опускание вод										
5	0,295	106	0,951	0,42	0,07	184	0,89	3,54	0,28	4,5
60	0,237	98	0,961	0,31	0,06	121	0,85	3,39	0,28	4,4
110	0,196	86	0,959	0,32	0,05	112	0,88	3,64	0,26	5,1
180	0,150	66	0,958	0,34	0,04	84	0,88	3,98	–	–
55°01' ю. ш., 20°07' в. д., зона подъем вод										
5	0,516	103	0,933	0,48	0,35	855	0,96	3,50	0,28	4,0
20	0,560	134	0,942	0,54	0,23	642	0,95	–	–	–
50	0,550	92	0,928	0,54	0,38	1019	0,97	–	–	–
130	0,055	29	0,918	0,11	0,04	38	0,90	3,86	0,27	5,0

Примечание. Символ σ – показатель рассеяния; K – коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния; $\langle \cos \theta \rangle$ – средний косинус индикатрисы рассеяния; $C_{\text{сум}}$ – суммарная концентрация взвеси; $C_{0,2-0,5}/C_{\text{сум}}$ – относительное содержание концентрации минеральной взвеси; $N_{\text{сум}}$ – суммарная численность частиц; $N_{0,2-0,5}/N_{\text{сум}}$ – относительное содержание числа минеральных частиц; $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ – средний радиус органических частиц; $\langle r_{\text{мин}} \rangle$ – средний радиус минеральных частиц; ν – параметр дисперсности минеральных частиц.

В зоне подъема при более высокой концентрации взвеси наблюдалось значительно большее относительное содержание во взвеси мелкой фракции. Причина этого явления пока не установлена. Отметим также, что как в зоне опускания, так и в зоне подъема проявлялась одинаковая закономерность изменения с глубиной среднего радиуса частиц, а именно: у органических он увеличивался, у минеральных уменьшался (параметр ν возрастал). Подобная закономерность отмечена в [13] при расчетах размеров частиц взвеси по индикатрисам рассеяния, измеренным в зонах опускания и подъема вод в Индийском океане.

Заключение.

1. Впервые получены данные об оптических характеристиках вод – показателе ослабления направленного света, индикатрисе рассеяния, индексе цвета воды в приантарктическом секторе Атлантического океана (разрез по 20° в. д. от 37° до 55° ю. ш.) в летний период Южного полушария.
2. Высокая пространственная изменчивость оптических характеристик на разрезе обусловлена наличием в данном районе чередующихся зон подъема и опускания вод.
3. Определены оптические типы вод на разрезе.
4. Оценена продуктивность вод, они отнесены к типу олиготрофных в зонах опускания и мезотрофных – в зонах подъема.
5. Связь коэффициента асимметрии с показателем рассеяния $K = f(\sigma)$ в районах 37 – 41° ю. ш. и 44 – 55° ю. ш. различна.

6. В водах на разрезе связь суммарного показателя рассеяния σ с показателем рассеяния в данном направлении $\sigma(\theta)$ имеет максимальную корреляцию на угле $4,5^\circ$.

7. Рассчитаны характеристики взвеси в районах подъема и опускания вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ли М.Е.* Логарифмический фотометр-прозрачномер // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1981. – С. 89 – 90.
2. *Маньковский В.И.* Морской импульсный нефелометр // Там же. – С. 87 – 89.
3. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Некоторые результаты исследований индекса цвета в море // Морские гидрофизические исследования. – 1976. – № 1(72). – С. 133 – 139.
4. *Маньковский В.И.* Эмпирическая формула для оценки показателя ослабления света в морской воде по глубине видимости белого диска // Океанология. – 1978. – 18, № 4. – С. 750 – 753.
5. *Войтов В.И.* Относительная прозрачность // Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана. – М.: Наука, 1983. – С. 21 – 26.
6. *Маньковский В.И.* Связь показателя вертикального ослабления дневного света с глубиной видимости белого диска // Океанология. – 2014. – 54, № 1. – С. 32 – 37.
7. *Ерлов Н.Г.* Оптика моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 149 – 156.
8. *Океанология.* Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. – М.: Наука, 1978. – С. 40.
9. *Афонин Е.И., Берсенева Г.П., Крупаткина Д.К. и др.* Оценка содержания хлорофилла в верхнем слое моря по измерению индекса цвета // Световые поля в океане / Под ред. В.Н. Пелевина, М.В. Козлянинова. – М.: Институт океанологии АН СССР, 1979. – С. 191 – 196.
10. *Владимиров В.Л., Афонин Е.И., Урденко В.А. и др.* Об использовании измерителей индекса цвета при проведении подспутниковых измерений // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. – Берлин: Институт космических исследований АН ГДР, 1987. – С. 84 – 121.
11. *Маньковский В.И.* Изменчивость индикатрисы рассеяния света в поверхностных водах Тропической Атлантики // Оптика моря и атмосферы. 10-й Пленум рабочей группы по оптике океана. – Л.: Изд-во Комиссии по проблемам Мирового океана АН СССР, 1988. – С. 180 – 181.
12. *Маньковский В.И.* Экспериментальные и теоретические данные о точке пересечения индикатрис рассеяния света морской водой // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1975. – 11, № 12. – С. 1284 – 1293.
13. *Ощепков С.Л., Сорокина Е.А.* Методика экспрессного восстановления дисперсности и концентрации морской взвеси из измерений индикатрис рассеяния // Океанология. – 1988. – 28, вып. 1. – С. 157 – 161.
14. *Копелевич О.В., Маштаков Ю.А., Буренков В.И.* Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды // Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. – М.: Наука, 1975. – С. 54 – 60.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: emankovskaya@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 15.01.14
После доработки 17.02.14

АНОТАЦІЯ На океанографічному розрізі, виконаному в південній частині Атлантичного океану по 20° с. д. від 37° до 55° п. ш., виміряні оптичні характеристики вод – показник ослаблення направленої світла, індикатриса розсіяння світла, індекс кольору води, глибина видимості білого диска. Висока просторова мінливість всіх оптичних характеристик на розрізі обумовлена наявністю зон підйому та опускання вод. У південній та північній частинах розрізу зв'язок коефіцієнта асиметрії індикатриса розсіяння з показником розсіяння різний. Зв'язок сумарного показника розсіяння з показником розсіяння в даному напрямі має максимальну кореляцію на вугіллі 4,5°. За індикатрисами розсіяння розрахований склад суспензії на різних глибинах в зонах підйому та опускання вод.

Ключові слова: показник ослаблення, індикатриса розсіяння, індекс кольору, глибина видимості білого диска.

ABSTRACT On the oceanographic section carried out in the southern part of the Atlantic Ocean along 20° E from 37 to 55° S, measured are the following water optical characteristics: beam attenuation coefficient, light scattering function, water colour index, Secchy disk depth. High spatial variability of all the optical characteristics on the section is conditioned by presence of water upwelling and downwelling. Relations between the assymetry coefficient of light scattering function and the total scattering coefficient are different in the southern and northern parts of the section. The relation between the total scattering coefficient and scattering coefficient in this direction is of maximum correlation at the angle 4.5°. Suspension structure on different depths in the zones of water upwelling and downwelling is calculated based on light scattering functions.

Keywords: beam attenuation coefficient, light scattering function, colour index, Secchy disk depth.