

В.Н. Пелевин, В.В. Ростовцева

## «Аномальная» спектральная зависимость показателя рассеяния света назад в водах, отличающихся большим содержанием фитопланктона

Институт океанологии РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 27.09.99 г.

Предложена методика оценки спектров рассеяния света назад морской водой по величине измеренных показателей вертикального ослабления света и коэффициента диффузного отражения для различного типа вод океана. Проведено моделирование процесса рассеяния света назад, получены величины показателей рассеяния назад для взвеси в зависимости от индекса типа вод  $m$ .

Как известно, спектральный состав восходящего от моря излучения, определяющий цвет моря, обусловлен как рассеянием, так и поглощением света средой. Следовательно, при решении обратной задачи определения концентрации примесей в морской воде по яркости восходящего излучения возникает необходимость параметрического задания обоих процессов в водах различной продуктивности. Однако эти два процесса взаимосвязаны и оценить величину вклада каждого из них в формирование потока восходящего излучения чрезвычайно трудно [1–6].

В [7, 8] предложили провести оценку этих процессов путем одновременного измерения характеристик светового поля, формирующегося в морской воде в результате совместного воздействия рассеяния и поглощения света средой на поток солнечного излучения. В качестве таких характеристик оказалось достаточным взять показатель вертикального ослабления света водой и коэффициент диффузного отражения света, многочисленные измерения которых проводились в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах [9, 10]. В [7] нами была предложена и апробирована методика оценки поглощения света морской водой по этим параметрам. В данной работе предложена методика оценки спектров рассеяния света назад в водах с различным содержанием основных экологических примесей.

### Оценка спектров показателя рассеяния света назад по показателю вертикального ослабления и коэффициенту диффузного отражения в водах различного типа

Как известно, коэффициент диффузного отражения света  $R$  определяется в двухпоточковом приближении выражением [1, 2]:

$$R = k\beta / (\kappa + \beta) \cong k\beta / \alpha, \quad (1)$$

где  $\beta$  – показатель рассеяния света назад;  $\kappa$  – показатель поглощения света морской водой;  $\alpha$  – показатель ослабле-

ния света;  $k$  – эмпирический коэффициент ( $k$  неселективен и по разным литературным источникам принимает значения от 0,25 до 0,31). Таким образом, имея спектральные характеристики  $R$  и  $\alpha$ , мы можем оценить спектр показателя рассеяния света назад:

$$\beta_\lambda \cong \alpha_\lambda R_\lambda / k. \quad (2)$$

Получим спектры показателя рассеяния назад для вод открытого океана различной трофности. Как известно, в открытом океане концентрации основных светопоглощающих и светорассеивающих примесей могут отличаться в различных акваториях в десятки и даже сотни раз, однако соотношения между ними колеблются в значительно более узких пределах, так как эти примеси есть, в основном, продукты жизнедеятельности популяций фитопланктона, представляющие собой живой планктон, детриты и растворенное органическое «желтое» вещество [1, 2, 8]. Это обстоятельство и позволило предложить однопараметрическую классификацию всех вод Мирового океана вне прибрежных вод по оптическому индексу  $m$  типа вод – положительному, плавно меняющемуся от единицы параметру:

$$m = 100 \lg e | \alpha_{500} | = 43,43 | \alpha_{500} |, \quad (3)$$

где  $|\alpha_{500}|$  – безразмерная величина, численно равная показателю вертикального ослабления солнечного света водой при  $\lambda = 500$  нм, выраженному в  $\text{м}^{-1}$ . Эта классификация вод открытого океана была предложена в [8, 9]; там же показано, что для вод с близкими значениями  $m$  как спектры показателей вертикального ослабления света, так и спектры коэффициентов диффузного отражения света морем различаются мало.

В результате анализа более 350 спектров показателей вертикального ослабления света в различных акваториях Мирового океана были получены типовые зависимости для диапазона возможных значений  $m$  от 1,15 в водах Тихого океана в районе острова Самоа до 9–11 в Перуанском апвеллинге и дана оценка среднеквадратических отклонений формы спектров от типовых [8]. Аналогично были получены ус-

редненные спектры коэффициента диффузного отражения света морем [8].

На рис. 1, 2 в качестве примера приведены спектры показателей вертикального ослабления и коэффициентов диффузного отражения солнечного излучения для вод с  $m$  в 1,5; 3; 5 и 8: первый случай характерен для олиготрофных вод, последний – для эвтрофных. Хорошо видна эволюция спектров показателя вертикального ослабления со смещением минимума в длинноволновую область, что связано с увеличением концентрации пигментов фитопланктона и растворенного органического вещества (РОВ), поглощающих свет в коротковолновой части видимого спектра. По той же причине происходит снижение  $R_\lambda$  в синей области спектра с ростом  $m$ .

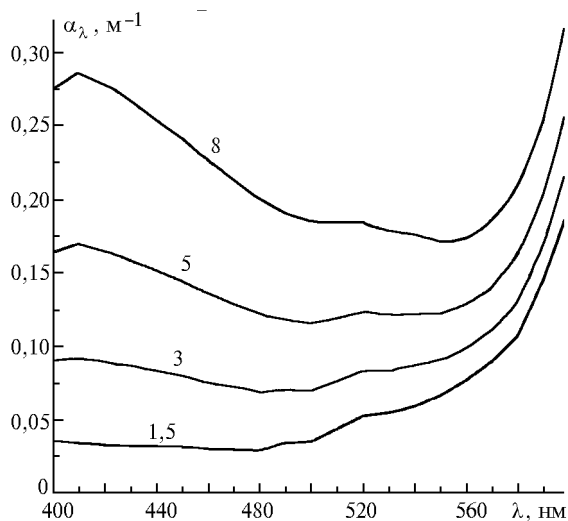


Рис. 1. Спектр показателя вертикального ослабления света  $\alpha_\lambda$  в водах, характеризующихся различным индексом типа вод  $m$

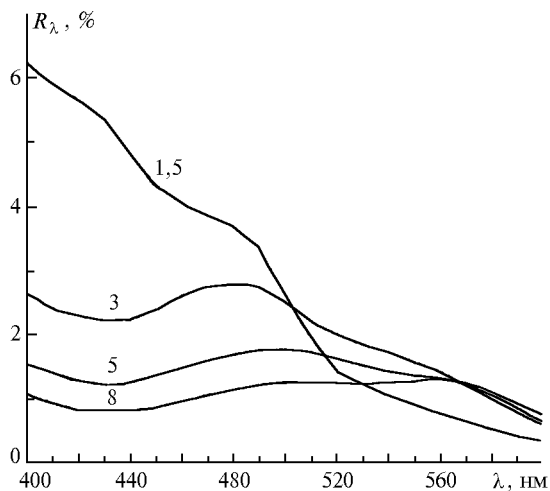


Рис. 2. Спектр коэффициента диффузного отражения света  $R_\lambda$  в водах, характеризующихся различным индексом типа вод  $m$

Эти данные являются исходными для получения спектров рассеяния света морской водой. Распределение индекса типа вод  $m$  в Мировом океане можно найти в [10]. На рис. 3 представлены спектры показателя рассеяния света назад, рассчитанные по формуле (2) для вод с теми же значениями оптического индекса типа вод  $m$ .

Как известно, в прозрачных водах основную роль играет молекулярное рэлеевское рассеяние, спектр которого определяется степенной зависимостью

$$\beta_m = \beta_{500} (\lambda_0/\lambda)^{4,3}, \quad (4)$$

где  $\lambda_0 = 500$  нм.

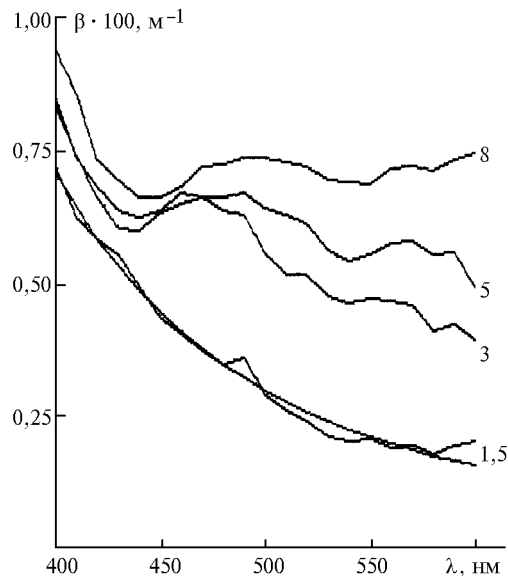


Рис. 3. Спектры показателя рассеяния света назад, рассчитанные по формуле (2). Для  $m = 1,5$  приведена функция, моделирующая молекулярное рэлеевское рассеяние согласно (4)

Видно, что она хорошо аппроксимирует спектр показателя рассеяния света в прозрачных водах.

При уменьшении прозрачности вод к молекулярному рассеянию добавляется рассеяние на взвеси. Обычно при моделировании спектров рассеяния света назад в эвтрофных водах эту составляющую считают пропорциональной степенной функции от  $\lambda$  с показателем меньше 4,3, но положительным [1, 12]. В этом случае спектры рассеяния будут монотонно убывающими с увеличением длины волны в водах любого типа. Однако, как видно на рисунке, при больших  $m$  наблюдается даже возрастание показателя рассеяния назад при  $\lambda > 450$  нм.

Для объяснения этого «аномального» явления рассмотрим более подробно процесс рассеяния света назад естественной взвесью в водах с высоким содержанием фитопланктона.

### Рассеяние света в водах с высоким содержанием фитопланктона

Рассмотрим процесс рассеяния света назад на крупной частице естественной взвеси. При этом будем учитывать тот факт, что эта взвесь содержит окрашенные фрагменты, такие как пигменты фитопланктона и детриты, а кроме того, на поверхности частиц может происходить адсорбция окрашенных веществ из раствора. Тогда в двухпоточковом приближении

$$F_\uparrow = F_\downarrow a \exp \{-2\delta[\kappa'_{s500} \exp [-g(\lambda - \lambda_0)] + \kappa'_p(\lambda) + \kappa'_{sm}]\}, \quad (5)$$

где  $F_\uparrow$ ,  $F_\downarrow$  – восходящий и нисходящий потоки излучения на частицу в море;  $a$  – альбедо белой частицы;  $\delta$  – эффе-

тивный путь, который проходит свет в полупрозрачной частице;  $\kappa'_{ys500}$  – показатель поглощения света «желтым» веществом в детритах на длине волны  $\lambda = 500$  нм;  $g$  – показатель степени, совпадающий по величине с показателем, полученным экспериментально для «желтого» вещества в растворе,  $g = 0,015 \text{ нм}^{-1}$  [11];  $\kappa'_p(\lambda)$  – показатель поглощения пигментами фитопланктона, содержащимися в частице,  $\kappa'_{sm}$  – показатель поглощения света частицей, не связанный с наличием пигментов фитопланктона и «желтого» вещества.

Альбеде окрашенной частицы согласно (5) отличается от альбеде белой частицы экспоненциальным множителем. Показатель рассеяния света назад крупной фракцией взвеси будет иметь вид

$$\beta_k = S^*Na\{1 - 2\delta[\kappa'_{ys500} \exp[-g(\lambda - \lambda_0)] + \kappa'_p(\lambda) + \kappa'_{sm}]\}.$$

Здесь  $S^*$  – эффективная площадь одной частицы;  $N$  – количество частиц в единице объема. При получении формулы учтены малые размеры частиц, а следовательно, и возможность преобразования экспоненты в степенной многочлен.

Таким образом, показатель обратного рассеяния света водой в водах с высоким содержанием фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности может быть смоделирован функцией следующего вида:

$$\beta = \beta_{w500}(\lambda_0/\lambda)^{4,3} + \beta_{m500}(\lambda_0/\lambda)^{4,3} + \beta_k\{1 - \chi \exp[-g(\lambda - \lambda_0)] - \phi\kappa_p^*(\lambda)\}. \quad (6)$$

Первое слагаемое представляет собой рассеяние назад света чистой морской водой (рассеяние на флуктуациях плотности Эйнштейна–Смолуховского), второе слагаемое характеризует рассеяние назад на мелкой фракции взвеси (предполагается, что рассеяние на мелкодисперсной фракции взвеси с размерами частиц, много меньше длины волны излучения, имеет спектральную зависимость, аналогичную спектру молекулярного рассеяния) и третье – характеризует рассеяние назад на крупной взвеси. Здесь  $\beta_k$  – неселективный показатель рассеяния света назад, пропорциональный общей концентрации крупной взвеси в морской воде;  $\chi$  – параметр, пропорциональный концентрации «желтого» вещества в частицах;  $\kappa_p^*(\lambda)$  – функция, имеющая вид удельного спектра поглощения пигментов фитопланктона;  $\phi$  – величина, пропорциональная концентрации пигментов во взвеси.

В общем случае показатель рассеяния является функцией четырех неизвестных параметров:  $\beta_{m500}$ ,  $\beta_k$ ,  $\chi$ ,  $\phi$ . Для выявления общих закономерностей изменения спектра рассеяния назад в водах с высокой продуктивностью при больших  $m$  процесс минимизации расхождения модельной функции и эмпирических спектров рассеяния проведен в спектральном диапазоне 450–600 нм по двум параметрам:  $\beta_k$  и  $\chi$ . Действительно, на этом участке спектра влияние мелкой фракции взвеси и поглощение света пигментами фитопланктона значительно уступают двум другим факторам: неселективному рассеянию и поглощению света «желтым» веществом.

На рис. 4 приведены спектры рассеяния назад взвешенными частицами, построенные по эмпирическим данным. Для вод с  $m = 8$  (концентрацией хлорофилла около  $2,3 \text{ мг/м}^3$  [12]) приведена модельная функция с параметрами, полученными в результате процесса минимизации расхождений методом наименьших квадратов:

$$\beta_{\text{mod}} = \beta_k \{1 - \chi \exp[-g(\lambda - \lambda_0)]\}. \quad (7)$$

В результате оптимизации этой функции получены значения  $\beta_k = 0,0064$  и  $\chi = 0,34$ . Видно, что предложенный вид функции хорошо аппроксимирует процесс рассеяния света назад на частицах взвеси в эвтрофных водах открытого типа.

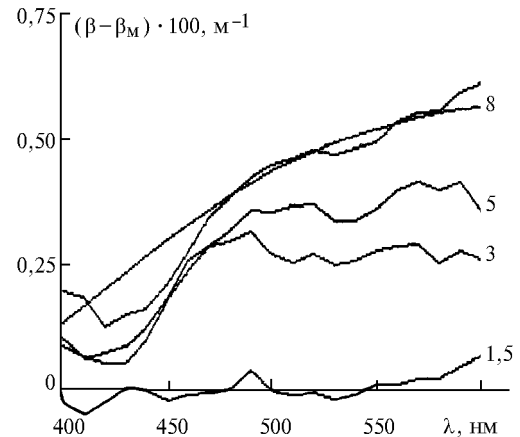


Рис. 4. Спектры показателя рассеяния света назад на частицах взвеси, полученные в результате вычитания из спектров для  $m = 1,5; 3; 5$  и  $8$  рэлеевского спектра рассеяния назад чистой морской водой. Для  $m = 8$  приведена модельная функция (7)

Аналогичные вычисления были проведены для других  $m > 3$ . Как и следовало ожидать, показатель неселективного рассеяния на частицах оказывается пропорциональным показателю неселективного поглощения с коэффициентом пропорциональности  $\beta_k \sim 0,1 \kappa_{sm}$ , а параметр  $\chi$  хорошо коррелирует с концентрацией растворенного «желтого» вещества в морской воде с коэффициентом  $\sim 20$ . Эти соотношения могут быть использованы для моделирования процесса рассеяния назад в открытом океане. Для прибрежных вод они требуют дополнительной проверки. Однако вид функции, моделирующей спектр рассеяния света назад, будет соответствовать предложенному выше как для вод открытого океана, так и для прибрежных вод.

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных показано, что при увеличении концентрации природной взвеси спектральный ход показателя рассеяния назад взвесью приобретает «аномальный» вид: показатель рассеяния в коротковолновой (синей) области спектра оказывается меньшим, чем в длинноволновой области. Это позволяет предположить, что содержащееся в детритах и адсорбированное на поверхности минеральных частиц взвеси «желтое» вещество оказывает существенное влияние на рассеяние света частицами. При этом альбеде крупной частицы в коротковолновой области спектра уменьшается, что и объясняет аномальный вид зависимости показателя рассеяния света назад. Этот эффект становится заметным начиная со значений индекса типа вод  $m > 3$ , т. е. при концентрации пигмента фитопланктона больше  $0,5 \text{ мг/м}^3$ . Учет предложенного механизма рассеяния при моделировании процессов формирования спектрального состава восходящего над поверхностью моря излучения позволит с большей точностью решать обратные задачи определения концентрации натуральных примесей в морской воде.

1. *Оптика* океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1983. 372 с.

2. Jerlov N.G. Marine optics. Elsevier: Amsterdam; New York, 1976. 231 p.
3. Morel A. and Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnol. Oceanogr. V. 22. N 4. 1977. P. 709–722.
4. Prieur L. and Sathidranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials // Limnol. Oceanogr. V. 26. N 4. 1981. P. 671–689.
5. Baker K.S. and Smith R.C. Bio-optical classification and model of natural waters 2 // Limnol. Oceanogr. V. 27. N 3. 1982. P. 500–509.
6. Morel A. Optical modelling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters) // J. Geophys. Res. V. 93. N C9. 1988. P. 10749–10768.
7. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации хлорофилла в морской воде по измерениям спектрального показателя вертикального ослабления света // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 12. С. 1778–1783.
8. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана // А.С. Мониц, В.П. Красицкий. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 375 с.
9. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении потока солнечной энергии с глубиной в водах Индийского океана // Световые поля в океане. М.: ИОАН СССР, 1979. С. 73–85.
10. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении фотосинтетически активной радиации в водах Тихого океана // Океанология. 1978. Т. 18. № 4. С. 619–625.
11. Пелевина М.А. Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворенным органическим «желтым» веществом в водах Балтийского моря // Световые поля в океане. М.: ИОАН СССР, 1980. С. 92–97.
12. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.

***V.N. Pelevin and V.V. Rostovtseva. «Anomalous» spectral dependence of light backscattering radiation index in water with high phytoplankton concentration.***

Method for estimation of spectra of backscattering radiation index was suggested and proved using the experimental data on vertical light attenuation and diffuse light reflection coefficients for sea-waters of different types. The modeling of backscattering radiation was carried out, the dependencies of the backscattering index on the water type optical index  $m$  are obtained.