

В.Н. Пелевин, В.В. Ростовцева

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ И СВЕТОРАССЕИВАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РАЗЛИЧНОГО ТИПА ВОДАХ ОТКРЫТОГО ОКЕАНА

Получены оценки концентрации основных светорассеивающих и светопоглощающих компонентов в морской воде, включая хлорофилл. Составлена таблица оценок концентраций практически для всех типов морской воды, встречающихся в открытом океане, позволяющая определять содержание основных экологических компонентов в открытом океане всего лишь по одному параметру m , рассчитанному по величине показателя вертикального ослабления света водой. Пользуясь картой распределения типов вод, данными прямых судовых измерений или оценками m по данным измерений других параметров, по этой таблице можно оценить состав верхнего слоя океанических вод практически в любой акватории Мирового океана. Кроме того, при наличии измерений показателя вертикального ослабления света на разных глубинах разработанный метод дает возможность оценить распределение основных экологических компонентов вод открытого океана по глубине.

Оценка содержания хлорофилла и других светопоглощающих и светорассеивающих примесей в морской воде (будем ниже называть их для краткости основными экологическими компонентами) в различных акваториях Мирового океана является одной из основных проблем при решении ряда экологических и прикладных задач (оценки биопродуктивности Мирового океана, распределения рыбных ресурсов, экологического мониторинга акваторий и др.) [1–3]. Широко используемые [4–5] эмпирические методики определения концентрации хлорофилла по цветовому индексу не обладают высокой точностью. В 1995 г. [6] нами была предложена методика оценки концентрации хлорофилла, растворенного органического «желтого» вещества (РОВ) и светопоглощающей «серой» взвеси при оптимизации модели спектра поглощения света морской водой, причем последний оценивался по измерениям показателя вертикального ослабления света в воде и коэффициента диффузного отражения света морем.

В данной работе проанализированы спектры поглощения и рассеяния света морем по методике [6] и проведены расчеты состава морской воды практически для всех типов океанических вод. Полученные данные могут быть использованы для оценки распределения основных экологических компонентов в любой акватории открытого океана.

1. Спектры поглощения света водами открытого океана

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 являются продуктами жизнедеятельности (биологического цикла) морского планктона [1,8]. Это обстоятельство и позволило построить однопараметрическую классификацию всех вод вне шельфа по параметру

$$m = 100 \lg e \alpha_{500},$$

где α_{500} – показатель вертикального ослабления света водой при $\lambda = 500$ нм. Такая классификация вод открытого океана была предложена в [7 и 8]. Было показано, что для вод с одинаковым значением m как спектры показателей вертикального ослабления света, так и спектры коэффициентов диффузного отражения света морем различаются мало. В результате анализа более чем 350 спектров показателей вертикального ослабления света в различных акваториях Мирового океана были получены типовые зависимости для диапазона возможных значений m от 1,2 в водах Саргассова моря до $9 \div 11$ в Перуанском и Атлантическом апвеллингах (табл. 1) и дана оценка их среднеквадратических отклонений [8]. Аналогично были обработаны спектры коэффициента диффузного отражения света морем [8].

Таблица 1

Показатель вертикального ослабления света в море, м⁻¹

λ, нм	m											
	1,2	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
380	0,026	0,040	0,059	0,110	0,142	0,185	0,231	0,276	0,316	0,356	0,404	0,449
390	0,025	0,038	0,056	0,104	0,135	0,176	0,221	0,264	0,302	0,342	0,389	0,433
400	0,024	0,036	0,054	0,100	0,130	0,170	0,214	0,255	0,292	0,332	0,379	0,423
410	0,022	0,033	0,052	0,095	0,125	0,164	0,207	0,247	0,284	0,323	0,370	0,414
420	0,021	0,032	0,051	0,092	0,122	0,160	0,202	0,241	0,277	0,316	0,363	0,408
430	0,021	0,032	0,050	0,089	0,119	0,156	0,197	0,235	0,270	0,309	0,355	0,400
440	0,021	0,032	0,049	0,087	0,115	0,151	0,191	0,228	0,262	0,299	0,345	0,388
450	0,021	0,031	0,048	0,083	0,111	0,145	0,183	0,219	0,251	0,287	0,331	0,373
460	0,021	0,031	0,046	0,080	0,106	0,138	0,174	0,208	0,238	0,273	0,314	0,353
470	0,021	0,030	0,044	0,075	0,100	0,131	0,164	0,195	0,223	0,256	0,294	0,330
480	0,021	0,029	0,042	0,071	0,094	0,122	0,152	0,181	0,207	0,237	0,272	0,305
490	0,025	0,033	0,045	0,071	0,093	0,119	0,146	0,172	0,196	0,224	0,255	0,285
500	0,028	0,034	0,046	0,069	0,092	0,115	0,138	0,161	0,184	0,207	0,230	0,253
510	0,036	0,042	0,051	0,073	0,093	0,114	0,137	0,159	0,179	0,201	0,225	0,249
520	0,046	0,052	0,061	0,081	0,099	0,119	0,140	0,160	0,178	0,199	0,221	0,242
530	0,049	0,054	0,062	0,081	0,099	0,117	0,136	0,155	0,172	0,191	0,211	0,231
540	0,054	0,060	0,067	0,085	0,102	0,120	0,138	0,155	0,172	0,190	0,209	0,227
550	0,064	0,070	0,077	0,094	0,111	0,128	0,146	0,163	0,179	0,196	0,214	0,232
560	0,074	0,079	0,086	0,103	0,120	0,137	0,154	0,171	0,187	0,204	0,222	0,239
570	0,089	0,095	0,101	0,118	0,135	0,152	0,170	0,186	0,203	0,220	0,238	0,255
580	0,104	0,109	0,116	0,133	0,150	0,168	0,185	0,202	0,218	0,236	0,254	0,272
590	0,143	0,148	0,154	0,171	0,188	0,206	0,224	0,241	0,257	0,275	0,293	0,311
600	0,189	0,194	0,201	0,217	0,235	0,253	0,270	0,287	0,304	0,322	0,340	0,358

Эти данные являются исходными для получения спектров поглощения света морской водой. Использовано соотношение между пространственной плотностью поглощения световой энергии в некотором элементарном объеме и вектором переноса лучистой энергии \mathbf{H} :

$$\kappa E^0 = -\operatorname{div} \mathbf{H}, \quad (1)$$

где κ – показатель поглощения света водой; E^0 – пространственная освещенность данного объема ($E^0 = \int_{4\pi} B d\omega$, B – яркость излучения). Поскольку горизонтальные градиенты оптических свойств воды много меньше вертикальных (плоскостойкая среда) и масштаб неоднородности освещения поверхности дневным светом значительно превышает масштаб вертикальной изменчивости светового поля в воде, горизонтальными градиентами \mathbf{H} можно пренебречь.

Вертикальная составляющая вектора \mathbf{H} равна разности освещенностей элементарного объема сверху (E_{\downarrow}) и снизу (E_{\uparrow}). Тогда (1) преобразуется к виду

$$\frac{\partial (E_{\downarrow} - E_{\uparrow})}{\partial z} = -\kappa E^0. \quad (2)$$

Разделив (2) на $(E_{\downarrow} - E_{\uparrow}) = E_{\downarrow}(1 - R)$, где R – коэффициент диффузного отражения света морем, получаем

$$\alpha \left[1 + \frac{\partial R}{\partial z} \right] = \kappa \frac{E^0}{E_{\downarrow} - E_{\uparrow}}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha = -\frac{1}{E_{\downarrow}} \frac{\partial E_{\downarrow}}{\partial z}$ – показатель вертикального ослабления света для нисходящего потока излучения. Величина R слабо меняется с ростом глубины. Обработка экспериментальных данных показала [1], что второе слагаемое в квадратных скобках не превышает 0,04, что позволяет им пренебречь. В правой части (3) стоит выражение для среднего косинуса угла падения излучения:

$$(E_{\downarrow} - E_{\uparrow})/E^0 = \int_{4\pi} B \cos \theta d\omega / \int_{4\pi} B d\omega = \mu, \quad (4)$$

где θ – угол между вектором яркости и нормалью вниз. Тогда расчетная формула принимает вид [9]

$$\kappa = \alpha \mu. \quad (5)$$

Как было показано в ходе модельного эксперимента и при измерениях в Индийском океане [10], средний косинус угла падения хорошо коррелирует с коэффициентом диффузного отражения света с уравнением регрессии

$$\mu = 1 - 0,185 \sqrt{R} \quad (6)$$

(R задан в процентах). Погрешность определения μ по этой формуле составляет $0,03 < \Delta\mu < 0,04$. Используя усредненные значения R и α , полученные в ходе многочисленных измерений [8], получаем спектры поглощения света морской водой различных типов (табл. 2).

Таблица 2

Показатель поглощения света морской водой, m^{-1}

λ , нм	m											
	1,2	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
380	0,014	0,023	0,036	0,074	0,105	0,142	0,183	0,220	0,254	0,290	0,330	0,369
390	0,014	0,022	0,035	0,071	0,100	0,136	0,175	0,210	0,243	0,277	0,318	0,356
400	0,013	0,021	0,034	0,068	0,097	0,131	0,169	0,203	0,235	0,269	0,309	0,347
410	0,012	0,020	0,033	0,066	0,093	0,126	0,163	0,197	0,228	0,262	0,302	0,340
420	0,012	0,019	0,032	0,064	0,091	0,123	0,159	0,192	0,222	0,256	0,296	0,334
430	0,012	0,020	0,032	0,063	0,089	0,120	0,155	0,187	0,216	0,250	0,290	0,327
440	0,013	0,020	0,032	0,061	0,086	0,117	0,150	0,181	0,210	0,242	0,281	0,318
450	0,013	0,020	0,032	0,059	0,083	0,112	0,144	0,174	0,201	0,232	0,269	0,305
460	0,013	0,020	0,031	0,057	0,079	0,107	0,137	0,165	0,190	0,219	0,254	0,288
470	0,013	0,020	0,030	0,054	0,075	0,100	0,128	0,154	0,177	0,205	0,237	0,268
480	0,014	0,019	0,028	0,050	0,070	0,093	0,119	0,142	0,164	0,189	0,218	0,246
490	0,018	0,023	0,031	0,051	0,069	0,091	0,114	0,135	0,155	0,177	0,203	0,228
500	0,020	0,024	0,032	0,050	0,066	0,086	0,106	0,126	0,144	0,164	0,187	0,209
510	0,027	0,031	0,038	0,054	0,070	0,087	0,106	0,123	0,140	0,158	0,178	0,198
520	0,036	0,040	0,046	0,061	0,076	0,092	0,108	0,124	0,140	0,156	0,174	0,192
530	0,039	0,042	0,047	0,061	0,075	0,090	0,106	0,120	0,135	0,150	0,166	0,182
540	0,044	0,047	0,052	0,065	0,078	0,092	0,107	0,121	0,135	0,149	0,164	0,179
550	0,053	0,056	0,061	0,073	0,086	0,100	0,114	0,127	0,141	0,154	0,169	0,183
560	0,062	0,065	0,069	0,081	0,094	0,107	0,121	0,135	0,148	0,161	0,176	0,190
570	0,075	0,079	0,083	0,094	0,107	0,121	0,134	0,148	0,161	0,175	0,189	0,203
580	0,088	0,092	0,096	0,107	0,120	0,134	0,148	0,161	0,174	0,188	0,203	0,217
590	0,122	0,125	0,129	0,141	0,154	0,167	0,181	0,195	0,208	0,222	0,237	0,252
600	0,163	0,166	0,170	0,181	0,194	0,208	0,222	0,236	0,249	0,263	0,278	0,293

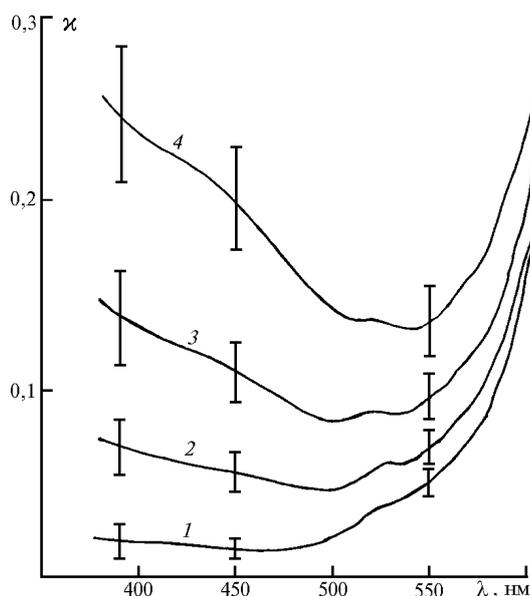


Рис. 1. Спектры поглощения вод различного типа: 1 – $m = 1,5$ (олиготрофные воды); 2 и 3 – $m = 3$ и $m = 5$ соответственно (мезотрофные воды); 4 – $m = 8$ (эвтрофные воды)

На рис. 1 в качестве примера приведены спектры поглощения для четырех типов вод. Хорошо видна эволюция спектров со смещением минимума поглощения в желтую область, что связано с увеличением концентрации хлорофилла и РОВ.

Такова характеристика величин светопоглощения в морских водах разного типа. Распределение индекса типа вод m в Мировом океане можно найти в [13].

2. Содержание основных светопоглощающих и светорассеивающих компонентов в акваториях с различными индексами типа вод

Полученные статистически усредненные спектры поглощения позволяют рассчитать наиболее вероятные концентрации основных светопоглощающих и рассеивающих компонентов практически в любой акватории открытого океана. В качестве модели поглощения используется выражение

$$\tilde{\kappa}_\lambda = \kappa_{w,\lambda} + C_p \kappa_{p,1}^*(C_p) + \kappa_{ys} \exp \{-g(\lambda - \lambda_0)\} + \kappa_{sm}, \quad (7)$$

где $\kappa_{w,\lambda}$ – поглощение света чистой водой; C_p – концентрация хлорофилла, мг/м³; $\kappa_{p,1}^*$ – удельное поглощение света пигментами фитопланктона, которое само зависит от концентрации хлорофилла; κ_{ys} – показатель поглощения света «желтым» веществом на длине волны $\lambda_0 = 500$ нм; g – показатель степени, полученный экспериментально, $g = 0,015$ нм⁻¹ [14]; κ_{sm} – показатель поглощения света взвешенными частицами без пигментов фитопланктона.

Для нахождения концентраций примесей в акватории с конкретными значениями индекса типа вод m будем искать минимум целевой функции

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^N (\kappa_{\lambda,i}(m) - \tilde{\kappa}_{\lambda,i})^2 \quad (8)$$

в трехмерном пространстве параметров $x = C_p$, $y = \kappa_{ys}$, $z = \kappa_{sm}$. Здесь $\kappa_{\lambda,i}(m)$ – значения из табл. 2; $\tilde{\kappa}_{\lambda,i}$ – модельные значения (7). Фактически это означает подбор таких значений концентраций примесей, которые обеспечат наименьшее отклонение от значений, полученных на основе статистически усредненных экспериментальных данных. Методика минимизации подробно изложена в [6].

В качестве показателя поглощения света чистой морской водой принималось его значение для минимального наблюдавшегося в Мировом океане оптического индекса m , равного 1,15 (это экстремально малое значение было измерено в районе антициклонического круговорота и даунвеллинга в Карибском море [11]). Спектральные значения показателя поглощения для $m = 1,15$ были получены линейной экстраполяцией (табл. 3). Зависимость удельного поглощения фитопланктона от концентрации принималась в соответствии с [12, 15]. Расчеты проводились в интервале длин волн 380–600 нм. Результаты расчетов сведены в табл. 4, а также графически представлены на рис. 2.

Таблица 3

Показатель поглощения света чистой морской водой

λ	κ_w	λ	κ_w	λ	κ_w	λ	κ_w
380	0,013	440	0,011	500	0,019	560	0,061
390	0,012	450	0,012	510	0,026	570	0,075
400	0,012	460	0,012	520	0,035	580	0,088
410	0,011	470	0,012	530	0,038	590	0,121
420	0,011	480	0,013	540	0,043	600	0,162
430	0,011	490	0,017	550	0,052	–	–

Для сравнения полученных результатов с прямыми измерениями концентрации пигмента хлорофилла на рис. 2 приведены также значения C_p , измеренные в Атлантическом океане на многочисленных станциях и усредненные для каждого m . Видно, что результаты расчета и прямых измерений хорошо согласуются между собой. Графическое представление результатов расчета дает возможность выявить интересную закономерность: до значений $m \sim 7 \div 8$ наблюдается почти пропорциональное увеличение концентрации хлорофилла и продуктов его распада (РОВ) при переходе от менее продуктивных вод к более продуктивным – это область равновесного состояния. Для вод, характеризующихся большими значениями m , пропорции резко нарушаются: концентрация хлорофилла нарастает гораздо быстрее, чем концентрация РОВ – это соответствует зонам апвеллинга.

Концентрация хлорофилла и показатели поглощения света растворенным органическим веществом и взвесью при $\lambda_0 = 500$ нм в зависимости от индекса типа вод

m	$C_p, \text{мг/м}^3$	$\kappa_{ys}, \text{м}^{-1}$	$\kappa_{sm}, \text{м}^{-1}$
1,2	0,002	0,0001	0,00054
1,5	0,019	0,0007	0,0032
2	0,16	0,0014	0,0057
3	0,52	0,0045	0,0135
4	0,81	0,0067	0,023
5	1,16	0,0093	0,033
6	1,6	0,0122	0,042
7	2,0	0,0145	0,052
8	2,3	0,017	0,061
9	2,9	0,019	0,070
10	3,6	0,021	0,079
11	4,3	0,022	0,087

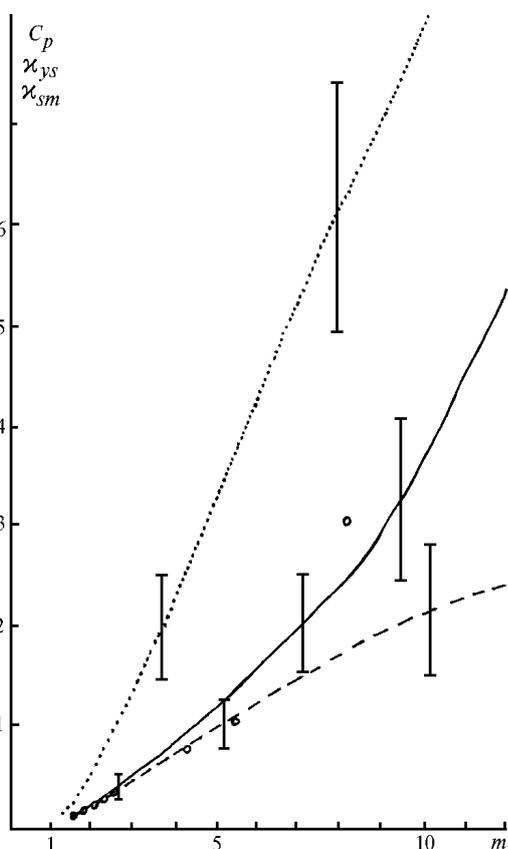


Рис. 2. Зависимость концентрации основных светорассеивающих и светопоглощающих компонентов от типа морской воды: — — концентрация хлорофилла $C_p, \text{мг/м}^3$; - - - - показатель поглощения света растворенным органическим веществом $\kappa_{ys} \cdot 10^2, \text{м}^{-1}$; ···· — показатель поглощения света взвесью без учета пигментов хлорофилла $\kappa_{sm} \cdot 10^2, \text{м}^{-1}$; o — результаты прямых измерений концентрации хлорофилла

Определим погрешность полученных оценок. Среднеквадратическое отклонение (СКО) α от среднего значения меняется от нескольких процентов для центральной части спектра до $\sim 10\%$ на границе выбранного диапазона длин волн [8]. Значения R , использованные при расчете, имеют погрешность $\sim 10\%$. Однако величина R входит в (6) под корнем и с множителем меньше 0,2. Учитывая это и усредняя результат по всему диапазону, можно показать, что оценка величины показателя поглощения для данного m имеет погрешность $\sim 10\%$. В [6] было показано, что при вариации параметров, входящих в (7), в пределах их возможных изменений и вариаций значений показателя поглощения с коэффициентом не более 10% погрешность оценки концентраций основных экологических компонентов морской воды составляет не более 20–25%.

Таким образом, нами реализована следующая последовательность операций: усреднение многочисленных экспериментальных данных по показателю вертикального ослабления света α и коэффициенту диффузного отражения света R ; классификация океанических вод по m ; расчет показателя поглощения света κ через дивергенцию вектора переноса; оптимизация модели поглощения света морской водой. В результате получены оценки концентрации основных светорассеивающих и светопоглощающих компонентов в морской воде, включая хлорофилл. Это позволило составить таблицу оценок концентраций практически для всех типов морской воды, встречающихся в открытом океане.

Теперь для определения содержания основных экологических компонентов в открытом океане достаточно получить оценку всего лишь одного параметра m (или α_{500}). Пользуясь картой распределения типов вод (см., например, [13]) либо данными судовых измерений, либо оценками m по данным измерений других параметров (см., например, [8]), по этой таблице можно оценить состав верхнего слоя океанических вод практически в любой открытой акватории Мирового океана. Кроме того, при наличии измерений показателя вертикального ослабления света на разных глубинах разработанный метод дает возможность оценить распределение основных экологических компонентов вод открытого океана по глубине.

1. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. 372 с.
2. Sugihara S., Kishino M., Okami N. Estimation of water quality parameters from irradiance reflectance using optical models // J. of the Oceanographical Society of Japan. 1985. V. 41. N 6. P. 399–406.
3. Sathyendranath S., Platt T., Cavarhill C.M., Warnock R.E., Levis M.R. Remote sensing of oceanic primary production computations using a spectral model // Deep-Sea Research. 1989. V. 36. P. 431–453.
4. Clark D.K. Phytoplankton algorithms for the Nimbus-7 CZCS // Oceanography from Space / J. Gower Ed. New York: Plenum Press. 1981. P. 227–238.
5. Chelton D.V. and Schlax M.G. Estimation of time averages from irregularly spaced observations: with application to Coastal Zone Color Scanner estimates of chlorophyll concentration // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N 14. P. 669–692.
6. 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. N12. С. 1778–1783.
7. Пелевин В.Н., Рутковская В.А.. Об ослаблении потока солнечной энергии с глубиной в водах Индийского океана // Световые поля в океане. М.: ИО АН СССР, 1979. С. 73–85.
8. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана / А.С. Монин, В.П. Красицкий. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
9. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Объемное поглощение солнечной энергии водами океана // Океанология. 1986. Т. 26. N 6. С. 914–919.
10. Пелевин В.Н., Прокудина Т.М. О зависимости параметров глубинного тела яркости от критерия « p » // Световые поля в океане. М.: ИО АН СССР, 1979. С. 34–39.
11. Очаковский Ю.Е. и др. Распространение естественного излучения в океане // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах / Под ред. А.С. Монина, К.С. Шифрина. М.: Наука, 1978. С. 166–190.
12. Wozniak B., Ostrowska M. // Oceanologia (Pol.). 1990. N 29. P. 91–115.
13. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении фотосинтетически активной радиации в водах Тихого океана // Океанология. Т. 18. 1978. Т. 18. N 4. С. 619–625.
14. Пелевина М.А. Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворенным органическим «желтым» веществом в водах Балтийского моря // Световые поля в океане. М.: ИО АН СССР, 1980. С. 92–97.
15. Semovski S.V., Wozniak B., Pelevin V.N. Multispectral satellite data assimilation in bio-optical models of plankton dynamics // Stud. i Mater. Oceanol. 1995. N 68. P. 125–147.

Институт океанологии РАН,
Москва

Поступила в редакцию
27 января 1997 г.

V.N. Pelevin, V.V. Rostovtseva. Estimation of Lightabsorbing and Lightscattering Admixtures Concentration in Different Type Open Sea Waters.

The concentration of the main lightabsorbing and lightscattering admixtures in sea-water including chlorophyll was determined. The table for practically all types of sea-water in open ocean is given that enables one to estimate the sea-water admixtures concentration using only one parameter m calculated from the light vertical attenuation coefficient. Using the map of sea water types distribution or data of direct measurements of m from board a ship or deriving m from other parameters measurement, the upper ocean layer admixtures concentration can be estimated with the help of this table practically in any aquatoria of the World ocean. Besides that the vertical profiling of the chlorophyll and other admixtures concentration is possible by this method if the appropriate measurements data of the light vertical attenuation coefficient at different depths are available.