

В.Н. Пелевин, Л.И. Копрова

О зависимости между глубиной видимости белого диска, оптическим индексом типа вод и циркуляцией вод Атлантического океана

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 6.04.2004 г.

Выполнен анализ экспериментальных данных о глубине видимости белого диска Z_δ , оптического индекса типа вод m и циркуляции поверхностных вод Атлантического океана. Сопоставлены карты распределения Z_δ и m на всей акватории Атлантики с картами динамической высоты D на уровне 100 м. Установлено, что большие значения Z_δ и малые значения m наблюдаются при антициклонической циркуляции. Мутные воды характерны для циклонической циркуляции, вызывающей подъем к поверхности богатых биогенами глубинных вод. Получена эмпирическая зависимость $Z_\delta = Z_\delta(m)$, которую можно использовать для оценки величины Z_δ по дистанционным измерениям m в видимой области спектра с судна, самолета или спутника.

В литературе опубликовано огромное количество результатов измерений глубины видимости белого диска Z_δ ; это связано с тем, что величина Z_δ легко измеряется с любого судна и почти в любых условиях. Данные о Z_δ обобщены в Атласе океанов [1, 2]. Величина Z_δ дает представление о чистоте вод, однако весьма относительное, недаром эту величину еще называют «относительной прозрачностью».

Большую информацию о водах дает оптический индекс типа вод m . В работах [3–6] показано как, зная m для данной акватории, можно получить оценки спектрального состава света на разных глубинах и в первом приближении получить данные о концентрации хлорофилла фитопланктона, растворенного органического вещества (РОВ) и общей концентрации взвеси в водах открытого океана. Экспериментально полученные данные об m для трех океанов опубликованы в [7, 8]. Тем не менее нужно отметить, что не все районы Мирового океана освещены этими данными; количество данных об m значительно меньше, чем данных о Z_δ .

Между этими величинами имеется очевидная связь: ведь m характеризует глубину проникновения в воду солнечного излучения на длине волны $\lambda = 500$ нм ($m = 43,43K_{d500}$, где K_{d500} [9] — показатель ослабления излучения в вертикальном направлении на $\lambda = 500$ нм. С другой стороны, глубина видимости белого диска Z_δ тем больше, чем прозрачнее вода для солнечного излучения.

О зависимости глубины видимости белого диска от гидрооптических характеристик воды написано много (см., например, [10]). Не претендуя на всесторонний анализ этой зависимости, попытаемся найти общую связь между Z_δ и m , позволяющую с достаточной точностью находить m , когда известно Z_δ .

Наблюдаемый контраст K между яркостью погруженного в воду белого диска и фоном, отнесенной к яркости фона, можно оценить следующим образом:

$$K = \frac{E_0 \exp[-(K_d + \epsilon)z]}{E_0 \rho \pi^{-1}}, \quad (1)$$

где z — глубина погружения белого рассеивателя; K_d — показатель ослабления солнечного излучения в вертикальном направлении; ϵ — показатель ослабления видимой яркости диска малых угловых размеров; ρ — коэффициент яркости водной поверхности; E_0 — освещенность водной поверхности солнцем. $E_0 e^{-K_d z}$ есть освещенность диска при его погружении на глубину z ; экспонента $e^{-\epsilon z}$ учитывает ослабление видимой яркости диска малых угловых размеров при его наблюдении с нулевой глубины. Величина $E_0 \rho \pi^{-1}$, по определению, есть наблюдаемая яркость моря, т.е. фон. Контраст K определим как приращение яркости в направлении диска, создаваемое отражением от его поверхности солнечного излучения, отнесенное к фону. Все величины в (1) относятся к определенной длине волны излучения, т.е. носят спектральный характер.

Диск «исчезает» в поле зрения наблюдателя, когда видимый контраст уменьшается до предельно различимого человеческим глазом порогового значения K_{\min} ; это, по определению, происходит, когда глубина погружения белого диска равна Z_δ .

Подставив в (1) минимальный наблюдаемый контраст и, соответственно, в качестве z глубину видимости белого диска Z_δ , а также отнеся все характеристики к средней части спектра видимого излучения, т.е. приблизительно к $\lambda = 500$ нм, получим следующую полуэмпирическую зависимость:

$$K_{\min} = \pi e^{-(K_{d500} + \epsilon_{500})Z_\delta} / \rho_{500}. \quad (2)$$

Учитывая, что по грубой оценке $\epsilon_{500} = \xi K_{d500}$ [11], где ξ — статистически определяемый коэффициент, и, положив $K_{\min} = 0,02$ (т.е. 2%), $\rho \cong 0,02$ (мало изменчиво в разных водах при длине волны 500 нм), можем оценить Z_{δ} :

$$Z_{\delta} = \frac{-\ln(K_{\min} \rho_{500} / \pi)}{K_{d500} (1 + \xi)} = \frac{C}{m}. \quad (3)$$

Подставляя вышеуказанные средние значения K_{\min} и ρ_{500} и варьируя ξ , получим значения C , приведенные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1
Значения коэффициента C в (3)

ξ	C , м	Примечания
4,0	77	Экстремально чистые океанские воды
6,0	55	Типичные чистые океанские воды (зоны слабой антициклонической циркуляции)
7,0	49	Типичные океанские воды (зоны слабой циклонической циркуляции)

Из табл. 1 следует, что для типичных поверхностных вод открытого океана среднее значение коэффициента $C \cong 50$ м. Отсюда имеем формулу для практического использования

$$Z_{\delta} = 50/m. \quad (4)$$

Проведем проверку этой формулы на основе накопленных экспериментальных данных об m и Z_{δ} , полученных в Атлантике в различных экспедициях в разное время года и представленных в виде карт [1, 7, 8]. Для количественного анализа использовались также и карты динамической высоты D (в условных динамических метрах) на уровне 100 м, характеризующей циркуляцию в Атлантическом океане [1]. Ввиду громоздкости эти карты в статье не приводятся.

В работе [12] на основе анализа экспериментальных данных было показано, что распределение индекса типа поверхностных вод Атлантического океана m , характеризующего различную прозрачность вод, формируется под воздействием динамических факторов — океанических течений — и прежде всего связано с циркуляцией вод океана, которая характеризуется динамической высотой D . Естественно ожидать, что эти же факторы являются определяющими и при формировании распределения глубины видимости белого диска Z_{δ} . Действительно, сравнение распределений Z_{δ} и циркуляции поверхностных вод подтверждает это предположение. Как и в случае распределений m и D , севернее 40° с.ш. изолинии Z_{δ} на карте Атлантического океана вытянуты с юго-запада на северо-восток и совпадают с положением течения Гольфстрим и Северо-Атлантического течения, а у берегов Европы —

с Норвежским течением. В широтной зоне 40° с.ш. — 40° ю.ш. также наблюдаются характерные общие особенности в распределении полей m , D и Z_{δ} . Границы этой области окружены системой течений: Гольфстрим и Северо-Атлантическое на севере, Канарское, Гвинейское, Бенгальское у западных берегов Африки, Течение Западных Ветров вокруг Антарктиды, Бразильское, Гвианское, Карибское у восточных берегов Южной Америки.

Внутри этой огромной по площади замкнутой зоны прозрачных вод наблюдаются меньшие по размеру замкнутые области еще более прозрачных вод, которые образуются в центрах антициклонических круговоротов. Координаты центров этих областей в поле Z_{δ} практически совпадают с координатами центров аналогичных областей в поле индекса типа вод m , динамической высоты D . Следует подчеркнуть, что такое совпадение центров динамических характеристик и характеристик прозрачности в структуре их полей является признаком устойчивости этих образований.

Проверим количественную связь между двумя характеристиками прозрачности поверхностных вод Атлантического океана — индексом типа вод m и глубиной видимости белого диска Z_{δ} , используя распределение этих характеристик [1, 8]. Заметим, что это — два вида независимых экспериментальных данных и они получены не одновременно, поэтому при детальном сравнении не следует ожидать точного совпадения. Проведем анализ широтного хода m и Z_{δ} вдоль фиксированных меридиональных разрезов на акватории Атлантического океана, на которых наблюдались весь диапазон изменчивости этих величин и структурные особенности их распределения.

Были рассмотрены три меридиональных разреза в поле m и Z_{δ} . Разрез I расположен в центральной части Атлантического океана ($l = 32,5^{\circ}$ з.д.). Западный разрез II ($l = 67,5^{\circ}$ з.д.) проходит через Саргасово море. Восточный разрез III ($l = 20^{\circ}$ з.д.) пересекает воды вблизи Канарского апвеллинга. Изменчивость величин m для разрезов I—III дана в табл. 2—4 и на рис. 1. Там же приведен широтный ход оптического индекса типа вод m , который был рассчитан с помощью формулы (4) по экспериментальным данным о Z_{δ} вдоль разрезов:

$$\tilde{m} = 50/Z_{\delta}. \quad (5)$$

На рис. 1,а видно, что наиболее мутные воды с $4,1 \leq m < 5,8$ наблюдаются в районе течения Ирмингера ($58-60^{\circ}$ с.ш.). Далее разрез I пересекает полосу вод с индексом типа вод $2 \leq m < 4,1$, сформированную течениями Гольфстрим и Лабрадорским. В широтном поясе $35-50^{\circ}$ с.ш. разрез I пересекает полосу вод с $2,1 \leq m < 2,9$, которая формируется под влиянием Северо-Атлантического течения. Обширная полоса прозрачных вод в широтной зоне $34-0^{\circ}$ с.ш. с $1,5 \leq m < 2,1$ находится под влиянием Северо-Атлантического течения и Северо-Пассатного. Южнее в широтной зоне $0-25^{\circ}$ ю.ш. разрез I пересекает замкнутую область очень прозрачных вод, образо-

ванную антициклонической циркуляцией, в центре которой m достигает значений в диапазоне 1,1–1,3.

Таблица 2

Широтный ход различных характеристик поверхностных вод Атлантического океана вдоль меридиана $l = 32,5^\circ$ з.д. (разрез I): индекса типа вод m [8], глубины видимости белого диска Z_δ (м) [1], индекса типа вод \tilde{m} , рассчитанного по данным наблюдений Z_δ [1] по формуле (5), глубины видимости белого диска \tilde{Z}_δ (м), рассчитанной по данным об m [8] по формуле (4)

φ°	m	Z_δ	\tilde{m}	\tilde{Z}_δ
65° с.ш.	4,1–5,3	15	3,3	12
60	2,9–4,1	15	3,3	15
55	2,9–4,1	15	3,3	15
50	2,1–2,9	20	2,5	20
45	2,1–2,9	15	3,1	17
40	2,1–2,9	22	2,2	23
35	1,5–2,1	27,5	1,8	28
30	1,5–2,1	30	1,7	29
25	1,5–2,1	30	1,7	29
20	1,5–2,1	30	1,7	29
15	1,5–2,1	28	1,9	26
10	1,5–2,1	25	2,0	25
5	1,5–2,1	25	2,0	25
0	1,5–2,1	25	2,0	25
5° ю.ш.	1,3–1,5	30	1,7	33
10	1,1–1,3	35	1,4	38
15	1,1–1,3	35	1,4	38
20	1,3–1,5	35	1,4	36
25	1,5–2,1	30	1,7	29
30	1,5–2,1	30	1,7	29
35	1,5–2,1	28	1,9	26
40	1,5–2,1	25	2,0	25

Таблица 3

Широтный ход различных характеристик поверхностных вод Атлантического океана вдоль меридиана $l = 67,5^\circ$ з.д. (разрез II): индекса типа вод m [8], глубины видимости белого диска Z_δ (м) [1], индекса типа вод \tilde{m} , рассчитанного по данным наблюдений Z_δ [1] по формуле (5), глубины видимости белого диска \tilde{Z}_δ (м), рассчитанной по данным об m [8] по формуле (4)

φ°	m	Z_δ	\tilde{m}	\tilde{Z}_δ
42° с.ш.	2,1–2,9	15	3,3	17
40,5	2,1–2,9	15	3,3	1,7
40	2,1–2,9	16	3,1	1,7
39	2,1–2,9	20	2,5	20
38	1,5–2,1	25	2,0	25
37,5	1,5–2,1	27,5	1,8	28
37	1,5–2,1	27,5	1,8	28
35	1,3–1,5	32,5	1,5	33
34	1,3–1,5	33,5	1,5	33
32	1,3–1,5	40	1,2	38
30	1,3–1,2	40	1,2	38
28	1,1–1,3	40	1,2	42
25	1,1–1,3	40	1,2	42
23	1,3–1,5	35	1,4	36
20	1,3–1,5	32,5	1,5	33
18	1,5–2,1	32,5	1,5	33
15	1,5–2,1	25	2,0	25
13	2,1–2,9	20	2,5	2

Таблица 4

Широтный ход различных характеристик поверхностных вод Атлантического океана вдоль меридиана $l = 20^\circ$ з.д. (разрез III): индекса типа вод m [8], глубины видимости белого диска Z_δ (м) [1], индекса типа вод \tilde{m} , рассчитанного по данным наблюдений Z_δ [1] по формуле (5), глубины видимости белого диска \tilde{Z}_δ (м), рассчитанной по данным об m [8] по формуле (4)

φ°	m	Z_δ	\tilde{m}	\tilde{Z}_δ
55° с.ш.	2,9–4,1	20	2,5	17
50	2,9–4,1	15	3,3	15
45	2,9–4,1	20	2,5	17
40	2,1–2,9	25	2,0	24
35	1,5–2,1	25	2,0	25
30	1,5–2,1	25	2,0	25
25	2,1–2,9	25	2,0	24
22	2,9–4,1	20	2,5	17
20,5	2,9–4,1	15	3,3	12
19	2,9–4,1	15	3,3	15
15	2,1–2,9	15	3,3	15
10	2,1–2,9	20	2,5	20
7,5	1,5–2,1	25	2,0	25
0	2,1–2,9	30	1,7	24
10° ю.ш.	1,5–2,1	25	2,0	25
17	1,5–2,1	30	1,7	29
21	1,5–2,1	25	2,0	25
22	1,5–2,1	20	2,5	24
25	1,5–2,1	25	2,0	25
38	1,5–2,1	25	2,0	25
42	1,5–2,1	20	2,5	24

Еще южнее на разрезе I наблюдается область прозрачных вод с индексом $1,5 \leq m < 2,1$, которая на 40° ю.ш. ограничивается Течением Западных Ветров. Аналогичный анализ широтного хода величины m , полученной по данным о глубине видимости белого диска Z_δ на тех же разрезах, показал идентичную картину (рис. 1,а). То есть наблюдается полное согласование как с перечисленными выше динамическими ситуациями в поле течений, так и с широтным ходом m . Из табл. 2–4 и рис. 1 видно, что значения оптического индекса вод – экспериментальные m и рассчитанные \tilde{m} – практически совпадают. Это свидетельствует о том, что зависимость (4) подтверждается экспериментальными данными. Была обнаружена еще одна закономерность. В работе [12] было показано, что на всех широтных разрезах наблюдается антикорреляция величин m и D . А это означает, что такая же антикорреляция существует и между величинами m и D , а широтный ход глубины видимости белого диска Z_δ хорошо коррелирует с широтным ходом циркуляции (динамической высотой D в условных динамических метрах на уровне 100 м). Это видно на рис. 2,а, построенного по данным [1] для разрезов I–III.

Рассмотрим широтный ход величин на меридиональном разрезе II в Саргассовом море (см. табл. 3, рис. 1,б). В данном случае разрез пересекает замкнутую область прозрачных вод, которая формируется антициклональной циркуляцией под влиянием течений Гольфстрим, Антильского и Карибского. Несмотря на то что на этом разрезе

изменчивость величин m , Z_δ и D невелика, имеется полное согласование широтного хода этих величин, как и на разрезе I.

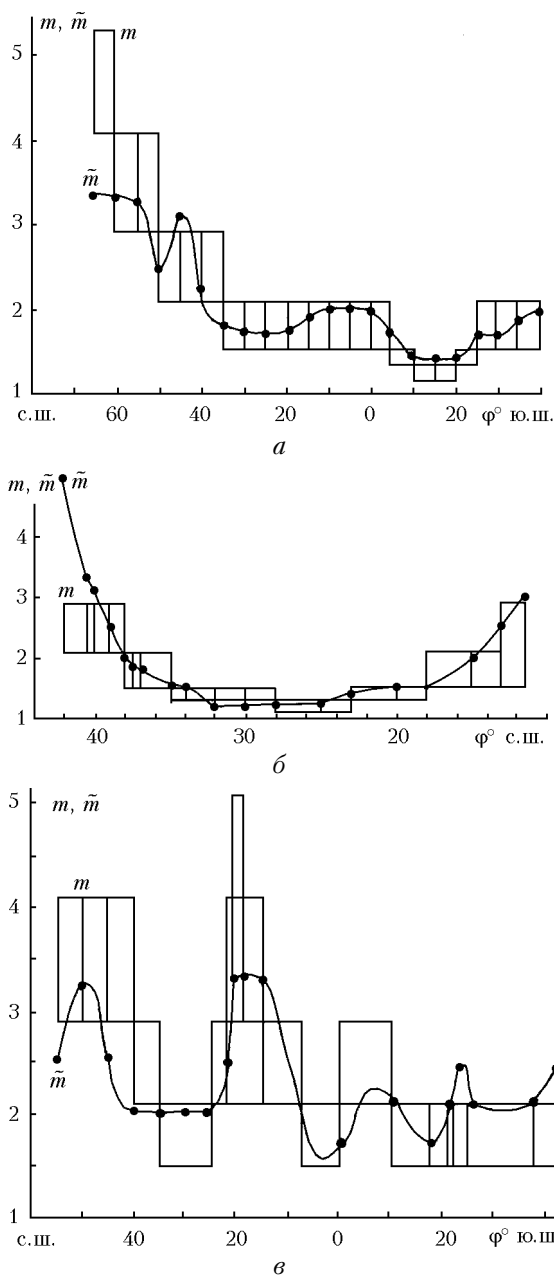


Рис. 1. Широтный ход индекса типа вод m в Атлантическом океане по экспериментальным данным [8] и индекса типа вод \tilde{m} , рассчитанного по данным наблюдений глубины видимости белого диска Z_δ (м) по формуле (5), вдоль меридиональных разрезов I–III: а – разрез I ($l = 32,5^\circ$ з.д.); б – разрез II ($l = 67,5^\circ$ з.д.); в – разрез III ($l = 20^\circ$ з.д.)

На разрезе III, пересекающем зону Канарского апвеллинга, чередуются воды различной прозрачности в поле m , Z_δ и D (см. табл. 4, рис. 1, в). В широтной зоне $60\text{--}40^\circ$ с.ш. отмечается влияние Северо-Атлантического течения. В широтном ходе исследуемых величин четко выражен Канарский апвеллинг

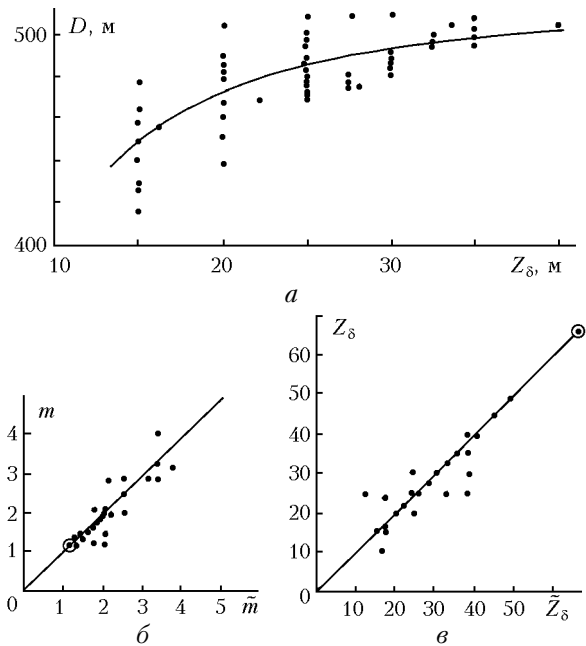


Рис. 2. Регрессионные зависимости: а – $D(Z_\delta)$; б – $m(\tilde{m})$; в – $Z_\delta(\tilde{Z}_\delta)$; кружком с точкой обозначено измерение в экстремально чистых водах Тихого океана вблизи о-вов Кука

($23\text{--}8^\circ$ с.ш.), а к северу и югу от него расположены зоны более прозрачных вод. В районе $0\text{--}10^\circ$ ю.ш. расположены менее прозрачные воды, а южнее 10° ю.ш. вплоть до 40° ю.ш. на разрезе наблюдается обширная зона типичных чистых океанских вод. Такая сложная структура полей m , Z_δ и D на разрезе III не повлияла на основной результат: широтный ход величин m , Z_δ и D согласуется между собой и в нем отражены все динамические факторы, формирующие его. Таким образом, установлены взаимосвязь различных характеристик прозрачности поверхностных вод океана и их связь с циркуляцией поверхностных вод.

Проверим согласование формулы (4) по второму варианту. По известным экспериментальным данным об m [8] определим глубину видимости белого диска \tilde{Z}_δ по формуле (4) и сравним эти величины с экспериментальными независимыми данными о Z_δ [1]. На рис. 2, а, б показаны регрессионные зависимости $m(\tilde{m})$ и $Z_\delta(\tilde{Z}_\delta)$, где величины \tilde{m} и \tilde{Z}_δ получены описанными выше способами по данным об m и Z_δ для разрезов I–III. Вследствие закономерностей, полученных выше, коэффициенты взаимной корреляции сравниваемых величин оказались высокими: $r_{m\tilde{m}} = 0,9$, $r_{Z_\delta\tilde{Z}_\delta} = 0,8$.

Таким образом, приведенный выше анализ экспериментальных данных показал тесную взаимосвязь величин m и Z_δ . Эта зависимость хорошо описывается формулой (4) в пределах рассмотренной изменчивости величин. В 5-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» в 1971 г. были проведены одновременные измерения величин K_{d500} (а значит m) и Z_δ на полигоне, где наблюдалась экстремаль-

ная прозрачность вод (вблизи о-вов Кука). При $m = 1,15$ белый диск был виден на глубине 66 м (рис. 3). Таких больших значений Z_δ в практике гидрооптических измерений больше не встречалось. На рис. 3 в области значений $Z_\delta = 40\text{--}70$ м пунктиром показана интерполяция между значением $Z_\delta = 40$ м, полученным по формуле (4), и этой экспериментальной точкой с максимальным значением $Z_\delta = 66$ м. Рис. 3 можно использовать при интерпретации дистанционных измерений m с целью определения Z_δ либо, наоборот, по Z_δ оценивать m .

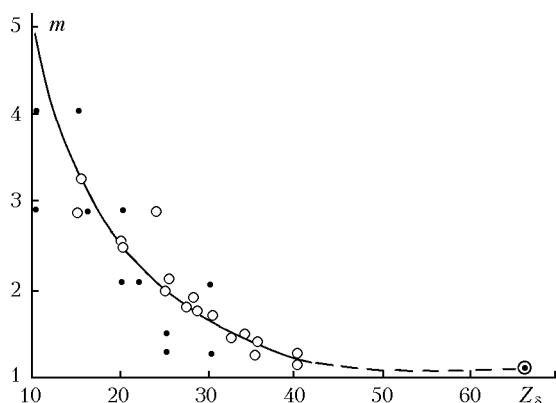


Рис. 3. Зависимость индекса типа вод m [8] от глубины видимости белого диска Z_δ [1] по экспериментальным данным: \circ — измерения; \bullet — многократно совпадающие измерения; \odot — измерение в экстремально чистых водах Тихого океана вблизи о-вов Кука; — расчет по формуле (5); --- данные интерполяции

Итак, проанализировав экспериментальные данные, мы получили следующие результаты.

1. Найдена полуэмпирическая зависимость между глубиной видимости белого диска Z_δ и оптическим индексом типа вод m для акватории Атлантического океана; эта зависимость может быть использована в практических целях.

2. Показано, что распределение (поля) Z_δ и m формируется под воздействием океанических течений, прежде всего зон антициклонической либо циклонической циркуляции, повторяя структурные особенности последних. Значение Z_δ устойчиво

коррелирует (а m антикоррелирует) с главной характеристикой циркуляции поверхностных вод — динамической высотой D (м) на уровне 100 м.

3. Указано на возможность по дистанционным измерениям, в том числе со спутников, не только судить о чистоте вод той или иной акватории, но и узнавать расположение зон конвергенции и дивергенции, апвеллинга и даунвеллинга в тех или иных районах океана.

1. *Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны.* Министерство обороны СССР. Военно-Морской флот. 1977. 306 с.
2. *Атлас океанов. Тихий океан.* Министерство обороны СССР. Военно-Морской флот. 1974. 302 с.
3. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. О классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного света // *Океанология.* 1977. Т. XVII. № 1. С. 50–54.
4. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана / А.С. Монин, В.П. Красицкий. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
5. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру восходящего солнечного излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9. № 12. С. 1745–1751.
6. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.
7. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении фотосинтетически активной солнечной радиации в водах Тихого океана // *Океанология.* 1978. Т. XVIII. № 4. С. 619–625.
8. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Цвет океана и оптическая классификация вод // *Оптика моря и атмосферы* / Под ред. К.С. Шифрина. Л.: Изд-во ГОИ, 1988. С. 304–305.
9. Шифрин К.С. Оптика океана // *Океанология.* М.: Наука, 1978. С. 366–367.
10. *Оптика океана* / Под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1983. Т. 2. 236 с.
11. *Гидрооптические и гидрофизические исследования в Индийском океане* / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1974. 327 с.
12. Пелевин В.Н., Копрова Л.И. О связи между циркуляцией поверхностных вод Атлантики и их оптическими характеристиками // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 8. С. 666–670.

V.N. Pelevin, L.I. Koprova. On interdependence between the visibility depth of white disk, optical index of water type, and water circulation in the Atlantic Ocean.

An analysis of experimental data on the visibility depth of white disk Z_δ and optical water type index m for surface water for the Atlantic ocean was carried out. Comparison of Z_δ and m maps for the Atlantic ocean with those for the dynamic depth D at a level of 100 meters makes it obvious that big value of Z_δ and small m occur under the anticyclonic circulation. Dirty water are being observed under the cyclonic circulation, that is associated with ascending of water from lower layers. The empirical formula $Z_\delta = Z_\delta(m)$ derived allows one to estimate Z_δ from the value of m as distantly measured in the visible spectral range from ship, airplane or satellite.