

УДК 551.463.5

## ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД И ИХ КОРРЕЛЯЦИИ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТЬЮ

© 2017 г. В. И. Маньковский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: emankovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2015 г., после доработки 13.07.2016 г.

Приведены результаты исследования связи с относительной прозрачностью воды ее цветовых характеристик: цвета, определяемого визуально по шкале цветности, доминирующей длины волны в спектре излучения моря, чистоты цвета.

DOI: 10.7868/S003015741705001X

### ВВЕДЕНИЕ

Относительной прозрачностью воды называется предельная глубина видимости белого стандартного диска [2]; обозначается  $Z_6$ . Это наиболее легко определяемая гидрооптическая характеристика.

В ряде работ установлено, что отдельные гидрооптические характеристики, измеренные с помощью специальной аппаратуры, тесно коррелируют с  $Z_6$ , а эмпирические связи между ними выражаются простыми зависимостями [4, 5]. Используя эти связи, можно по измерениям  $Z_6$  определять такие характеристики в том или ином районе океана, где по ним нет данных, полученных прямыми измерениями.

В настоящей работе рассматриваются корреляции с относительной прозрачностью цветовых характеристик воды: цвета, определяемого визуально, доминирующей длины волны в спектре яркости моря, чистоты цвета.

### ЦВЕТ ВОДЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ВИЗУАЛЬНО

Цвет воды, наряду с относительной прозрачностью, является широко используемой океанологической характеристикой. Определяется он визуально с использованием шкалы цветности, представляющей собой набор пробирок (21 пробирка) с цветными жидкостями [7]. Оценивается цвет в баллах по номеру пробирки, например: номер 1 – синий цвет воды, номер 21 – коричневый.

Цвет воды связан с ее прозрачностью – он насыщенно синий в высокопрозрачных водах, зеленый в мутных и коричневый в очень мутных водах.

В работе [10] приведена формула связи цвета воды  $N_{цв}$ , выраженного в баллах стандартной шкалы цветности, с глубиной видимости белого диска  $Z_6$  в метрах. В диапазоне  $Z_6 = 5–40$  м связь описывается формулой

$$\ln N_{цв} = 3.69 - 0.75 \ln Z_6. \quad (1)$$

Формула (1) в [10] получена косвенным путем – пересчетом через формулы связи индекса цвета воды  $I_{цв}$  с величинами  $N_{цв}$  и  $Z_6$ , взятыми из работы [9].

В настоящей работе связь  $N_{цв} = f(Z_6)$  исследовалась по прямым измерениям. На рис. 1 показан график  $N_{цв} = f(Z_6)$  по измерениям в Атлантическом океане, Средиземном и Черном морях. Формула связи

$$N_{цв} = 15.0 - 3.73 \ln Z_6. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции  $R = 0.94(+/-0.001)$ , ошибка определения цвета  $S(N_{цв}) = 0.6$  балла, количество наблюдений  $n = 440$ .

Связь  $N_{цв} = f(Z_6)$ , представленная на рис. 1, характеризуется большим разбросом точек относительно линии регрессии. Объясняется это рядом факторов, влияющих на определение  $N_{цв}$  и  $Z_6$ : высота солнца, его положение относительно наблюдателя, состояние облачности, волнение. Хотя условия наблюдения цвета воды стандартизированы, однако в экспериментах они не всегда соблюдаются.

На определение  $N_{цв}$  и  $Z_6$  влияют также индивидуальные свойства глаза наблюдателя: цветовая чувствительность и порог контрастной чувствительности.

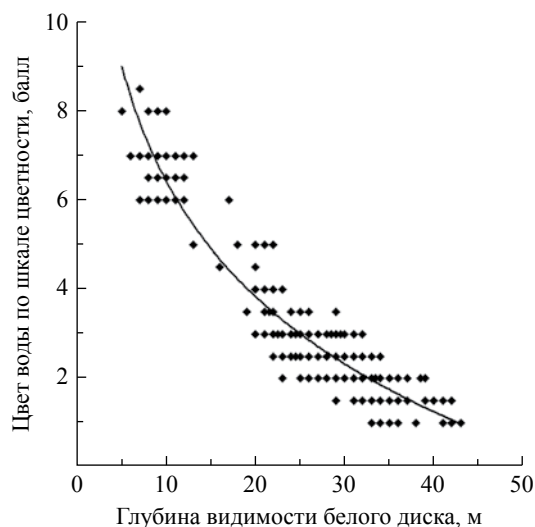


Рис. 1. Связь цвета воды  $N_{\text{цв}}$  с глубиной видимости белого диска  $Z_{\text{б}}$ .

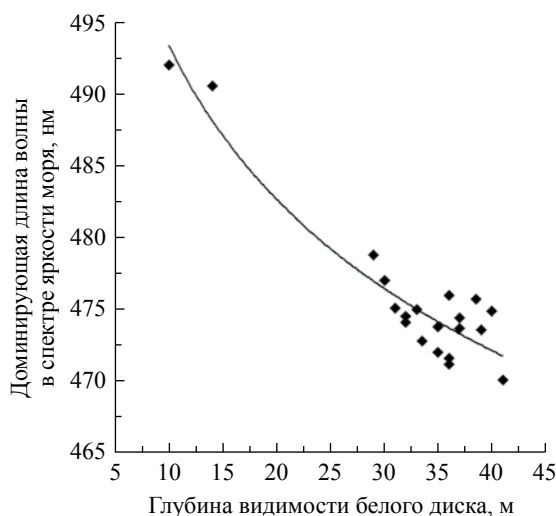


Рис. 2. Связь доминирующей длины волны  $\lambda_d$  с глубиной видимости белого диска  $Z_{\text{б}}$ .

Таблица 1. Величина  $N_{\text{цв}}$  в баллах шкалы цветности, рассчитанная по разным формулам

$Z_{\text{б}}$ , м	1	5	10	20	30	40
Формула (1)	40	12.0	7.1	4.2	3.1	2.5
Формула (2)	15	9.0	6.4	3.8	2.3	1.2

В табл. 1 приведено сравнение величин  $N_{\text{цв}}$ , определяемых по формулам (1) и (2).

Величина  $N_{\text{цв}}$ , определенная по формуле (1), во всех случаях выше в сравнении с формулой (2), особенно при низкой прозрачности воды. Так, при  $Z_{\text{б}} = 1$  м расчет по формуле (2) дает  $N_{\text{цв}} = 15$  баллов, а по формуле (1)  $N_{\text{цв}} = 40$  баллов, в то время как в шкале цветности [7] максимальная оценка цвета мутных вод составляет 21 балл.

### ДОМИНИРУЮЩАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ В СПЕКТРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МОРЯ

Оценка цвета воды визуальным методом при помощи эталонных цветных растворов не дает точного представления о собственной окраске моря. Для объективной оценки цвета воды в гидрооптике используется колориметрическая система  $X, Y, Z$  [10]. В этой системе цвет воды характеризуется доминирующей длиной волны  $\lambda_d$  в спектре излучения моря. Величина  $\lambda_d$  равна длине волны монохроматического излучения (его называют доминирующим), которое надо смешать в определенной пропорции с белым излучением, чтобы получить видимый цвет моря.

В настоящей работе для определения спектрального распределения яркости излучения моря  $\rho(\lambda)_m$  использовался телефотометр [1]. Его технические характеристики: спектральный диапазон 390–720 нм, спектральное разрешение 5 нм, ошибка изимперения в одном спектральном канале 3%, время измерения спектра яркости моря 3 мин. В экспериментах производилось многократное (три и более раз) измерение спектра моря и для вычислений использовался средний спектр.

Телефотометром измерялся спектр излучения поверхности моря  $\rho(\lambda)_{\text{пм}}$ , из которого вычитался спектр отраженного водой излучения неба  $\rho(\lambda)_{\text{отр}}$ :  $\rho(\lambda)_m = \rho(\lambda)_{\text{пм}} - \rho(\lambda)_{\text{отр}}$ . Район измерений – тропическая Атлантика. Диапазон изменения величин  $Z_{\text{б}}$  при измерениях составил 10–41 метр. На рис. 2 показан график  $\lambda_d = f(Z_{\text{б}})$ . Формула связи

$$\ln \lambda_d = 6.27 - 0.032 \ln Z_{\text{б}}. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции  $R = 0.947(+/-0.02)$ , ошибка определения доминирующей длины волны  $S(\lambda_d) = 1.8$  нм, количество измерений  $n = 20$ .

Таблица 2. Значения  $\lambda_d$  при разных  $Z_{\text{б}}$  по литературным данным и рассчитанные по формуле (3)

Литература	$Z_{\text{б}}$ , м	$\lambda_d$ , нм	$\lambda_d$ , нм форм. (3)
[6]	5	505	505
[6]	10	494	494
[6]	16	485	486
[8]	10	493	494
[8]	25	477	479
[8]	40	473	472

Было выполнено сопоставление величин  $\lambda_d$ , рассчитанных по формуле (3), с литературными данными о величинах  $\lambda_d = f(Z_6)$  в других водных районах. Такие данные имеются в работах [6; 8].

В работе [6] приведена формула связи  $\lambda_d = f(Z_6)$ , полученная по измерениям в водах Черного моря ( $Z_6 = 5-16$  м). Коэффициенты в этой формуле практически такие же, как в формуле (3)

$$\ln \lambda_d = 6.27 - 0.03 \ln Z_6. \quad (4)$$

Коэффициент корреляции  $R = 0.99(+/-0.002)$ .

В работе [8] приведен график связи  $\lambda_d = f(Z_6)$  по данным измерений в различных океанских и морских водах (коэффициент корреляции  $R = 0.89$ ). Величины  $\lambda_d$  при разных  $Z_6$ , определенные по графику из работы [8], приведены в табл. 2.

Значения  $\lambda_d$ , рассчитанные по формуле (3), хорошо согласуются с литературными данными. С учетом результатов сопоставления при оценке  $\lambda_d$  в различных водах для величин  $Z_6$  в диапазоне 5–41 м рекомендуется использовать формулу (3).

### ЧИСТОТА ЦВЕТА ВОДЫ

Чистота цвета воды  $P$  представляет собой пропорцию (в процентах), в которой необходимо смешать монохроматическое излучение, именуемое в колориметрической системе  $X, Y, Z$  как доминирующая длина волны, с белым излучением, чтобы получить видимый цвет моря.

Чистота цвета воды связана с ее прозрачностью – высокопрозрачные воды характеризуются высокими величинами чистоты цвета, в мутных водах чистота цвета низкая.

На рис. 3 показана связь чистоты цвета воды с относительной прозрачностью  $P = f(Z_6)$  по измерениям спектров яркости вод в тропической Атлантике ( $Z_6 = 10-41$  м) и по [6] в Черном море ( $Z_6 = 3-16$  м). Связь выражается формулой

$$\ln P = 1.34 + 0.82 \ln Z_6. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции  $R = 0.985 (+/-0.005)$ , ошибка определения чистоты цвета  $S(P) = 3.6\%$ , количество наблюдений  $n = 28$ .

Как видно из рис. 3, чистота цвета воды изменяется в широком диапазоне:  $P = 10\%$  при  $Z_6 = 3$  м,  $P = 80\%$  при  $Z_6 = 41$  м.

По формулам (3) и (5) рассчитана связь чистоты цвета с доминирующей длиной волны. Уравнение связи

$$\ln P = 1.34 - 25.63 \ln(\lambda_d/531). \quad (6)$$

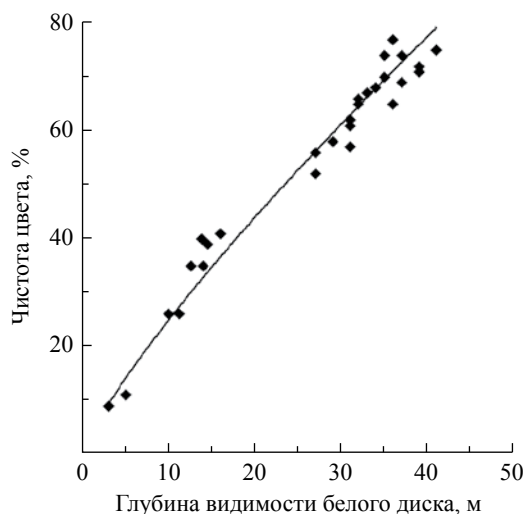


Рис. 3. Связь чистоты цвета  $P_{цв}$  с глубиной видимости белого диска  $Z_6$ .

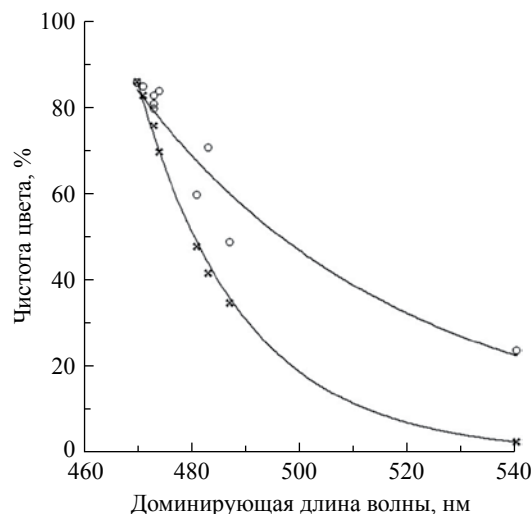


Рис. 4. Связь чистоты цвета  $P_{цв}$  с доминирующей длиной волны  $\lambda_d$ : по формуле (6) – крестики, по подводным измерениям спектра восходящего излучения – кружочки

В работе [3] приведены данные о доминирующей длине волны и чистоте цвета в разных водах, полученные по измерениям спектров восходящей облученности на глубинах 0–2 м. Сопоставление чистоты цвета, рассчитанной по формуле (6), с данными о  $\lambda_d$  и  $P$  в [3] показывает, что чистота цвета по [3] при той же  $\lambda_d$  выше. На рис. 4 приведены графики  $P = f(\lambda_d)$ , построенные по формуле (6) и по данным [3]. Чистота цвета в [3] близка к рассчитанной по формуле (6) только в случае высокопрозрачной воды с величиной  $\lambda_d = 470$  нм ( $Z_6 = 39$  м). Во всех остальных случаях величина  $P$  в [3] больше, и разница с формулой (6) тем больше, чем больше  $\lambda_d$ , то есть чем мутнее вода.

Такое расхождение объясняется разным методом определения цвета моря. В настоящей работе характеристики  $\lambda_d$  и  $P$  определялись по измерениям над водой (спектр яркости моря). В [3] характеристики цвета определялись по спектру восходящего излучения, измеренного под водой. Спектр восходящего из толщи вод излучения, измеренный под водой, отличается от спектра яркости моря. Подводный спектр превратится в надводный после прохождения приповерхностного слоя воды, в котором его характеристики изменятся вследствие поглощения и рассеяния излучения в этом слое.

### ВЫВОДЫ

1. По данным наблюдений в океанских и морских водах установлены эмпирические связи цвета воды  $N_{\text{цв}}$ , доминирующей длины волны в спектре излучения моря  $\lambda_d$  и чистоты цвета  $P$  с относительной прозрачностью воды  $Z_b$ .

2. Характеристики цвета воды, рассчитанные по измерениям спектральной яркости восходящего излучения под водой, отличаются от таковых по измерениям спектральной яркости излучения моря — чистота цвета, при одинаковой доминирующей длине волны, по измерениям под водой выше.

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по теме 0827-2014-0010.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афонин Е.И., Ли М.Е.* Телефотометр для измерения яркости природных объектов в видимом диапазоне спектра // Труды 5-й Всесоюзной конференции “Фотометрия и ее

метрологическое обеспечение”. М.: ВНИИОФИ, 1984. С. 115–120.

2. Гидрооптические характеристики. Термины и определения. ГОСТ 19210–73. М.: Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1974. 10 с.
3. *Иванов А.* Цвет моря // Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. Табл. 16.3, 16.3а.
4. *Маньковский В.И.* Связь глубины видимости белого диска с биооптическими характеристиками вод Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 1999. № 5. С. 78–80.
5. *Маньковский В.И.* Связь показателя вертикального ослабления дневного света с глубиной видимости белого диска // Океанология. 2014. Т 54. № 1. С. 38–43.
6. *Маньковский В.И., Толкаченко Г.А., Шибанов Е.Б. и др.* Оптические характеристики прибрежных вод и атмосферы в районе Южного берега Крыма в конце летнего сезона 2008 года // Морск. гидрофиз. журн. 2010. № 3. С. 52–74.
7. Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С.299–303.
8. Связь параметров светового поля с характеристиками морской воды // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / Ред. Урденко В.А., Циммерман Г. Берлин: Институт космических исследований, 1985. С. 223–235.
9. *Шемшура В.Е., Федирко В.И.* О соотношениях между некоторыми гидрооптическими параметрами // Океанология. 1981. Т 21. № 1. С. 51–54.
10. *Шифрин К.С.* Глубина видимости белого диска и цвет моря // Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 23–30.

## Color Characteristics of Waters and Their Correlation With Secchi Depth

V. I. Mankovsky

The results of investigation of connection between water color by scale Forel, dominant length of wave in spectrum of sea radiate and clear of color with Secchi Depth are presented.