

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.463.5

Определение по индикатрисам рассеяния света размеров частиц взвешенного органического вещества и исследование их связи с трофностью вод

В.И. Маньковский, Е.В. Маньковская*

Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

По результатам измерений рассеяния света рассчитаны размеры органических частиц взвешенного в воде вещества. Установлена их связь с размерами клеток фитопланктона, определенными биологическим методом в пробах воды. Исследована связь размеров органических частиц взвешенного вещества с трофностью вод. Получено, что средние размеры органических частиц возрастают при понижении трофности вод. С учетом связи средних размеров органических частиц взвешенного в воде вещества со средними размерами клеток фитопланктона сделан вывод об увеличении размеров клеток в водах низкой трофности.

Ключевые слова: взвешенное вещество, органические частицы, клетки фитопланктона, белый диск, хлорофилл, трофность вод, биогенные вещества; suspended matter, organic particles, phytoplankton cell, Secchi disk, chlorophyll, water trophic state, biogenic matter.

Введение

Во всех природных водах имеются взвешенные частицы различного происхождения. Взвешенное вещество играет важную роль в биологических, физических и геохимических процессах, протекающих в водной среде. Исследование концентрации и состава взвешенного вещества в природных водах — актуальная задача океанологии.

Содержащиеся в природных водах частицы взвешенного вещества можно разделить на две фракции — минеральную и органическую. Минеральная фракция представлена частицами терригенного происхождения. Органическая состоит из живых клеток фитопланктона и детрита — мертвых клеток фитопланктона и фрагментов скелетов зоопланктона. По размеру эти фракции делятся на мелкие и крупные частицы. Мелкую фракцию взвешенного вещества (радиус частиц $r < 1$ мкм) составляют минеральные частицы, крупную ($r > 1$ мкм) — органические [1].

При исследовании взвешенного в воде вещества интерес представляют размеры содержащихся в ней органических частиц. Такие данные необходимы при построении гидрооптических моделей. В биологии это обусловлено тем, что органическое взвешенное вещество состоит в основном из клеток фитопланктона.

* Виктор Иванович Маньковский (mankovskiy@mhi-gas.ru); Екатерина Викторовна Маньковская (emankovskaya@mhi-gas.ru).

Частицы океанской взвеси имеют сложную форму. Для описания рассеяния света на них используют модель эквивалентных сфер, т.е. частицы считаются однородными сферами. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что такое приближение приемлемо и дает в большинстве случаев хорошие результаты. Рассеяние света на частицах взвеси сильно зависит от их размеров (радиусов). Существует метод, позволяющий по показателям рассеяния света $\sigma(\theta)$ определить средний радиус содержащихся в воде органических частиц [2]. Он использовался в [3, 4] при исследованиях в Средиземном море и Атлантическом океане. Было установлено, что размеры органических частиц взвешенного вещества изменяются в зависимости от океанографических условий, однако не исследовались факторы, с которыми это связано.

Цель работы — определение по рассеянию света размеров органических частиц взвешенного вещества в природных водах, а также исследование связи размеров таких частиц с размерами находящихся в воде клеток фитопланктона и их изменчивости в зависимости от трофности вод.

Материалы и методы

В работе использованы натурные данные, полученные во время 47-го рейса НИС «Михаил Ломоносов» (июль — сентябрь 1986 г.) в Атлантическом океане на крупномасштабном полигоне с границами: 1° ю.ш. — 12° с.ш., 16–32,5° з.д. Исследовались индикатрисы рассеяния света и глубина видимости белого диска (относительная прозрачность).

Индикатрисы рассеяния света измерялись нефелометром [5] в пробах воды с глубины 3 м. В таблице приведены технические характеристики прибора.

Технические характеристики нефелометра	
Характеристика	Значение
Угол измерений $\sigma(\theta)$, град.	2; 7,5...(5)...162,5
Спектральная область измерений, нм	520(± 0)
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$, %	10

Минимальный угол, на котором в нефелометре определяется $\sigma(\theta)$, составляет 2° . Необходимые для расчетов радиуса частиц взвешенного вещества показатели рассеяния света на углах $\theta < 2^\circ$ находились путем экстраполяции измеренной индикатрисы в эту область по формуле $\lg\sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для нахождения коэффициентов A, B, C использовались измеренные показатели рассеяния $\sigma(\theta)$ на углах $\theta = 2^\circ; 7,5^\circ; 12,5^\circ$.

Глубина видимости белого диска определялась по стандартной методике [6].

Средний радиус содержащихся в воде взвешенных органических частиц рассчитывался по значениям $\sigma(\theta)$ в направлениях $\theta = 0,5$ и $2,0^\circ$. Формула расчета [2]:

$$r_{\text{орг}} = 10^k, \quad k = 1,16 - 0,57 \left[1,68 - \lg \frac{\sigma(0,5)}{\sigma(2,0)} \right]^{0,5} \quad (1)$$

В ходе экспедиции на полигоне в Атлантическом океане также выполнялись и биологические исследования. В пробах воды с помощью микроскопа визуально определялось число клеток фитопланктона и их размеры, далее рассчитывался суммарный и средний объем клеток [7]. Средний радиус клеток фитопланктона $r_{\text{фит}}$ в предположении их шаровидной формы находился из соотношения $V = 4/3\pi r^3$, где V – объем клетки. В ряде проб одновременно измерялись индикатрисы рассеяния света, по которым рассчитывался средний радиус органических частиц взвешенного вещества $r_{\text{орг}}$.

Результаты исследований и их обсуждение

Связь размеров органических частиц взвешенного вещества с размерами клеток фитопланктона

Сопоставлены пробы воды, в которых одновременно определялись $r_{\text{орг}}$ (по оптическим измерениям) и $r_{\text{фит}}$ (по биологическим измерениям). Результаты сравнения представлены на рис. 1. Коэффициент корреляции $R = 0,79$, уравнение связи:

$$r_{\text{фит}} \text{ (мкм)} = 2,03r_{\text{орг}} - 4,1. \quad (2)$$

Линия регрессии показывает, что радиусы, равные ~ 4 мкм, рассчитанные по оптическим измере-

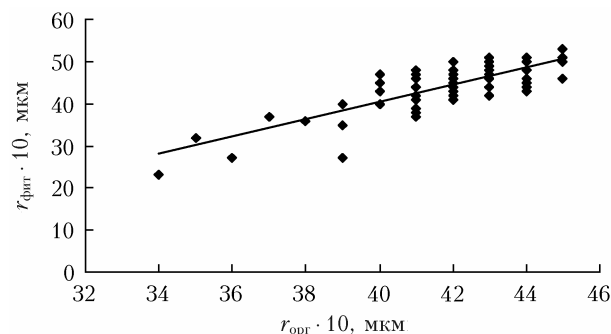


Рис. 1. Связь средних размеров органических частиц взвешенного вещества, рассчитанных по измерениям индикатрисы рассеяния света, со средними размерами клеток фитопланктона, определенных по наблюдениям под микроскопом

ниям по формуле (1), близки к радиусам, полученным по биологическим измерениям. При радиусах частиц больше и меньше 4 мкм наблюдается расхождение: максимальные $r_{\text{фит}}$ по сравнению с $r_{\text{орг}}$ меньше на 12%, а минимальные – больше на 15%.

Разницу в размерах частиц можно объяснить двумя причинами. Во-первых, ошибками определения размеров частиц, присущими оптическому и биологическому методам. Во-вторых, тем, что биологическим методом определяется средний размер живых клеток фитопланктона, а оптическим – средний размер всех содержащихся в воде органических частиц (живых клеток и детрита).

В целом же, как показывает сравнение, различия между $r_{\text{орг}}$ и $r_{\text{фит}}$ невелики и вариации $r_{\text{орг}}$ можно рассматривать как соответствующие вариации $r_{\text{фит}}$.

Связь размеров органических частиц взвешенного вещества с трофностью вод

Трофность (продуктивность) вод оценивают по концентрации в них хлорофилла a – основного пигмента, содержащегося в клетках фитопланктона (создателя первичной продукции). Согласно [8] высокая концентрация хлорофилла a – показатель биопроductивности акватории.

По уровню продуктивности воды делят на олиготрофные (слабопродуктивные) – $C_{\text{хл}} < 0,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, мезотрофные (продуктивные) – $C_{\text{хл}} = 0,1-1,0 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ и эвтрофные (высокопродуктивные) – $C_{\text{хл}} > 1,0 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ [9]. Продуктивность вод зависит от содержания в них питательных (биоогенных) веществ – чем их больше, тем выше продуктивность.

Оптическим показателем трофности вод может служить глубина видимости белого диска Z_6 , величина которого тесно связана с концентрацией хлорофилла в воде [10–14]. На рис. 2 показана связь $C_{\text{хл}} = f(Z_6)$ на полигоне в Атлантическом океане [14], которая с коэффициентом корреляции $R = 0,87$ выражается уравнением $\lg C_{\text{хл}} \text{ (мг} \cdot \text{м}^{-3}) = 1,55 - 1,67 \lg Z_6$.

На рис. 3 показаны пространственные распределения Z_6 и $r_{\text{орг}}$ на полигоне. Согласно рис. 3, a на большей части полигона наблюдались мезотроф-

ные воды ($Z_6 = 14\text{--}33$ м), на меньшей — олиготрофные ($Z_6 = 33\text{--}39$ м).

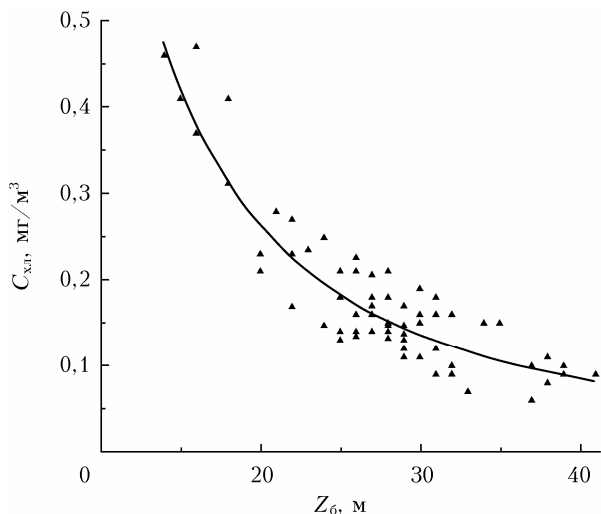


Рис. 2. Связь концентрации хлорофилла в поверхностном слое воды с глубиной видимости белого диска

Сравнение распределений рис. 3, а и б показывает пространственную связь между $r_{\text{орг}}$ и Z_6 . В районах с низкими величинами Z_6 размеры частиц меньше, чем в районах с высокими Z_6 . Связь между $r_{\text{орг}}$ и Z_6 на полигоне показана на рис. 4. Уравнение связи ($R = 0,78$) имеет вид $r_{\text{орг}} = 1,9Z_6^{0,2}$.

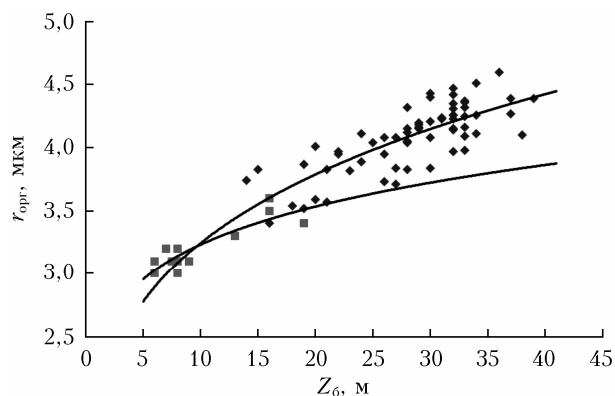
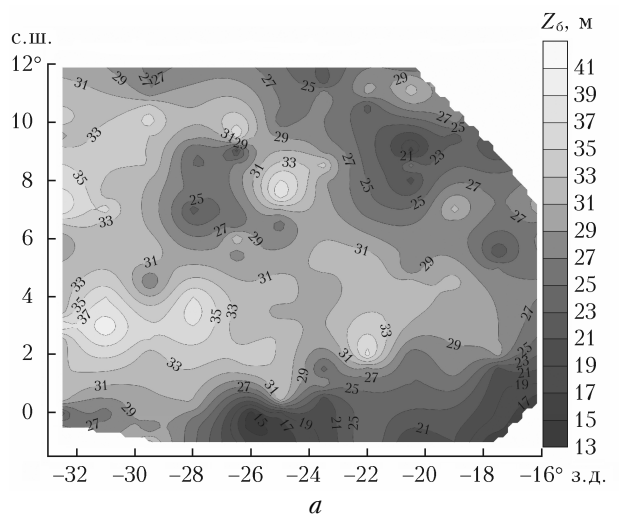
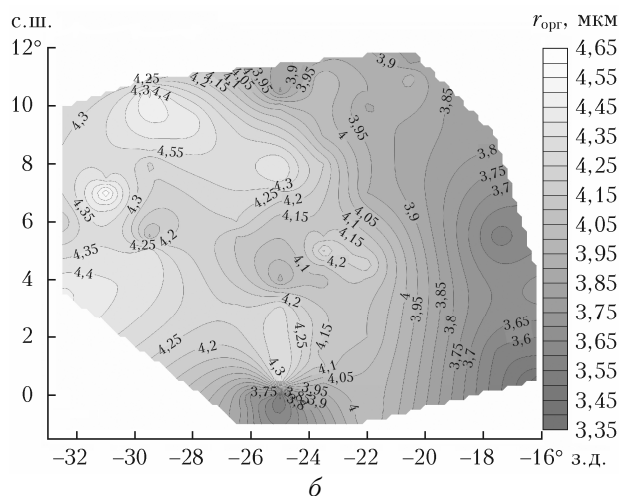


Рис. 4. Связь средних размеров частиц органического взвешенного вещества с глубиной видимости белого диска на полигоне в Атлантическом океане (ромбы) и в оз. Байкал (квадраты)



а



б

Рис. 3. Распределение глубины видимости белого диска (а) и средних размеров частиц органического взвешенного вещества (б) на полигоне

С учетом сказанного о глубине видимости белого диска как показателе трофности вод и связи $r_{\text{орг}} = f(Z_6)$ можно сделать вывод, что средний размер органических частиц зависит от концентрации содержащихся в воде биогенных веществ. А это, учитывая связь между $r_{\text{орг}}$ и $r_{\text{фит}}$, означает, что состав фитопланктона меняется при изменении содержания биогенных веществ в воде. В водах с высокой концентрацией биогенных веществ в фитопланктоне преобладают виды с небольшими размерами клеток, а с низкой — крупноразмерные виды.

Подтверждением такого вывода могут служить биологические данные о видовом составе фитопланктона в двух районах исследуемого полигона: Межпассатное противотечение ($7,0\text{--}8,5^\circ$ с.ш.; $24,0\text{--}26,0^\circ$ з.д.) — $Z_6 = 33\text{--}37$ м (олиготрофные воды), $r_{\text{орг}} = 4,2\text{--}4,35$ мкм; приэкваториальный район ($0,5^\circ$ ю.ш. — $0,5^\circ$ с.ш.; $16,0\text{--}18,0^\circ$ з.д.) — $Z_6 = 14\text{--}18$ м (мезотрофные воды), $r_{\text{орг}} = 3,45\text{--}3,9$ мкм. Согласно биологическим данным [7] в Межпассатном противотечении основу фитоценоза образуют перидиней, в приэкваториальном районе — диатомовые. Размеры клеток у перидиней в среднем больше, чем у диатомовых [15].

Связь $r_{\text{орг}} = f(Z_6)$ в каждом водоеме имеет свой вид, обусловленный региональными гидрофизическими и гидробиологическими факторами. Это иллюстрирует рис. 4, на котором показаны зависимости для Атлантического океана и оз. Байкал [16]. Уравнение связи для оз. Байкал ($R = 0,87$) имеет вид $r_{\text{орг}} = 2,4Z_6^{0,1}$.

Изменение размерного состава фитопланктона при изменении трофности вод отмечено в [17]: «Эвтрофирование Черного моря ведет к преобладанию мелких форм фитопланктона, хорошо развивающихся при пониженном освещении и высоких концентрациях растворенного органического вещества».

По поводу связи размеров клеток фитопланктона с трофностью вод можно предположить следующее. Количество поступающих в клетку питательных веществ N пропорционально их концентрации в воде C и площади поверхности $S = 4\pi(r_{\text{фит}})^2$ клетки: $N = pCS$, где p – коэффициент пропорциональности. При меньшей концентрации биогенных веществ достаточное их количество будут получать более крупные клетки. Например, в водах Атлантического полигона размеры органических частиц (см. рис. 3, б) варьировались от 4,5 мкм в олиготрофных водах до 3,5 мкм в мезотрофных. В пересчете на размеры клеток фитопланктона (2) это составляет, соответственно, 4,9 и 3,0 мкм. Отношение площади поверхностей таких клеток $S_{\text{олпт}}/S_{\text{мез}} = 2,67$.

Заключение

По измерениям индикатрис рассеяния света определены размеры органических частиц взвешенного вещества на крупномасштабном полигоне в Атлантическом океане. Рассчитанные средние размеры частиц органической взвеси сопоставимы со средними размерами клеток фитопланктона, определенными под микроскопом $r_{\text{орг}} \approx r_{\text{фит}}$. Сравнение с трофностью вод показывает, что $r_{\text{орг}}$ изменяются в зависимости от продуктивности вод: они больше в олиготрофных водах по сравнению с эвтрофными. С учетом связи $r_{\text{орг}}$ с $r_{\text{фит}}$ это означает, что в олиготрофных водах преобладают виды фитопланктона, у которого размеры клеток больше, чем у фитопланктона в эвтрофных. Подобное изменение подтверждается данными биологических наблюдений.

Работа выполнена в рамках госзадания по темам № 0827-2019-0002 и 0827-2019-0004.

1. Шифрин К.С. Определение состава морской взвеси. Основы метода // Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 253–257.
2. Ощепков С.Л., Сорокина Е.А. Методика экспрессного восстановления дисперсности и концентрации морской взвеси из измерений индикатрис рассеяния // Океанология. 1988. Т. 28, вып. 1. С. 157–161.
3. Маньковский В.И., Гринченко Д.В. Структура взвеси в водах Средиземного моря по измерениям индикатрис рассеяния света // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 3. С. 3–11.
4. Маньковский В.И., Гринченко Д.В. Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34, № 3. С. 1–12.
5. Маньковский В.И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы авто-

- матизации в АН УССР. Киев: Наукова Думка, 1981. С. 87–89.
6. *Определение относительной прозрачности и цвета морской воды* // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 299–303.
 7. Сенчикова Л.Г., Георгиева Л.В. Фитопланктон восточной части тропической Атлантики летом 1986 г. // Океанологические исследования в восточной части Атлантической тропической энергоактивной зоны. Материалы 47 рейса НИС «Михаил Ломоносов». Деп. ВИНТИ. 1987. № 6826-B87. С. 125–148.
 8. Полонский А.Б., Мельникова Е.Б., Серебренников А.Н., Токарев Ю.Н. Региональные особенности интенсивности свечения гидробионтов и концентрации хлорофилла a в водах Черного моря // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 275–281; Polonsky A.B., Melnikova E.B., Serebrennikov A.N., Tokarev Yu.N. Regional peculiarities of hydrobiont bioluminescence intensity and chlorophyll a concentration in Black Sea waters // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 4. P. 365–371.
 9. Чуринов Д.А., Гулюгин С.Ю. Особенности сезонной динамики хлорофилла «а» в связи с абсолютной динамикой топографией Антарктической части Атлантики // Тр. ВНИРО. 2011. Т. 169. С. 117–125.
 10. Шемшур В.Е., Финенко З.З., Бурлакова З.П. Связь концентрации хлорофилла «а» и первичной продукции с относительной прозрачностью воды в Черном море // Оптика моря и атмосферы. Тезисы докладов XI Пленума рабочей группы по оптике океана. Красноярск: СО АН СССР, 1960. Ч. 1. С. 176–177.
 11. Шемшур В.Е., Урденко В.А., Федирко В.И. Связь относительной прозрачности с содержанием хлорофилла «а» в воде // Океанология. 1988. Т. 22, вып. 3. С. 404–407.
 12. Kullenberg G. Relation between optical parameters in different oceanic areas // Rep. Inst. for Fysisk Oceanografi Kobenhavns Universitet. 1979. N 42. P. 57–80.
 13. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Кезмин Н.Р., Ведерников В.И., Гагарин В.И. Корреляционная связь различных параметров экосистемы пелагиали Мирового океана // Океанология. 1999. Т. 39, № 1. С. 64–74.
 14. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Связи оптических характеристик с концентрацией хлорофилла в тропических водах Атлантического океана // Тр. Всероссийской науч.-практ. конф. «Морские биологические исследования: достижения и перспективы. К 145-летию Института биологии южных морей». Севастополь: ЭКОСИ Гидрофизика, 2016. Т. 2. С. 358–361.
 15. Раймонт Дж. Планктон и продуктивность океана: в 2-х тт. // Т. 1. Фитопланктон. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 154–210.
 16. Маньковский В.И. Структура взвеси в озере Байкал по измерениям индикатрис рассеяния света // Морской гидрофиз. журн. 2011. № 3. С. 14–32.
 17. Заика В.Е., Покотилов С.Л., Шалопенков Л.С. Фототрофный пикопланктон // Планктон Черного моря. Киев: Наукова Думка, 1993. С. 68–74.

V.I. Mankovskiy, E.V. Mankovskaya. Determination of the size of suspended organic particles from light scattering phase function and their relationship to the water trophic state.

In this paper, the average radius of suspended organic particles in Atlantic Ocean waters is calculated from the measurements of light scattering phase function. The relationship between average sizes of suspended organic particles calculated from light scattering and the average sizes of phytoplankton cells determined visually using a microscope is established. The relationship between the size of suspended organic particles and the water trophic state is studied. It is ascertained that the average sizes of suspended organic particles increase with a decrease in the water productivity (trophic state). Taking into account the relationship of the average sizes of suspended organic particles with the average sizes of phytoplankton cells, a conclusion is drawn that oligotrophic waters (low trophic state) are dominated by phytoplankton species with cell sizes larger than those of phytoplankton in eutrophic waters (high trophic state).