

## Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана

**В. И. Маньковский\*, Д. В. Гринченко**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*E-mail: emankovskaya@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.11.2017 г., после доработки – 22.01.2018 г.

Представлены результаты определения массовой и численной концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций на крупномасштабном полигоне в северной части тропической области Атлантического океана в летний период 1986 г. Пробы отбирались в поверхностных водах на трехметровой глубине. Для определения концентрации и состава взвеси использовался метод обращения индикатрис рассеяния света, измеренных на полигоне. Сопоставлены распределения концентрации разных фракций взвеси с динамикой вод. Максимальные значения концентрации взвеси наблюдались в районах дивергенции течений и их циклонической завихренности. Источником минеральной взвеси в районах океана, удаленных от материков, являются аэрозоли, а также виды фитопланктона, содержащие на своих оболочках минеральные частицы – окислы кремния (диатомовые), карбонаты (кокколитофориды). По биологическим данным, массовое развитие диатомовых на полигоне отмечено в экваториальной области и в районе дивергенции Межпасатного противотечения, там же наблюдались максимальные концентрации минеральной взвеси. Относительное содержание минеральной взвеси в общей массовой концентрации варьировало в диапазоне 4–19%. По численности подавляющую часть общей взвеси (94–96%) составляли минеральные частицы. Для органической и минеральной взвеси определены средние размеры частиц. Их распределение на полигоне коррелирует с распределением массовой концентрации: в районах с пониженной концентрацией взвеси средний радиус органических частиц больше, а минеральных – меньше. Сравнение рассчитанных по показателям рассеяния света средних размеров органических частиц с определенными под микроскопом средними размерами клеток фитопланктона показало их практически одинаковые величины.

**Ключевые слова:** индикатриса рассеяния света, органическая и минеральная взвесь, размеры и численность частиц.

**Благодарности.** Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010.

**Для цитирования:** 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 гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 254–266. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-254-266

## Suspended Matter and its Composition from the Data on Light Scattering at the Large-Scale Polygon in the Northern Part of the Tropical Atlantic Ocean

**V. I. Mankovsky\*, D. V. Grinchenko**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: emankovskaya@mail.ru*

The results of defining the mass and numerical concentration both of total suspended matter and its organic and mineral fractions at the large-scale polygon in the northern part of the tropical Atlantic Ocean in summer, 1986 are represented. The samples were taken from the depth 3 m. To determine concentration and composition of the suspended matter, the method of converting the light scattering functions measured at the polygon was used. Distribution of concentrations of the suspended matter different fractions was compared with the water dynamics. The maximum values of the suspended matter concentration are observed in the regions of the currents' divergence and their cyclonic vorticity. The source of the mineral suspended matter in the ocean regions remote from the continents are the aerosols as well as the phytoplankton species containing mineral particles on their

© В. И. Маньковский, Д. В. Гринченко, 2018

shells, namely the silicon oxides (diatoms) and the carbonates (coccolithophorides). The data of biological investigations testify that both the mass development of diatoms at the polygon and maximum concentrations of the mineral suspended matter are observed in the equatorial region and in the area of the Countercurrent divergence. The mineral suspension relative content in the total mass concentration varies within 4 – 19%. As for quantity, the overwhelming majority of the total suspended matter (94 – 96%) is composed of mineral particles. The average particle sizes are determined for the organic and mineral suspensions. Their distribution at the polygon correlates with the distribution of the mass concentration: in the regions with the low suspended matter concentration the mean radius of the organic particles is high, whereas that of the mineral ones is small. Having been compared, the mean sizes of the organic particles calculated using the light scattering function and those of the phytoplankton cells defined due to a microscope demonstrate their nearly complete similarity.

**Keywords:** light scattering function, organic and mineral suspended matter, sizes and number of particles.

**For citation:** Mankovsky, V.I. and Grinchenko, D.V., 2018. Suspended matter and its composition from the data on light scattering at the large-scale polygon in the northern part of the tropical Atlantic Ocean. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(3), pp. 254-266. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-254-266 (in Russian).

## **Введение**

Во всех природных водоемах имеются взвешенные в воде частицы различного происхождения, именуемые общим словом «взвесь». Взвесь играет важную роль во многих биологических, физических и геохимических процессах, протекающих в водной среде. Поэтому анализ концентрации и состава взвеси в природных водах является актуальной задачей.

Исследованиям содержания взвеси и источников ее поступления в воды Атлантического океана посвящен ряд работ, выполненных по попутным наблюдениям на меридиональных разрезах через океан в рейсах НИС и по спутниковым данным [1, 2]. В этих работах представлены данные об океанской взвеси в различных климатических зонах Атлантики.

В настоящей работе приводятся результаты исследования пространственного распределения концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций на крупномасштабном полигоне в тропической области Атлантического океана по данным о рассеянии света.

Взвесь влияет на характер рассеяния света в воде. Существуют методы обращения индикатрис рассеяния света, позволяющие по показателям рассеяния  $\sigma(\theta)$  определять численную и массовую концентрацию органических и минеральных частиц и их суммарную концентрацию [3]. Такие методы применялись в работах [4, 5] для определения концентрации и состава взвеси в Черном море, в озере Байкал. В данной работе такая методика использована для определения концентрации и состава взвеси в тропических водах Атлантического океана.

## **Район исследований**

Исследования выполнены в 47-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (июль – сентябрь 1986 г.) на крупномасштабном тропическом полигоне с границами  $1^\circ$  ю. ш. –  $12^\circ$  с. ш.,  $16-32,5^\circ$  з. д. Меридиональные разрезы располагались через  $1,5^\circ$  по долготе, станции на разрезах выполнялись с интервалом  $0,5^\circ$  по широте.

## **Аппаратура**

Индикатрисы рассеяния света измерялись нефелометром [6] в пробах воды, отбравшихся с глубины 3 м. В табл. 1 приведены технические характеристики нефелометра.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Технические характеристики нефелометра**  
**Technical characteristics of nephelometer**

Характеристика / Characteristic	Значение / Value
Углы измерений $\sigma(\theta)$ , градусы / Angles of measurements $\sigma(\theta)$ , degree	2; 7,5...(5)...162,5
Спектральная область измерений, нм / Spectral range of measurements, nm	520 ( $\pm$ 40)
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$ , % / Measurement error $\sigma(\theta)$ , %	10
Максимальная глубина погружения, м / Maximum depth of submergence, m	150

Минимальный угол, при котором в нефелометре определяется показатель рассеяния света, составляет  $2^\circ$ . Необходимые для расчетов взвеси показатели рассеяния света при 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  $\sigma(\theta)$  при углах  $\theta = 2; 7,5; 12,5^\circ$ .

**Формулы расчета взвеси**

Для расчета характеристик взвеси по индикатрисам рассеяния использовались формулы из работ [7, 8].

В работе [7] приведены формулы расчета по показателям рассеяния света ( $\lambda = 546$  нм) численной и массовой концентрации частиц для трех фракций с радиусами частиц:  $r = 0,2 \div 0,5$  мкм,  $r = 0,5 \div 1,0$  мкм,  $r > 1,0$  мкм. Частицы с радиусами  $r = 0,2 \div 0,5$  мкм,  $r = 0,5 \div 1,0$  мкм составляют минеральную фракцию взвеси, с радиусами  $r > 1,0$  мкм – органическую. При расчете массовой концентрации плотность минеральных частиц принимают равной  $2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , органических –  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Для расчета концентрации частиц с радиусами  $r > 1,0$  мкм используется показатель рассеяния  $\sigma(\theta)$  при угле  $\theta = 1^\circ$ , для частиц  $r = 0,2 \div 0,5$  мкм и  $r = 0,5 \div 1,0$  мкм – при углах  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 6^\circ$ . В табл. 2 приведены коэффициенты при расчете численности частиц  $N$  и их массовой концентрации  $C$  по формуле  $N(C) = m \cdot \sigma(\theta) + n$ .

В ряде проб концентрация взвеси на полигоне определялась гравиметрическим методом. Было проведено сравнение общей концентрации взвеси, рассчитанной по формулам работы [7], и определенной гравиметрическим методом. Уравнение связи имеет вид

$$C_{\text{расч}} = 0,97 \cdot C_{\text{грав}} + 0,009. \quad (1)$$

Коэффициент корреляции  $R = 0,875 \pm 0,05$ . Среднеквадратическая ошибка регрессии  $S(C_{\text{расч}}) = 0,07$  мг/л. В диапазоне концентраций  $0,35\text{--}0,80$  мг/л

разница между  $C_{\text{расч}}$  и  $C_{\text{грав}}$  по формуле (1) не превышает 0,015 мг/л. Вследствие незначительной разницы между  $C_{\text{расч}}$  и  $C_{\text{грав}}$  поправка в  $C_{\text{расч}}$  не вводилась.

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Значения коэффициентов регрессии  $m$ ,  $n$  и среднеквадратических относительных ошибок  $\delta$  определения параметров взвеси**  
**Values of the regression coefficients  $m$ ,  $n$  and the root-mean-square relative errors  $\delta$  in determining the suspended matter parameters**

Радиус частиц $r$ , мкм / Radius of particles $r$ , mcm	Угол рассеяния $\theta$ , градусы / Diffusion angle $\theta$ , degrees	Численность частиц $N$ , млн/л Number of particles $N$ , mln/l			Массовая концентрация $C$ , мг/л Mass concentration $C$ , mg/l		
		$m$	$n$	$\delta N$	$m$	$n$	$\delta C$
0,2–0,5	45	$3 \cdot 10^4$	–1,0	0,29	$8,9 \cdot 10^3$	–3,0	0,16
0,5–1,0	6	9,5	0,2	0,14	24,0	0,5	0,14
> 1,0	1	0,2	0,3	0,35	12,0	16,0	0,20

В работе [8] для расчета характеристик взвеси  $\xi$  приводится обобщенная формула

$$\xi = A[B - \lg \frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)}]^P + C \lg \left[ \frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)} \right] + D. \quad (2)$$

Используются показатели рассеяния ( $\lambda = 546$  нм) при углах  $\theta = 0,5; 2; 15; 90^\circ$ . По показателям рассеяния  $\sigma(0,5)$  и  $\sigma(2)$  определяется средний радиус органических частиц  $r_{\text{орг}}$ , по  $\sigma(15)$  и  $\sigma(90)$  – параметр дисперсности  $v$  минеральных частиц (параметр Юнге). По значению  $v$  рассчитывается средний

радиус минеральных частиц  $r_{\text{минер}} = \frac{(v-1)}{(v-2)} \cdot \frac{(r_{\text{max}}^{2-v} - r_{\text{min}}^{2-v})}{(r_{\text{max}}^{1-v} - r_{\text{min}}^{1-v})}$ , где:  $r_{\text{min}} =$

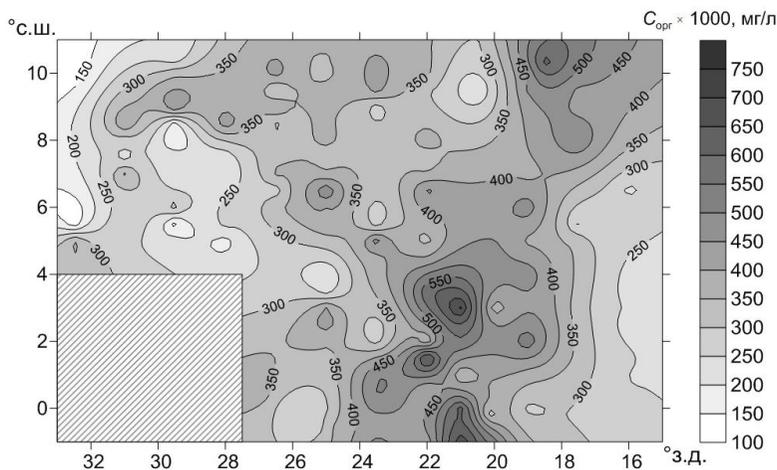
$= 0,02$  мкм;  $r_{\text{max}} = 2,0$  мкм. Коэффициенты  $A, B, C, D, P$  в формуле (2) находятся в работе [8] по специальной таблице.

### Результаты и их обсуждение

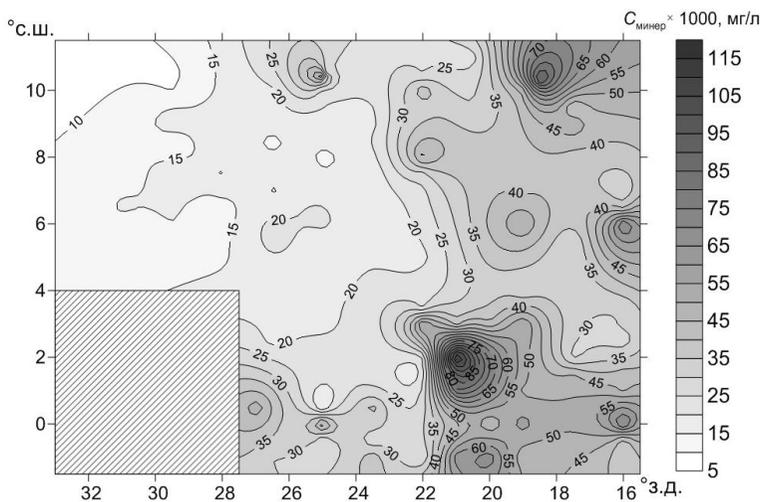
**Массовая концентрация взвеси.** Диапазон изменения массовой концентрации органической взвеси на полигоне составил 0,145–0,700 мг/л, минеральной – 0,010–0,100 мг/л, общей – 0,155–0,800 мг/л (рис. 1–3).

Рассмотрим распределение взвеси на полигоне в связи с динамикой вод. В поверхностных океанических водах главный вклад в изменчивость концентрации взвеси вносят органические частицы – фитопланктон и продукты его разложения (детрит) [9]. Концентрация фитопланктона зависит от вертикальной динамики вод – их подъема и опускания. При подъеме вод происходит вынос биогенных веществ из глубинных слоев в поверхностные (эвфотическую зону), что способствует развитию фитопланктона и приводит к повышению концентрации взвеси. При опускании вод содержание биогенных веществ в эвфотической зоне становится низким и развитие фитопланктона за-

трудняется, концентрация взвеси понижается. Таким образом, изменчивость концентрации органической взвеси тесно связана с вертикальной динамикой вод в исследуемом районе океана.

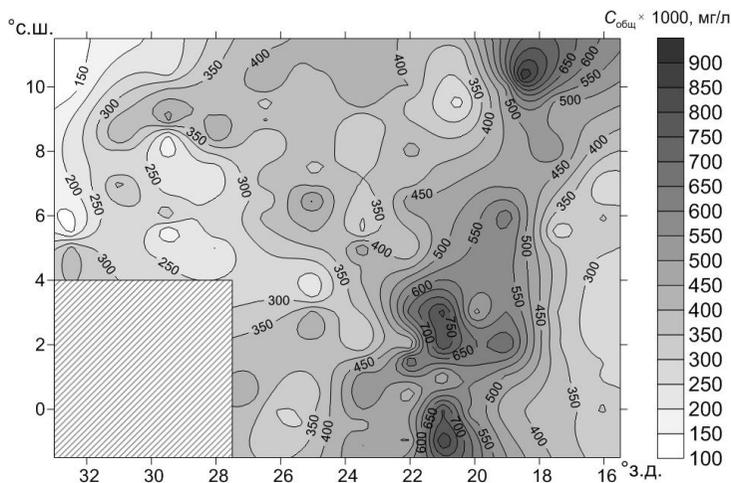


**Рис. 1.** Распределение концентрации органической взвеси  $C_{\text{орг}} \times 10^3, \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$   
**Fig. 1.** Distribution of the organic suspended matter concentration  $C_{\text{орг}} \times 10^3, \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$



**Рис. 2.** Распределение концентрации минеральной взвеси  $C_{\text{минер}} \times 10^3, \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$   
**Fig. 2.** Distribution of the mineral suspended matter concentration  $C_{\text{минер}} \times 10^3, \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$

Изменчивость содержания минеральной взвеси в океанических водах также связана с динамикой вод, но иным образом – через фитопланктон. Некоторые виды фитопланктона (диатомовые, кокколитофориды) содержат минеральные вещества. При отмирании этих водорослей в воду поступают минеральные частицы в виде структурных элементов клеток, составленных из окислов кремния (диатомовые) и карбонатов (кокколитофориды) [9].



**Рис. 3.** Распределение концентрации общей взвеси  $C_{\text{общ}} \times 10^3$ , мг·л<sup>-1</sup>  
**Fig. 3.** Distribution of the total suspended matter concentration  $C_{\text{total}} \times 10^3$ , mg·l<sup>-1</sup>

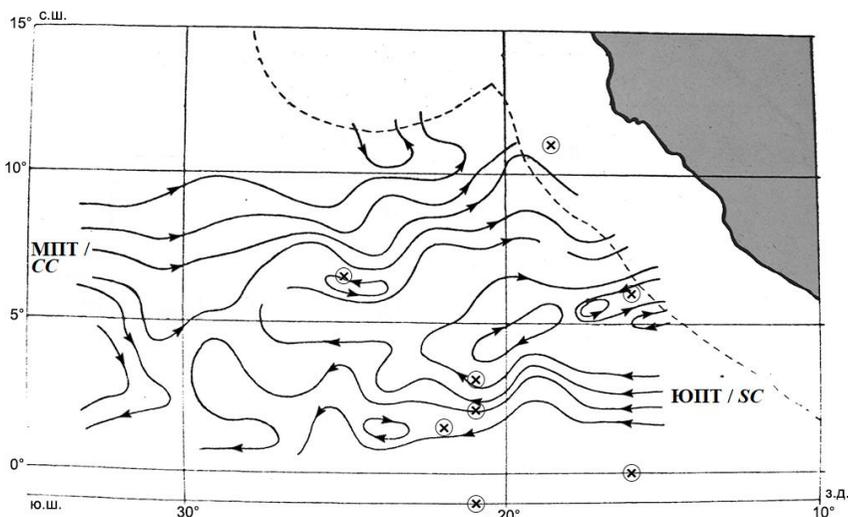
Окислы кремния у диатомовых водорослей содержатся в панцире, покрывающем клетку. Размеры клеток диатомовых – десятки микрон [10]. У кокколитофорид имеются на внешней оболочке известковые диски – кокколиты – в количестве 15 шт. Диаметр их около 1 мкм, толщина 0,25 мкм. Клетки вида *Emiliania huxleyi* могут сбрасывать кокколиты, и тогда количество кокколитов в воде по отношению к количеству клеток может быть значительно больше, по данным работы [11], – до 400, а их концентрация в воде составлять порядка  $10^{10}$ – $10^{11}$  шт·м<sup>-3</sup>.

Процесс подъема и опускания вод в океане указывает на характер течений. При циклоническом движении и в районах дивергенции течений происходит подъем вод, при антициклоническом движении и в районах конвергенции течений – опускание.

На рис. 4 представлена карта поверхностных течений на полигоне, составленная по расчетам динамическим методом [13]. В приэкваториальном районе течения не показаны, так как здесь динамический метод не работает вследствие очень малой величины силы Кориолиса и превращения ее на экваторе в ноль.

В северной части через полигон проходило Межпассатное противотечение (МПТ), которое восточнее 20° з. д. разделялось на несколько ветвей, уходящих в северном и южном направлениях. В юго-восточной части полигона проходило Южное пассатное течение (ЮПТ), в котором западнее 20° з. д. наблюдалась дивергенция его струй.

На карте течений крестиками показано положение точек с высокой концентрацией органической и минеральной взвеси. По величине концентрации каждой взвеси можно выделить три уровня: 1) низкий; 2) средний; 3) высокий. Для органической взвеси диапазон значений составляет 0,15–0,25; 0,25–0,45; более 0,45 мг/л соответственно, для минеральной взвеси – 0,005–0,025; 0,025–0,045; более 0,045 мг/л. В табл. 3 приведены координаты точек с высокой концентрацией взвеси.



**Рис. 4.** Течения на поверхности по расчетам динамическим методом: МПТ – Межпассатное противотечение, ЮПТ – Южное пассатное течение. Крестиками показаны точки, в которых наблюдалась высокая концентрация взвеси

**Fig. 4.** Currents on the surface based on the calculations by the dynamic method: CC is the Counter-current and SC is the Southern Countercurrent. Crosses show the points where high concentration of the suspended matter is observed

Сравнение с картой течений показывает, что точки с высокой концентрацией взвеси находятся в местах подъема вод, вызванных дивергенцией течений и их циклоническим движением.

В приэкваториальном районе также наблюдаются места с высокой концентрацией взвеси – точки 7 и 8. Высокие концентрации взвеси в этом районе связаны с подъемом вод в течении Ломоносова (подповерхностное  $\approx 20\text{--}200$  м течение восточного направления, идущее вдоль экватора в полосе  $\approx 1,5^\circ$  с. ш. –  $1,5^\circ$  ю. ш. [12]).

Отметим особенность в распределении высоких концентраций взвеси: в некоторых точках наблюдалась высокая концентрация только одной из фракций: в точках 2, 4, 6 – органической взвеси, в точках 3, 5, 7 – минеральной. Для другой фракции в этих точках концентрация взвеси была на среднем уровне. Это можно объяснить разным вкладом в биомассу различных видов фитопланктона, содержащих и не содержащих минеральные компоненты.

По биологическим наблюдениям, выполнявшимся в 47-м рейсе, развитие минералсодержащих видов фитопланктона (диатомовые, кокколитофориды) наблюдалось в разных частях полигона. Отмечено, что диатомовые в значительном количестве развивались в приэкваториальной зоне, особенно в ее восточной части, а также в северо-восточной части полигона в районе дивергенции МПТ. Сопоставляя распределение высоких концентраций минеральной взвеси (рис. 2) с биологическими данными, можно объяснить высокие концентрации  $S_{\text{минер}}$  в районе дивергенции МПТ (точка 1) и в приэкваториальной области (точки 7, 8) развитием диатомовых водорослей.

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

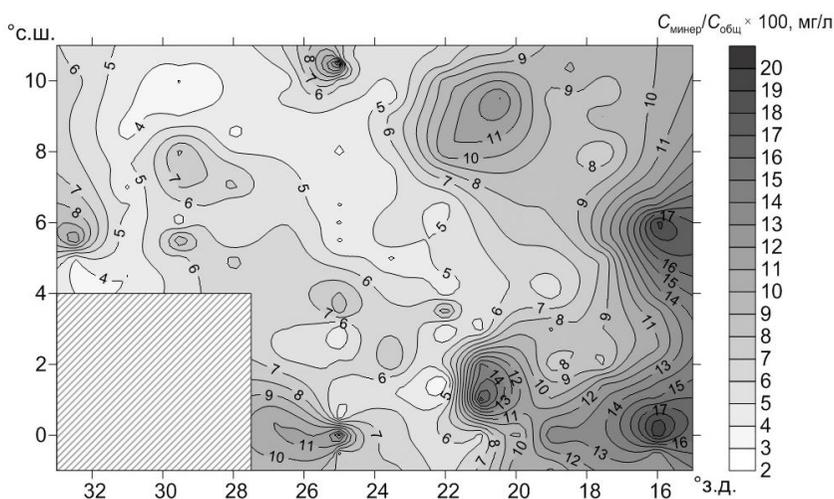
**Точки, в которых наблюдались высокие концентрации органической и минеральной взвеси, и динамические причины подъема вод в этих местах**  
**The points where high concentrations of the organic and mineral suspended matter are observed and the dynamic reasons of water elevation there**

Номер точки / Point number	Широта / Latitude	Долгота / Longitude	Тип взвеси / Type of suspension	Причина подъема вод / Reason of water elevation
1	10,5° с. ш. / N	18,5° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Дивергенция МПТ / Countercurrent divergence
2	6,5° с. ш. / N	25,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Циклон / Cyclone
3	6,0° с. ш. / N	16,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Циклон / Cyclone
4	3,0° с. ш. / N	21,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Дивергенция ЮПТ / Southern Countercurrent divergence
5	2,0° с. ш. / N	21,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Дивергенция ЮПТ / Southern Countercurrent divergence
6	1,5° с. ш. / N	22,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Дивергенция ЮПТ / Southern Countercurrent divergence
7	0	16,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Экваториальная дивергенция / Equatorial divergence
8	1,0° ю. ш. / S	21,0° з. д. / W	Органич. / Минер. / Organic / Mineral	Экваториальная дивергенция / Equatorial divergence

По величине концентрации взвеси полигон делится на две части примерно по 23° з. д., в восточной части полигона концентрация взвеси выше, особенно для минеральной взвеси. Объясняется это особенностями динамики вод в разных частях полигона. В восточной части наблюдались две обширные области подъема вод в местах дивергенции МПТ и ЮПТ, а также интенсивный подъем вод на экваторе в районе 20–21° з. д. В западной части полигона,

между ЮПТ и МПТ, образовалась обширная область с антициклоническим движением вод, при котором происходит их опускание. Кроме того, в МПТ, в районе от 29° до 21° з. д., отмечалась конвергенция его потоков, которая сопровождалась опусканием вод.

На рис. 5 показано распределение на полигоне относительного содержания во взвеси минеральной фракции. Значения  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}}$  разбиты на три уровня: низкий – от 0,03 до 0,06; средний – от 0,06 до 0,10; высокий – более 0,10. Высокие значения  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}}$  наблюдались в местах с высокой концентрацией минеральной взвеси (рис. 2). Исключением является район дивергенции МПТ (точка 1) – там отмечался средний уровень  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}}$ .

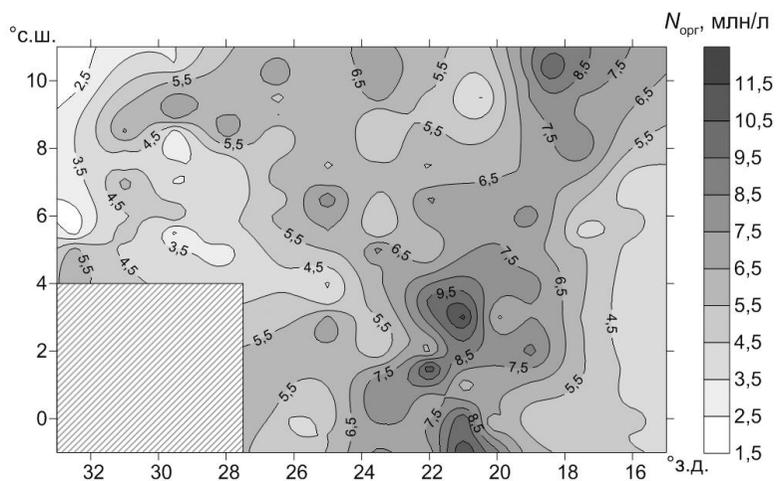


**Рис. 5.** Распределение относительной концентрации минеральной взвеси  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}} \times 10^2$   
**Fig. 5.** Distribution of relative concentration of the mineral suspended matter  $C_{\text{минер}} / C_{\text{total}} \times 10^2$

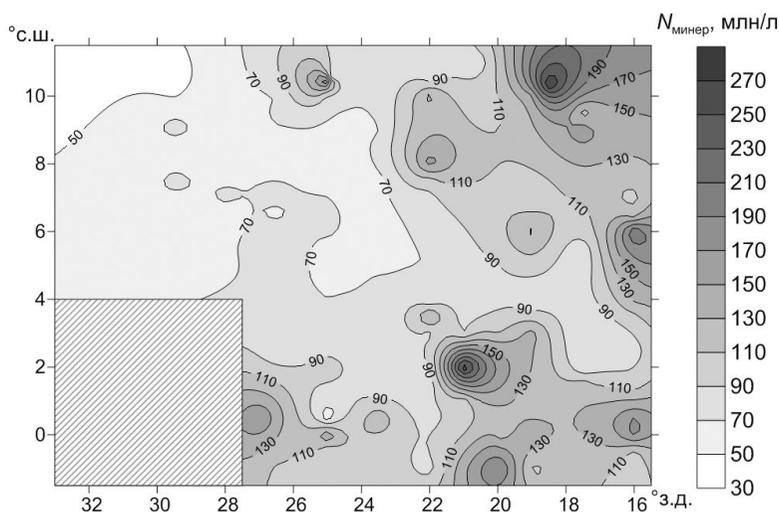
Сопоставление распределения  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}}$  с распределением концентрации органической взвеси (рис. 1) показывает возрастание величины  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}}$  в районах с низкой концентрацией  $C_{\text{орг}}$ .

**Численная концентрация взвеси.** Диапазон изменения численной концентрации органической взвеси на полигоне варьировал в пределах 2,0–12,0 млн/л, минеральной – 48–250 млн/л, общей – 50–262 млн/л; отношение  $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}} = 0,94–0,96$ . На рис. 6 показано распределение численной концентрации органических и минеральных частиц. По численности подавляющая часть взвеси приходилась на минеральные частицы – 0,94–0,96%.

Характер распределения на полигоне численной концентрации органических и минеральных частиц (рис. 6) аналогичен характеру соответствующих распределений массовой концентрации органической и минеральной взвеси (см. рис. 1, 2).



*a*



*b*

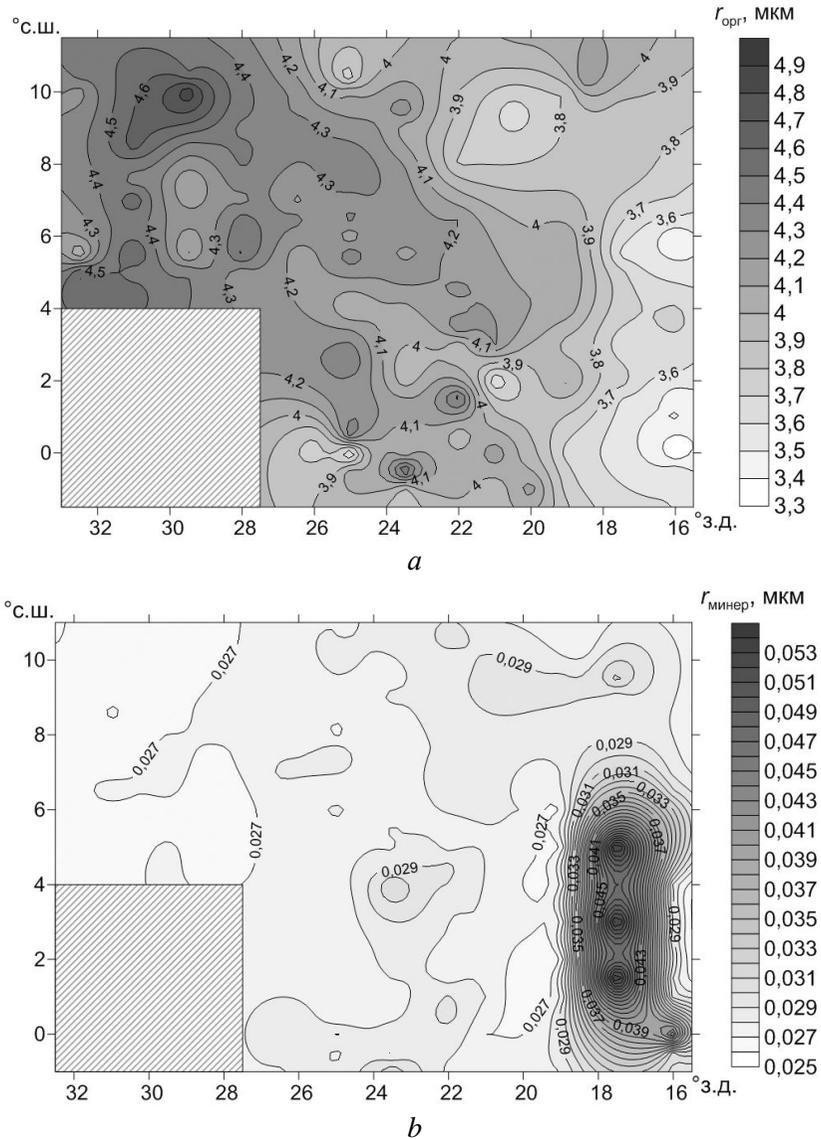
**Рис. 6.** Распределение числа органических частиц  $N_{орг}$ , млн·л<sup>-1</sup> (*a*); минеральных частиц  $N_{минер}$ , млн·л<sup>-1</sup> (*b*)

**Fig. 6.** Distribution of the quantity of the organic particles  $N_{орг}$ , mln·l<sup>-1</sup> (*a*) and that of the mineral particles  $N_{минер}$ , mln·l<sup>-1</sup> (*b*)

Размеры частиц взвеси. Диапазон изменения на полигоне средних радиусов частиц составил: органической взвеси 3,4–4,6 км, минеральной – 0,026–0,054 мкм. На рис. 7 показано их распределение на полигоне.

Сравнение с рис. 1 показывает, что для органической взвеси в целом наблюдается увеличение размеров частиц с уменьшением концентрации взвеси. Однако в некоторых местах имеются аномалии, например в районе с координатами 10° с. ш., 20° з. д. То есть связь размеров органических частиц с концентрацией взвеси неоднозначна.

Биологами в пробах воды с поверхности определялись под микроскопом размеры клеток фитопланктона и их средний радиус. В этих же пробах рассчитывался радиус биологических частиц по данным о рассеянии света. Средние значения радиусов органических частиц (59 проб) равнялись:  $r_{\text{расс}} = 4,17$  мкм;  $r_{\text{биол}} = 4,39$  мкм. Разница между средними рассчитанными и измеренными радиусами частиц 5%. То есть формулы расчета размеров органических частиц по данным о рассеянии света дают результаты такие же, как по инструментальным определениям.



**Рис. 7.** Распределение среднего радиуса органических частиц  $r_{\text{орг}}$ , мкм (a); минеральных частиц  $r_{\text{минер}}$ , мкм (b)  
**Fig. 7.** Distribution of the mean radius of the organic particles  $r_{\text{орг}}$ , mcm (a) and that of the mineral particles  $r_{\text{минер}}$ , mcm (b)

Распределение на полигоне размеров минеральных частиц (рис. 7, *b*) показывает, что в целом их размеры в восточной части полигона выше, чем в западной. Особенно большими значениями  $r_{\text{минер}}$  отличаются воды в юго-восточной части полигона: на  $16^\circ$  з. д.,  $0^\circ$  с. ш. и на  $17,5^\circ$  з. д. от  $1,5$  до  $5,5^\circ$  с. ш. Так, за пределами этого района средний радиус частиц минеральной взвеси на полигоне равен  $0,026\text{--}0,029$  мкм, а в указанном районе на  $17,5^\circ$  з. д. значение  $r_{\text{минер}}$  достигает  $0,054$  мкм. Рассматривая возможные причины экстремально высоких значений  $r_{\text{минер}}$  на  $17,5^\circ$  з. д. в связи с динамикой вод, укажем, что в данном районе наблюдается конвергенция течений (рис. 4). Однако версий, объясняющих, как с этим процессом может быть связан размер минеральных частиц, нет.

### Заключение

По измерениям индикатрис рассеяния света в поверхностных водах (глубина 3 м) на крупномасштабном полигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана определены массовая и численная концентрация общей взвеси и ее органической и минеральной фракций, а также средние размеры органических и минеральных частиц.

Показана связь распределения характеристик взвеси на полигоне с динамикой вод, проявляющаяся в повышении концентрации взвеси в районах дивергенции и циклонической циркуляции течений, при которой происходит подъем вод.

В массовой концентрации взвеси относительное содержание минеральной фракции на полигоне составляло  $4\text{--}19\%$ , в численной концентрации –  $94\text{--}96\%$ .

Сравнение рассчитанных по показателям рассеяния света средних размеров органических частиц с определенными под микроскопом средними размерами клеток фитопланктона показало их практически одинаковые величины.

На полигоне в районах с низкой концентрацией взвеси средние размеры органических частиц в целом увеличивались, а минеральных – уменьшались. В юго-восточной части полигона для минеральной взвеси наблюдалось исключение из указанной закономерности – при низкой концентрации взвеси средний радиус частиц был значительно выше, чем в целом по полигону.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кловиткин А. А., Зернова В. В., Кравчишина М. Д. Распределение фитопланктона и взвеси в Атлантическом океане в октябре – ноябре 2002 г. // Комплексные исследования Мирового океана: проект «Меридиан». Ч. 1: Атлантический океан / [отв. ред. М. В. Флинт]. М. : Наука, 2008. С. 270–294.
2. Burenkov V. I., Klyuvitkin A. A., Sheberstov S. V. Suspended matter concentration in surface layers of the Atlantic ocean derived from data of ocean color scanner MODIS // Proceedings of IV International Conference “Current problems in Optics of Natural Waters” (ONW’2007). Nizhny Novgorod, September 11–15, 2007. Nizhny Novgorod : Institute of Applied Physics: 2007. P. 154–156.
3. Шифрин К. С. Обратные задачи // Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. Гл. 6. С. 207–265.

4. *Маньковский В. И., Соловьев М. В.* Индикатрисы рассеяния света и рассчитанный по ним состав взвеси в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 1. С. 63–76.
5. *Маньковский В. И.* Структура взвеси в озере Байкал по измерениям индикатрис рассеяния света // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 3. С. 14–32. [http://мгфж.рф/images/files/2011/03/201103\\_02.pdf](http://мгфж.рф/images/files/2011/03/201103_02.pdf) (дата обращения: 20.11.2017).
6. *Маньковский В. И.* Морской импульсный нефелометр // *Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР* / Отв. ред. Б. Н. Малиновский, В. Т. Черепин. К. : Наукова Думка, 1981. С. 87–89.
7. *Копелевич О. В., Маштаков Ю. А., Буренков В. И.* Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды // *Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане : 10-й рейс НИС "Дмитрий Менделеев": [сборник статей] / [отв. ред. Л. М. Бреховских, К. С. Шифрин]*. М. : Наука, 1975. С. 54–60.
8. *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.
9. *Витюк Д. М.* Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. К. : Наукова Думка, 1983. 210 с.
10. *Раймонт Д.* Планктон и продуктивность океана. Том 1. Фитопланктон. М. : Лег. и пищ. промышленность, 1983. С. 154–228.
11. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine / W. M. Balch [et al.] // *Limnol. and Oceanogr.* 1991. Vol. 36, iss. 4. P. 629–643. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0629>
12. *Ханайченко Н. К.* Система экваториальных противотечений в океане // *Л. : Гидрометеоздат*, 1974. С. 131–132.

*Об авторах:*

**Маньковский Виктор Иванович**, старший научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0002-4272-2218, [emankovskaya@mail.ru](mailto:emankovskaya@mail.ru)

**Гринченко Дмитрий Васильевич**, старший инженер-исследователь отдела оптики и биофизики моря, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2), [phizeg@gmail.com](mailto:phizeg@gmail.com)