

## ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.463.5.

**Влияние состава взвеси на глубину видимости  
белого диска****В.И. Маньковский\****Морской гидрофизический институт РАН  
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Поступила в редакцию 11.10.2018 г.

По результатам измерений индикатрис рассеяния света на тропическом полигоне в Атлантическом океане определялась концентрация общей взвеси и ее крупной и мелкой фракций в поверхностных водах. Одновременно измерялась глубина видимости белого диска ( $Z_6$ ). Исследовалась связь общей концентрации взвеси и ее крупной и мелкой фракций с  $Z_6$ . Установлено, что главным фактором, определявшим величину  $Z_6$  в водах полигона, являлась мелкая взвесь. Выполнен теоретический анализ, показывающий, каким образом мелкая взвесь оказывает такое влияние.

*Ключевые слова:* тропический полигон, взвесь, белый диск, индикатриса рассеяния; Atlantic tropical area, light scattering phase function, Secchi disk, suspended matter.

**Введение**

Существуют разные методы определения концентрации взвеси в воде: прямые и косвенные. К прямым относится широко используемый гравиметрический метод. Однако он требует специального оборудования и значительных временных затрат. Вследствие этого в практике исследований взвеси находят применение косвенные (более быстрые) методы: ее концентрацию ( $C$ ) рассчитывают по эмпирическим формулам связи с какой-либо оптической характеристикой, в частности с глубиной видимости белого диска ( $Z_6$ ).

Поиск связи  $C = f(Z_6)$  обусловлен тем, что согласно модели [1]  $Z_6$  связана с оптическими характеристиками вод:

$$Z_6 = S/(\epsilon + \alpha), \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — показатель ослабления направленного света;  $\alpha$  — показатель вертикального ослабления дневного света;  $S$  — константа. В свою очередь, показатели  $\epsilon$  и  $\alpha$  зависят от концентрации взвеси в воде.

Известен ряд работ, в которых устанавливались такие связи [2–4]. В табл. 1 приведены формулы, полученные в этих работах. Коэффициенты корреляции в данных связях составляют 0,74–0,97.

Т а б л и ц а 1

**Формулы связи концентрации взвеси (мг/л)  
с глубиной видимости белого диска**

Формула	Коэффициент корреляции	Источник
$C_{\text{общ}} = 5,41Z_6^{-0,844}$	0,93	[2]
$C_{\text{общ}} = 14,79Z_6^{-1,29}$	0,97	[3]
$C_{\text{общ}} = 4,59Z_6^{-0,85}$	0,74	[4]

\* Виктор Иванович Маньковский (mankovskiy@mhi-ras.ru).

Такая связь была установлена по данным оптических измерений, выполнявшихся на полигоне в тропической зоне Атлантического океана. В результате обработки большого массива наблюдений ( $N = 53$ ) при изменчивости  $Z_6$  в пределах 18–38 м коэффициент корреляции концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска  $R$  составил 0,18. Анализу факторов, обусловивших такой низкий коэффициент корреляции, посвящена наша работа.

**Район исследований**

Исследования выполнены в 47-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (июнь – сентябрь 1986 г.) в Атлантическом океане на тропическом полигоне ( $1^\circ$  ю.ш. –  $12^\circ$  с.ш.;  $16$ – $32,5^\circ$  з.д.). Полигон состоял из 12 меридиональных разрезов с интервалом  $1,5^\circ$  по долготе, станции на разрезах располагались через  $0,5^\circ$  по широте.

**Аппаратура**

Измерялись  $Z_6$  и индикатриса рассеяния света  $\sigma(\theta)$ . Измерения индикатрис выполнялись нефелометром [5] в пробах воды с глубины 3 м. Глубина видимости белого диска определялась стандартным методом.

В табл. 2 приведены технические характеристики нефелометра. Минимальный угол, на котором в нефелометре определяется показатель рассеяния света, составляет  $2^\circ$ . Необходимые для расчетов взвеси показатели рассеяния света на углах  $\theta < 2^\circ$  находились путем экстраполяции 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  $\theta = 2; 7,5; 12,5^\circ$ .

Таблица 2

## Технические характеристики нефелометра

Характеристика	Значение
Углы измерений $\sigma(\theta)$ , град	2; 7,5...(5)...162,5
Спектральная область измерений, нм	520( $\pm 40$ )
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$ , %	10
Максимальная глубина погружения, м	150

## Методика расчета взвеси

Расчет характеристик взвеси производился по данным измерений индикатрис рассеяния света с использованием формулы из статьи [6]. В данной работе приведены формулы расчета по показателям рассеяния света  $\sigma(\theta)$  массовой концентрации взвеси для трех фракций с радиусами частиц:  $r = 0,2 \div 0,5$ ;  $r = 0,5 \div 1,0$ ;  $r > 1,0$  мкм. Частицы с радиусами  $r = 0,2 \div 1,0$  мкм составляют фракцию мелких частиц, с радиусами  $r > 1,0$  мкм – крупных. Мелкие частицы считаются минерального происхождения с плотностью  $2 \text{ г/см}^3$ , крупные частицы – органического с плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ .

Для крупных частиц используется показатель рассеяния  $\sigma(\theta)$  при угле  $\theta = 1^\circ$ , для мелких – при углах  $\theta = 6$  и  $45^\circ$ . В табл. 3 приведены коэффициенты расчета массовой концентрации частиц взвеси по формуле

$$C = m\sigma(\theta) + n.$$

Таблица 3

Значения коэффициентов регрессии  $m$ ,  $n$  и среднеквадратических относительных ошибок  $\delta$  определения параметров взвеси

$r$ , мкм	$\theta$ , град	$C$ , мг/л		
		$m$	$n$	$\delta C$
0,2–0,5	45,0	$8,9 \cdot 10^3$	-3,0	0,16
0,5–1,0	6,0	24,0	0,5	0,14
>1,0	1,0	12,0	16,0	0,20

В ряде проб на полигоне концентрация взвеси определялась гравиметрическим методом. Было проведено сравнение общей концентрации взвеси  $C_{\text{общ}} = C_k + C_m$  ( $C_k$  – концентрация крупной взвеси;  $C_m$  – концентрация мелкой взвеси), рассчитанной по формулам работы [6] ( $C_{\text{расч}}$ ) и определенной гравиметрическим методом ( $C_{\text{грав}}$ ). По 25 одновременным измерениям, в диапазоне концентраций взвеси  $C_{\text{грав}} = 0,40 - 1,25$  мг/л, получено соотношение  $C_{\text{расч}} = 0,97C_{\text{грав}} + 0,09$  с коэффициентом корреляции  $R = 0,87$ . Среднее отношение концентраций взвеси составило  $\langle C_{\text{грав}}/C_{\text{расч}} \rangle = 1,058$ . Ввиду незначительной разницы между результатами определения взвеси по рассеянию света и гравиметрическим методом поправку в величину  $C_{\text{расч}}$  не вводили.

## Результаты измерений

В табл. 4 представлен диапазон изменения характеристик взвеси и  $Z_6$  на полигоне.

Таблица 4

## Диапазон изменения характеристик взвеси и глубины видимости белого диска

Характеристика	Диапазон
$C_{\text{общ}}$ , мг/л	0,11–0,60
$C_k$ , мг/л	0,10–0,54
$C_m$ , мг/л	0,01–0,06
$C_m/C_{\text{общ}}$	0,03–0,19
$Z_6$ , м	16–37

Для исследования связи  $Z_6 = f(C)$  следует использовать среднюю концентрацию взвеси в слое  $0-Z_6$ . Мы применяем данные о взвеси на глубине 3 м. Однако их использование в нашем случае правомерно с учетом вертикального распределения оптических характеристик вод в этом районе океана, где до глубин 60–70 м наблюдается оптически однородный слой [7].

На рис. 1, *a* показана связь  $Z_6 = f(C_{\text{общ}})$ , она характеризуется коэффициентом корреляции  $R = 0,18$ . Еще более низкий коэффициент корреляции ( $R = 0,07$ ) получен для связи  $Z_6$  с концентрацией крупной взвеси (рис. 1, *б*). Связь  $Z_6$  с концентрацией мелкой взвеси оказалась тесной ( $R = 0,76$ ) (рис. 1, *в*).

Таким образом, главным фактором, влияющим на  $Z_6$ , является мелкая взвесь.

Для проверки такого влияния были выбраны измерения  $Z_6$ , для которых  $C_m$  была практически постоянной. Такие выборочные массивы данных приведены в табл. 5.

Таблица 5

## Массивы проб разной концентрацией мелкой взвеси

Массивы данных	$C_m$ , мг/л	$C_{\text{общ}}$ , мг/л	$Z_6$ , м
A			
1	0,038	0,273	27
2	0,038	0,273	26
3	0,039	0,401	24
4	0,040	0,462	22
5	0,037	0,541	20
B			
1	0,017	0,290	32
2	0,019	0,331	28
3	0,020	0,516	26
4	0,018	0,221	33
5	0,019	0,320	32
6	0,018	0,403	25

На рис. 2 показана связь концентрации общей взвеси с глубиной видимости белого диска в случаях «постоянной» концентрации мелкой взвеси. Видно, что при постоянной концентрации мелкой взвеси корреляция общей концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска высокая:  $R = 0,97$  (рис. 2, *a*),  $R = 0,85$  (рис. 2, *б*). Отметим, что при одинаковой общей концентрации взвеси глубина видимости белого диска на рис. 2, *a* и 2, *б* разная. Так, при  $C_{\text{общ}} = 0,400$  мг/л  $Z_6 = 23,0$  м (рис. 2, *a*) и 27,3 м (рис. 2, *б*). То есть при той же  $C_{\text{общ}}$  увеличение  $C_m$  сопровождается уменьшением  $Z_6$ .

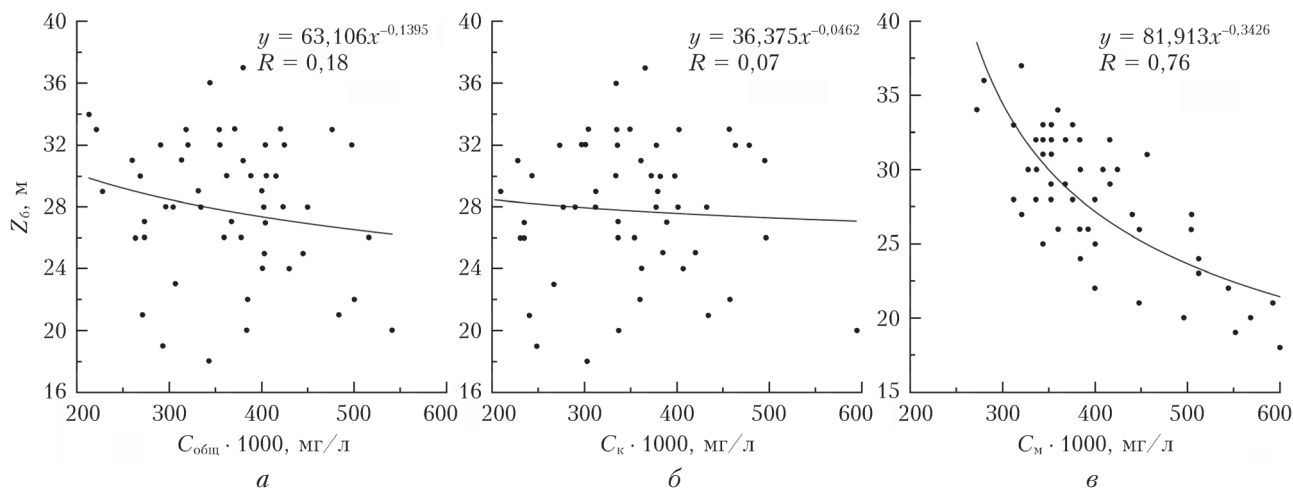


Рис. 1. Связь глубины видимости белого диска с концентрацией взвеси: а – общая взвесь; б – крупная взвесь; в – мелкая взвесь

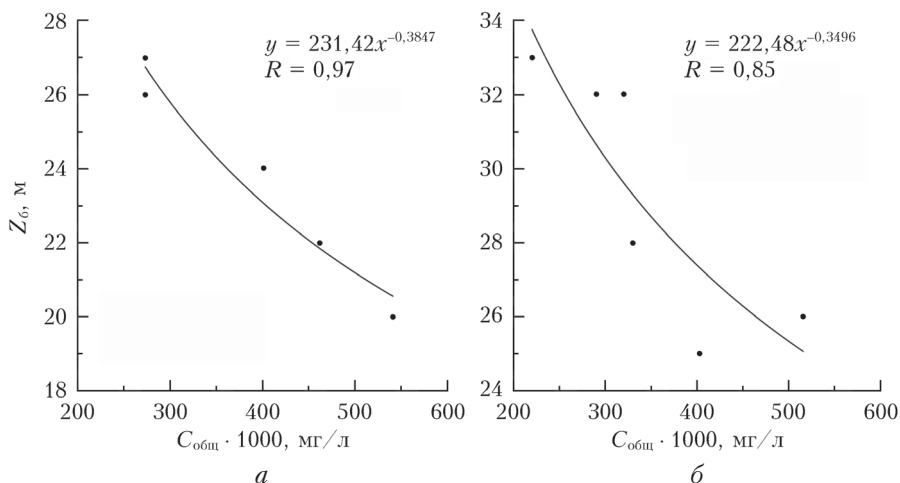


Рис. 2. Связь глубины видимости белого диска с общей концентрацией взвеси при разной концентрации мелкой взвеси (см. табл. 5): а – данные массива А; б – данные массива В

В табл. 6 приведен пример влияния мелкой взвеси на глубину видимости белого диска при одинаковой общей концентрации взвеси.

Таблица 6  
Влияние изменения концентрации мелкой взвеси на глубину видимости белого диска при постоянной общей концентрации взвеси

$C_{\text{общ}} \cdot 1000, \text{ мг/л}$	$C_{\text{м}} \cdot 1000, \text{ мг/л}$	$Z_6, \text{ м}$
343	49,5	18
334	21,5	28
344	10,0	36

## Обсуждение

В работе [1] представлена модель видимости белого диска. Ниже приведены ее основные положения.

Видимость объектов определяется их контрастом ( $K$ ) с окружающим фоном:

$$K = (B - B_{\text{ф}}) / B,$$

где  $B$  – яркость объекта;  $B_{\text{ф}}$  – яркость фона. Когда контраст становится меньше контрастной чувствительности глаза, объект перестает быть видимым.

В случае белого диска его контраст на глубине  $z$ , согласно [1], определится как

$$K_{\text{д}}(z) = [B_{\text{д}}(z) - B_{\text{ф}}(z)] / [B_{\text{д}}(z) + D(z)], \quad (2)$$

где  $B_{\text{д}}(z)$  – яркость диска;  $B_{\text{ф}}(z)$  – яркость фона;  $D(z)$  – яркость дымки. Фоном служит находящийся за диском слой воды. Дымкой является световое поле, создаваемое в слое воды между наблюдателем и диском в результате рассеяния солнечного света частицами взвеси.

В результате решения уравнения (2) в [1] получена вышеприведенная формула (1), в которой яркость дымки  $D(z)$  включена в константу  $S$ .

Как видно из формулы (2), контраст диска зависит от яркости дымки – с ее увеличением контраст диска падает, что приводит к уменьшению  $Z_6$ .

Световая дымка в воде создается в результате рассеяния солнечного света частицами взвеси в заднюю полусферу. На создание световой дымки влияет главным образом рассеяние света мелкой взвесью. Это обусловлено разным характером рассеяния света мелкими и крупными частицами.

Крупные частицы рассеивают подавляющую часть света в малых углах относительно направления пучка света, а на больших углах интенсивность рассеянного света такими частицами мала. По данным модельных расчетов рассеяния света в морской воде [8] для типичной индикатрисы получены следующие соотношения угловых показателей рассеяния света: на углах меньше  $2^\circ$  рассеяние практически определяется крупной взвесью, начиная с угла  $15^\circ$  рассеяние мелкой взвесью уже на порядок выше рассеяния крупной, а в области углов  $90-180^\circ$  — выше на три порядка.

Связь  $Z_0 = f(C_{\text{общ}})$  будет тесной при постоянной или незначительно изменяющейся концентрации

мелкой взвеси, что иллюстрирует рис. 2. В случае большого изменения  $C_M$  связь может быть сильной, если  $C_M$  изменяется пропорционально  $C_{\text{общ}}$ . Такая закономерность наблюдалась в работе [2] в водах оз. Байкал (рис. 3, а). Вследствие этого коэффициент корреляции общей концентрации взвеси с белым диском составил 0,93. В водах тропического полигона такой связи практически не наблюдалось (рис. 3, б), что и обусловило низкую корреляцию  $C_{\text{общ}}$  с  $Z_0$  ( $R = 0,18$ ).

Данное обстоятельство объясняется тем, что воды на полигоне имеют разное происхождение. Согласно [9] севернее  $10^\circ$  с.ш. располагались воды Северного пассатного течения, в полосе  $5-10^\circ$  с.ш. находились воды Межпассатного противотечения, южную часть полигона ( $1-5^\circ$  с.ш.;  $16-30^\circ$  з.д.) занимали воды Южного пассатного течения, в экваториальной области ( $\approx 25-32^\circ$  з.д.) на поверхность вышло течение Ломоносова. Формирование состава взвеси в этих водах происходило в разных океано-

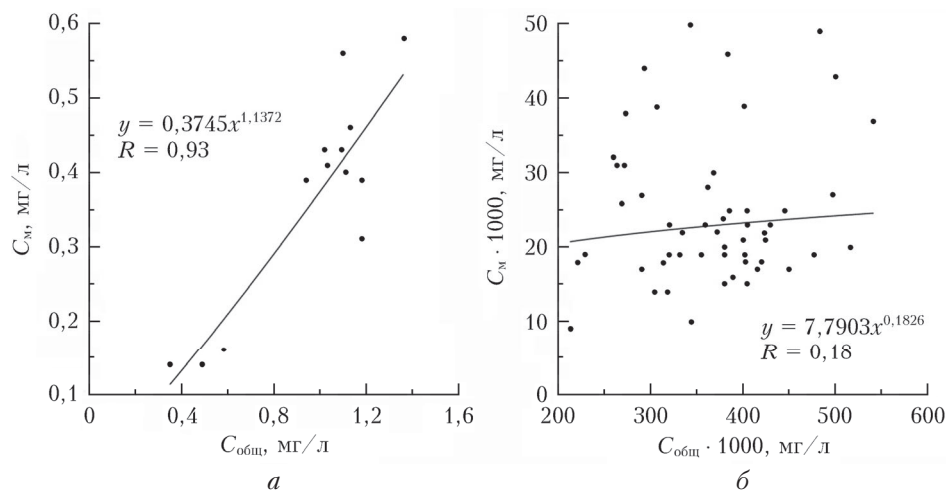


Рис. 3. Связь концентрации мелкой взвеси с общей концентрацией взвеси: а — в водах оз. Байкал; б — на тропическом полигоне

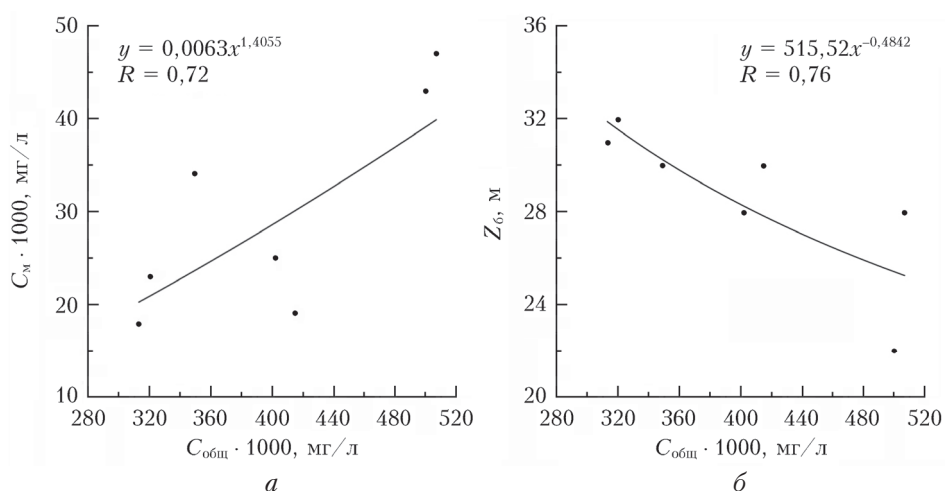


Рис. 4. Связи в водах Северного пассатного течения: а — концентрации мелкой взвеси с общей концентрацией взвеси; б — глубины видимости белого диска с общей концентрацией взвеси

графических условиях, вследствие чего соотношения крупной и мелкой взвеси в каждой водной массе имеет свои особенности.

Анализ данных измерений на полигоне показал, что в водах Северного пассатного течения наблюдалась связь между  $C_m$  и  $C_k$  ( $R = 0,72$ ; рис. 4, а), корреляция  $Z_6$  с  $C_{\text{общ}}$  была сильной ( $R = 0,76$ ; рис. 4, б).

### Заключение

Глубина видимости белого диска зависит не только от концентрации находящейся в воде взвеси, но и от ее состава — концентраций мелких и крупных частиц. Экспериментальные данные показывают огромное влияние на величину  $Z_6$  содержания во взвеси мелких частиц — с увеличением их концентрации  $Z_6$  уменьшается, даже если при этом общая концентрация взвеси остается неизменной. Подобное влияние мелкой взвеси на  $Z_6$  обусловлено особенностью рассеяния ею света на больших углах, в результате которого в морской среде создается световая дымка, уменьшающая видимый контраст диска, что приводит к уменьшению  $Z_6$ .

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002.

1. Шифрин К.С. Глубина видимости белого диска и цвет моря // Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоздат, 1983. С. 23–25.
2. Витюк Д.М. Использование визуальных наблюдений для расчета концентрации взвеси в морской воде //

Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. Киев: Наукова Думка, 1983. С. 70–72.

3. Шемшур В.Е., Владимиров В.Л. Оценка концентрации взвеси в море по глубине видимости белого диска и спектрам восходящего излучения // Океанология. 1989. Т. 29, вып. 6. С. 946–950.
4. Маньковский В.И. Оценка концентраций общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 313 – 317; *Mankovsky V.I. Estimation of the Total Concentration of Suspended Matter and Its Organic and Mineral Fractions in Lake Baikal by the Secchi Disk // Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 502–506.
5. Маньковский В.И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев: Наукова Думка, 1981. С. 87–89.
6. Копелевич О.В., Маштаков Ю.А., Буренков В.И. Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды // Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975. С. 54–60.
7. Неуймин Г.Г., Сорокина Н.А. Общие закономерности распределения прозрачности вод Тропической Атлантики // Морские гидрофизические исследования. Севастополь: МГИ АН УССР, 1982. С. 165–172.
8. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 208–235.
9. Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Циркуляция вод восточной части тропической Атлантики в летний сезон // Океанологические исследования в восточной части Атлантической тропической энергоактивной зоны: Материалы 47-го рейса НИС «Михаил Ломоносов». Деп. ВИНТИ, 1987. С. 6–17.

#### *V.I. Mankovsky. Influence of suspended matter composition on Secchi disk depth.*

Concentrations of total suspended matter and its coarse and fine fractions in surface waters were determined based on the measurements of the light scattering phase function in the Atlantic tropical area. At the same time, the Secchi disk depth  $Z_d$  was measured. The relationships between the total concentration of suspended matter  $C_{\text{TSM}}$  and of its coarse  $C_{\text{coarse}}$  and fine  $C_{\text{fine}}$  fractions and Secchi disk depth were studied. It was established that the main factor determining the Secchi disk depth in studied area was fine fraction of suspended matter. The effect of fine particles was theoretically analyzed.