

УДК 551.463.5

Оценки концентраций общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска

В.И. Маньковский*

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

Поступила в редакцию 9.10.2017 г.

В разных районах оз. Байкал выполнены измерения индикатрисы рассеяния света и глубины видимости белого диска. По результатам измерений индикатрисы рассеяния света рассчитаны численная и массовая концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций. По этим данным установлены связи различных характеристик взвеси с глубиной видимости белого диска. Проведено сравнение формулы связи общей массовой концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска для вод оз. Байкал с соответствующими формулами, полученными по измерениям в морских водах.

Ключевые слова: оз. Байкал, индикатрисы рассеяния света, диск Секки, глубина видимости белого диска, взвесь, органическая взвесь, минеральная взвесь, численная концентрация взвеси, массовая концентрация взвеси; Lake Baikal, scattering phase function, Secchi Disk, Secchi depth, suspended matter, organic particles, mineral particles, mass concentration of suspended particles, number concentration of suspended particles.

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 актуальной задачей является получение информации о концентрации и составе взвеси в природных водах.

Существуют разные методы определения концентрации взвеси: прямые и косвенные. К прямым относится широко используемый гравиметрический метод. Однако он требует значительных затрат времени – на подготовку фильтров, отбор проб, фильтрование, промывку фильтров с фильтратом от морской соли, высушивание фильтров с фильтратом, взвешивание фильтров и др. Вследствие этого в практике исследований взвеси находят применение косвенные (более быстрые) методы, в которых концентрацию взвеси рассчитывают по эмпирическим формулам связи с какой-либо оптической характеристикой, в частности, с глубиной видимости белого диска Z_6 .

Взвесь влияет на характер рассеяния света в воде. Есть методы обращения индикатрисы рассеяния света $\sigma(\theta)$, позволяющие по измеренным ее значениям определять численную и массовую концентрации органических и минеральных частиц

и их суммарную концентрацию. Такая методика использовалась в [1], а также в настоящей работе для определения концентрации взвеси в водах оз. Байкал.

Цель настоящей работы – установление связи с глубиной видимости белого диска общей концентрации взвеси и концентраций ее органической и минеральной фракций в поверхностных водах озера.

Районы измерений и аппаратура

Измерения были выполнены в июле 1979 г. в экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин», проводившейся Лимнологическим институтом СО РАН. Во время экспедиции был сделан лимнологический разрез по осевой линии озера от его южной части до северной. На 13 станциях в разных районах озера были проведены одновременно измерения индикатрисы рассеяния света и глубины видимости белого диска.

Индикатриса измерялась нефелометром [2] на глубине 5 м. Технические характеристики нефелометра приведены в табл. 1. Глубина видимости белого диска определялась стандартным методом.

Таблица 1

Технические характеристики нефелометра

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

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

Минимальный угол, для которого в нефелометре определяется показатель рассеяния света, составляет 2° . Необходимые для расчетов взвеси показатели рассеяния света под углом $\theta < 2^\circ$ 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 $\sigma(\theta)$ под углом $\theta = 2; 7,5; 12,5^\circ$.

Формулы расчета взвеси

Для расчета характеристик взвеси по индикатрисам рассеяния использовались формулы из работы [3]. В настоящей работе приведены формулы расчета по показателям рассеяния света ($\lambda = 546$ нм) численной и массовой концентраций частиц для трех фракций с радиусами частиц: 1) $r = 0,2-0,5$; 2) $0,5-1,0$ и 3) $r > 1,0$ мкм. Частицы 1-й и 2-й фракций составляют минеральную фракцию взвеси, а 3-й фракции – органическую. При расчете массовой концентрации плотность минеральных частиц принимаются равной 2 г/см^{-3} , органических – 1 г/см^{-3} .

Для частиц 3-й фракции используется показатель рассеяния $\sigma(\theta)$ под углом $\theta = 1^\circ$, для частиц 1-й и 2-й фракции – под углами $\theta = 45$ и 6° . В табл. 2 приведены коэффициенты расчета численности частиц N и их массовой концентрации C по формуле

$$N(C) = m\sigma(\theta) + n \quad (1)$$

(m, n – коэффициенты регрессии).

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии m, n и среднеквадратических относительных ошибок δ определения параметров взвеси

r , мкм	θ , град	N , млн/л			C , мг/л		
		m	n	δN	m	n	δC
0,2–0,5	45,0	$3 \cdot 10^4$	–1,0	0,29	$8,9 \cdot 10^3$	–3,0	0,16
0,5–1,0	6,0	9,5	0,2	0,14	24,0	0,5	0,14
>1,0	1,0	0,2	0,3	0,35	12,0	16,0	0,20

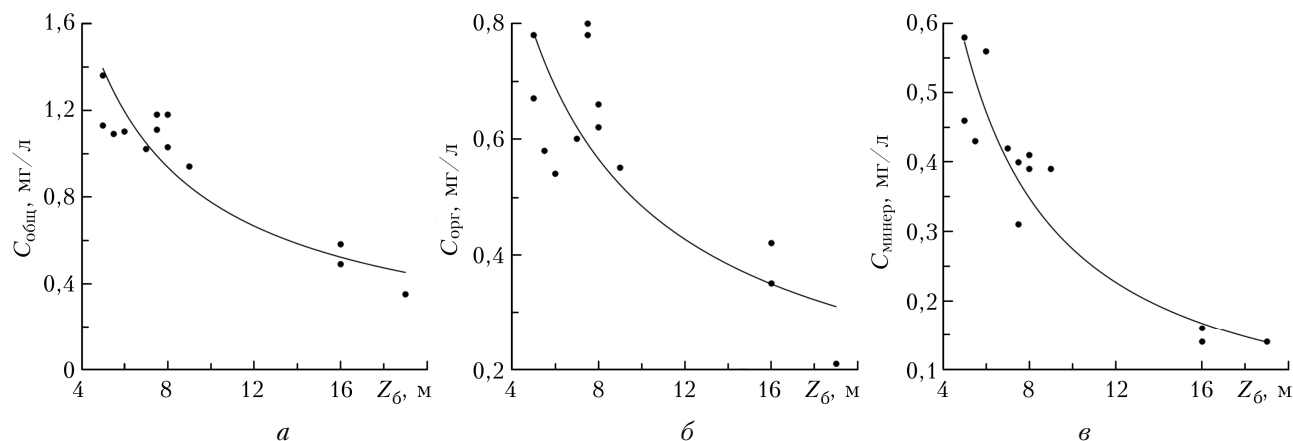


Рис. 1. Связь массовой концентрации взвеси (а), ее органической (б) и минеральной фракций (в) с глубиной видимости белого диска в оз. Байкал

В ряде проб концентрация взвеси в озере определялась гравиметрическим методом. Было проведено сравнение значений общей концентрации взвеси, рассчитанных по формулам работы [3] и определенных гравиметрическим методом. По 25 измерениям в диапазоне концентраций взвеси по гравиметрическому методу $C_{\text{грав}} = 0,40-1,25$ мг/л получено соотношение $C_{\text{грав}}/C_{\text{расч}} = 1,058$. Ввиду незначительной разницы между результатами определения взвеси обоими методами поправку в величину $C_{\text{расч}}$ не вводили.

Результаты измерений

В табл. 3 представлены диапазоны изменения характеристик взвеси, рассчитанных по измерениям индикатрисы рассеяния света на глубине 5 м. Диапазон изменения глубины видимости белого диска составил 5–19 м.

Таблица 3

Диапазоны изменения массовой концентрации взвеси C и численности частиц N ($C_{\text{общ}}$ – общая концентрация, $C_{\text{орг}}$ – концентрация органической и $C_{\text{минер}}$ – минеральной фракций, $C_{\text{минер}}/C_{\text{общ}}$ – относительное массовое содержание; $N_{\text{общ}}$ – общая численность частиц, $N_{\text{орг}}$ – численность частиц органической и $N_{\text{минер}}$ – минеральной фракций, $N_{\text{минер}}/N_{\text{общ}}$ – относительное численное содержание)

Характеристика	Диапазон изменения
<i>Массовая концентрация, мг/л</i>	
$C_{\text{общ}}$	0,35–1,36
$C_{\text{орг}}$	0,21–0,78
$C_{\text{минер}}$	0,14–0,58
$C_{\text{минер}}/C_{\text{общ}}$	0,24–0,51
<i>Численная концентрация, млн/л</i>	
$N_{\text{общ}}$	463–1540
$N_{\text{орг}}$	3,6–13,6
$N_{\text{минер}}$	459–1531
$N_{\text{минер}}/N_{\text{общ}}$	0,980–0,994

На рис. 1 и 2 показана связь с Z_b массовой и численной концентраций общей взвеси и ее органической и минеральной фракций.

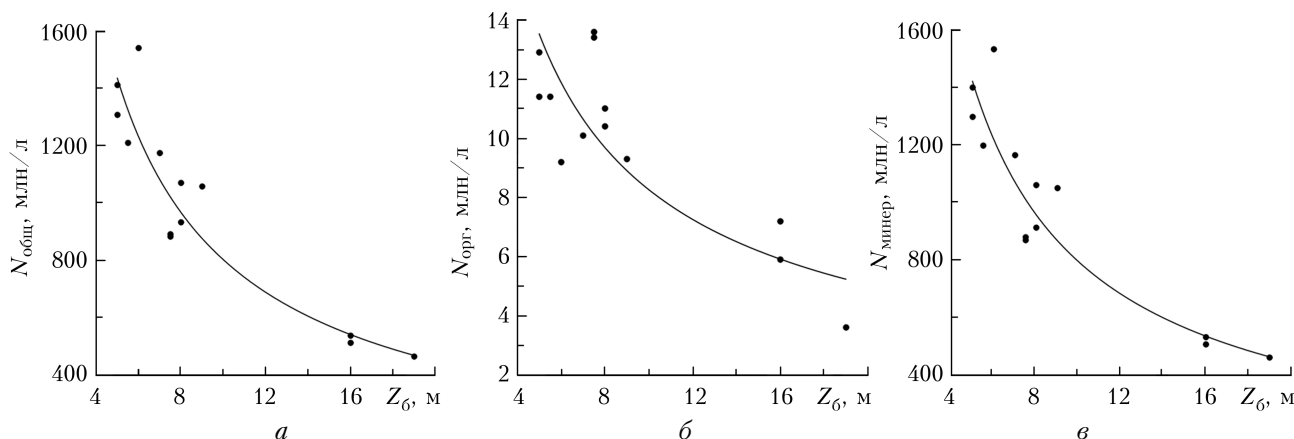


Рис. 2. Связь численной концентрации взвеси (а), ее органической (б) и минеральной фракций (в) с глубиной видимости белого диска в оз. Байкал

В табл. 4 приведены параметры связи с Z_6 концентраций всех фракций взвеси.

Таблица 4

Параметры связи с Z_6 концентраций всех фракций взвеси (13 измерений; R – коэффициент корреляции; S – стандартная ошибка регрессии)		
Уравнение связи	R	S
<i>Массовая концентрация, мг/л</i>		
$C_{\text{общ}} = 5,41Z_6^{-0,844}$	$0,927 \pm 0,040$	0,110
$C_{\text{орг}} = 2,40Z_6^{-0,695}$	$0,828 \pm 0,091$	0,097
$C_{\text{минер}} = 3,16Z_6^{-1,06}$	$0,951 \pm 0,014$	0,045
<i>Численная концентрация, млн/л</i>		
$N_{\text{общ}} = 5552Z_6^{-0,841}$	$0,954 \pm 0,026$	102
$N_{\text{орг}} = 42,48Z_6^{-0,711}$	$0,847 \pm 0,081$	1,5
$N_{\text{минер}} = 5508Z_6^{-0,842}$	$0,953 \pm 0,025$	103

Обсуждение

Массовая концентрация взвеси

Для массовых концентраций взвеси и ее органической и минеральной фракций наблюдается сильная корреляция с Z_6 , особенно для минеральной фракции.

Сравним значения общей массовой концентрации взвеси, рассчитанные по уравнениям регрессии (табл. 4), $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}} + C_{\text{минер}}$ (рис. 3). Результаты расчетов отличаются незначительно: $C_{\text{общ}} / (C_{\text{орг}} + C_{\text{минер}}) = 1,002$ для $Z_6 = 19$ м и $1,023$ для $Z_6 = 5$ м, т.е. вычисления концентрации взвеси по всем формулам согласованы.

В работах [4, 5] исследовалась связь общей концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска в морских водах. В [4] по данным наблюдений в Средиземном и Черном морях, в Атлантическом и Индийском океанах в диапазоне изменения $Z_6 = 1,5$ –29,0 м получена формула ($R = 0,74$)

$$C_{\text{общ}} = 4,59Z_6^{-0,85}. \quad (2)$$

В [5] использованы результаты наблюдений в Средиземном, Каспийском, Черном морях и на

Гвинейском шельфе в Атлантическом океане. В диапазоне $Z_6 = 0,05$ –29,0 м формула связи ($R = 0,97$)

$$C_{\text{общ}} = 14,79Z_6^{-1,29}. \quad (3)$$

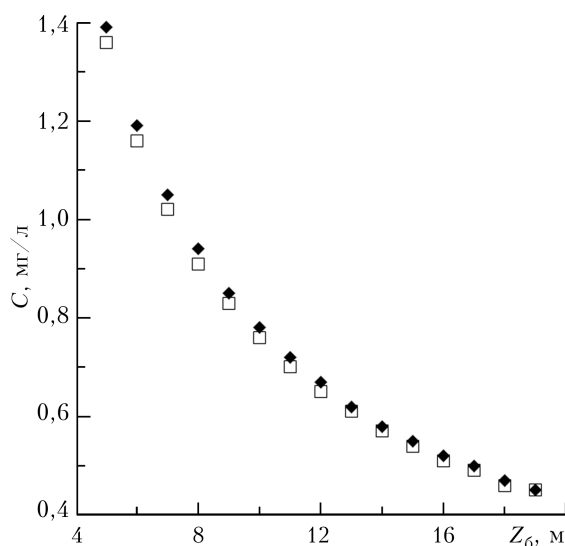


Рис. 3. Сравнение рассчитанных по уравнениям регрессии из табл. 4 общей концентрации взвеси $C_{\text{общ}}$ (♦) с суммой концентраций фракций взвеси $C_{\text{орг}} + C_{\text{минер}}$ (□)

На рис. 4 приведены кривые связи $C_{\text{общ}} = f(Z_6)$, построенные по нашим данным для оз. Байкал и по уравнениям в [4, 5]. Кривые $C_{\text{общ}} = f(Z_6)$ для оз. Байкал и в работе [4] имеют одинаковый наклон. В уравнении связи [4] показатель степени у глубины видимости белого диска $Z_6^{-0,85}$ практически совпадает с нашей формулой ($Z_6^{-0,844}$). Отличаются эти выражения множителями перед Z_6 : 4,59 в [4], 5,41 для Байкала. Более высокие концентрации взвеси (в 1,2 раза) по формуле для озера, при одинаковой величине Z_6 , можно объяснить высоким относительным содержанием минеральных частиц во взвеси – $C_{\text{минер}} / C_{\text{общ}} = 0,24$ –0,51 (см. табл. 3). Вследствие меньшей концентрации органических частиц, на которые приходится основная часть

ослабления света взвесью в слое 0– Z_6 , при той же общей концентрации взвеси глубина видимости белого диска будет больше, что и отражает рис. 4.

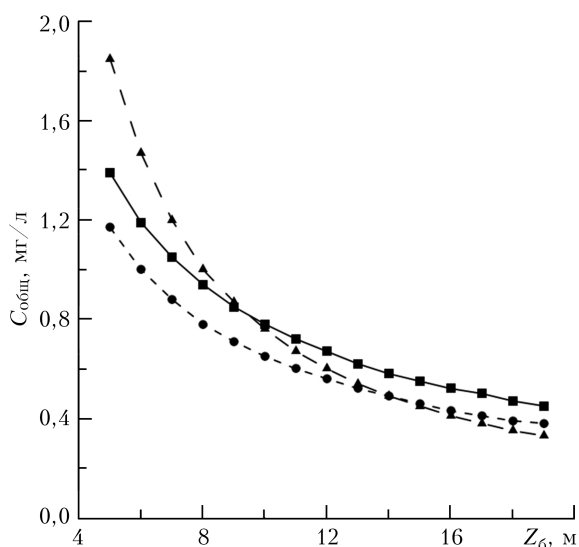


Рис. 4. Линии регрессии $C_{общ} = f(Z_6)$ для оз. Байкал (■) и из работ [4] (●) и [5] (▲)

Для сравнения приведем информацию об относительном содержании минеральной взвеси в поверхностных водах Черного и Средиземного морей, по измерениям в которых в [4] получен основной массив данных о связи $C_{общ} = f(Z_6)$. Результаты измерений индикатрисы рассеяния света приведены в [6, 7]. В глубоководной области Черного моря $C_{минер}/C_{общ} = 0,15–0,20$, на северо-западном шельфе $C_{минер}/C_{общ} = 0,25–0,35$ [6]. В Средиземном море (от моря Альборан до Эгейского) относительное содержание во взвеси минеральной фракции составляло $C_{минер}/C_{общ} = 0,08–0,18$ [7]. Эти данные согласуются с высказанной выше версией о причинах отличия формул связи $C_{общ} = f(Z_6)$ в работе [4] и для Байкала.

Что касается кривой связи $C_{общ} = f(Z_6)$ из [5], отметим большое ее расхождение (рис. 4) с другими кривыми при низких значениях Z_6 (менее 7 м). Для $Z_6 = 5$ м по формулам получаются следующие концентрации: $C_{[7]} = 1,87$ мг/л; $C_{Байкал} = 1,39$ мг/л; $C_{[11]} = 1,17$ мг/л.

Сильное расхождение кривой связи [5] с кривыми из [4] и для оз. Байкал при низких значениях Z_6 , очевидно, связано с тем, что в общий массив данных в [5] включены результаты, полученные на Гвинейском шельфе (59% от общего числа), где концентрация взвеси достигала 1390 мг/л. Такие высокие концентрации создаются там из-за приливов, поднимающих в прибрежных водах со дна осадки; они не характерны для удаленных от берега океанских вод, где влияние приливов на концентрацию взвеси в воде не сказывается. То же самое относится к включению в [5] в общий массив данных измерений в Каспийском море в устье р. Куры

(7% от общего числа), где концентрация взвеси достигала 866 мг/л.

Численная концентрация взвеси

Коэффициенты корреляции численной концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска для всех фракций такие же высокие, как и для массовой концентрации (см. табл. 4).

Отметим, что в общей численности частиц взвеси подавляющую часть составляют минеральные частицы (98–99%), при этом 90–96% приходится на долю фракции частиц с радиусами 0,2–0,5 мкм.

Сравнение общей численности частиц $N_{общ}$ с суммой численности органической и минеральной фракций $N_{орг} + N_{минер}$ показало согласованность всех уравнений связи. Расчеты по формулам для $N_{общ}$ и $N_{орг} + N_{минер}$ дают следующие соотношения: $N_{общ}/(N_{орг} + N_{минер}) = 1,01$ для $Z_6 = 19$ м и 1,008 для $Z_6 = 5$ м.

Сравнить формулы связи численности частиц с глубиной видимости белого диска в Байкале с аналогичными формулами для других водоемов не представляется возможным, так как таких исследований в литературе не имеется.

Заключение

По измерениям индикатрис рассеяния света определены массовая и численная концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в поверхностных водах разных районов оз. Байкал в летний период. Установлены связи этих параметров с глубиной видимости белого диска в диапазоне $Z_6 = 5–19$ м. Все связи характеризуются высокими коэффициентами корреляции.

Проведено сравнение формулы связи $C_{общ} = f(Z_6)$ для общей массовой концентрации взвеси в Байкале с аналогичными формулами, полученными в [4, 5] по измерениям в морских водах. Наклон кривых $C_{общ} = f(Z_6)$ для озера и в работе [4] одинаков, но они смещены параллельно так, что по кривой связи для Байкала концентрация взвеси при той же величине Z_6 в 1,2 раза больше. Такое различие объясняется высокой относительной концентрацией минеральной фракции взвеси в водах озера. Уравнение связи $C_{общ} = f(Z_6)$ в [5] при низких значениях Z_6 (меньше 7 м) дает намного большее значение концентрации, чем формулы в [4] и для Байкала. Это объясняется включением в [5] в общий массив данных измерений, выполненных на Гвинейском шельфе и в Каспийском море в устье р. Куры, где наблюдались очень высокие концентрации взвеси (~1000 мг/л и более), не характерные для открытых вод морей и океанов.

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

1. Маньковский В.И. Структура взвеси в озере Байкал по измерениям индикатрис рассеяния света // Морск. гидрофиз. ж. 2011. № 3. С. 14–32.
2. Маньковский В.И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы

- автоматизации в АН УССР. Киев: Наук. Думка, 1981. С. 87–89.
3. *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.
 4. *Витюк Д.М.* Использование визуальных наблюдений для расчета концентрации взвеси в морской воде // Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. Киев: Наук. Думка, 1983. С. 70–72.
 5. *Шемшура 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.
 6. *Маньковский В.И.* Индикатрисы рассеяния света и рассчитанный по ним состав взвеси в Черном море // Морск. гидрофиз. ж. 2005. № 1. С. 63–76.
 7. *Маньковский В.И., Гринченко Д.В.* Структура взвеси в водах Средиземного моря по измерениям индикатрис рассеяния света // Морск. гидрофиз. ж. 2014. № 3. С. 3–11.

V.I. Mankovskiy. Estimation of the total concentration of suspended matter and its organic and mineral fractions in the Lake Baikal by the Secchi Disk.

Based on the measurements of light scattering functions performed in different regions of the Lake Baikal in summer 1979, the characteristics of suspended matter in surface waters are calculated, including mass and number concentrations of suspension and its different fractions. By this data, the relationships with Secchi Disk are derived. The formula of relationship between the mass concentration of suspended matter and Secchi Disk for Lake Baikal is compared with similar formulas for marine waters.