

УДК 574.58

*И. А. Суторихин, В. И. Букастый, У. И. Залаева, О. Б. Акулова***Исследования концентрации и размеров частиц водной взвеси с помощью оптического метода флуктуаций прозрачности****I. A. Sutorikhin, V. I. Bukaty, U. I. Zalaeva, O. B. Akulova***Study of Concentration and Particle Size of Water Suspension Using Optical Transparency Fluctuation Method**

Приведены результаты лабораторных исследований по распределению и размерному составу взвешенного в воде вещества в пробах воды микрокосма (экспериментальная закрытая модель природной экосистемы) и озер Алтайского края оптическим методом флуктуаций прозрачности с помощью измерительно-вычислительного комплекса. Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами измерений, полученными методом оптической микроскопии, которое показывает их удовлетворительное согласие.

Ключевые слова: прозрачность, взвесь, концентрация и размер частиц, флуктуации.

DOI 10.14258/izvasu(2013)1.2-39

Потребность в оперативных и в то же время точных методах определения концентрации и размерного состава взвешенного в воде вещества особенно актуальна при решении основных задач экологического мониторинга водных экосистем. В этих комплексных исследованиях важное место занимает изучение водной взвеси, которая, в свою очередь, влияет на многие характеристики водных объектов. Среди них такие, как прозрачность и цветность воды, температура, состав растворенных соединений, а также структура и распределение донных отложений, скорость осадкообразования [1, 2]. Взвесью принято считать частицы разнообразного происхождения – терригенного, биогенного, вулканогенного, хемогенного, космогенного, пассивно взвешенные в воде и имеющие размеры от 0,5 мкм до 1 мм [3].

Цель данных исследований — экспериментальное определение среднего размера и средней концентрации частиц взвеси (в пробах воды микрокосма и озерах Алтайского края) оптическим методом флуктуаций прозрачности.

В настоящее время существует большое количество различных методов измерения параметров водной взвеси. Это методы фильтрации и сепарации, пробоотборников, оптической и электронной микроскопии, нефелометрический и турбидиметрический методы, из-

This article contains laboratory findings of particle size distribution of suspended solids in water samples from a microcosm (an experimental model of a closed natural ecosystem) and lakes of Altai Krai which have become available by means of the method of optical transparency fluctuations and a measuring and computing complex. A comparison of experimental data with measurements obtained by optical microscopy, which shows their satisfactory consent, was carried out.

Key words: transparency, suspension, concentration and particle size, fluctuations.

мерение объемной концентрации взвеси по пульсациям электропроводности морской воды и др. [4].

Оптический метод флуктуаций прозрачности относится к физическим способам анализа, применяемым в гидрооптике, гидробиологии, и предназначен для определения средней концентрации и среднего размера взвешенного в воде вещества. Он впервые был предложен К. С. Шифриным и развит в работе [5].

Метод флуктуаций прозрачности заключается в одновременном измерении прозрачности и дисперсии интенсивности светового потока при прохождении через слой воды, что позволяет определить средний размер и концентрацию частиц взвеси. Наблюдения по измерению прозрачности показывают, что если частиц в световом пучке сравнительно немного, то она испытывает заметные флуктуации. Данные флуктуации могут быть вызваны как случайными перемещениями частиц, так и направленным их движением.

Согласно работе [6], математически модель этого явления может быть представлена следующим образом. Рассматриваются проекции поперечника ослабления всех частиц, находящихся в освещенном объеме, на поперечное сечение падающего светового пучка S . Если обозначить через Y площадь пучка, свободную от проекций частиц, то интенсивность света, прошедшего

* Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131. «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения» и программы Президиума РАН 4.2 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири».

сквозь дисперсную систему, можно выразить соотношением $I = I_0 Y/S$, где I_0 — интенсивность падающего пучка. Таким образом, по данным измерений среднего значения и дисперсии случайной величины Y можно найти среднее значение интенсивности прошедшего света и ее дисперсию. Статистическая модель явления сводится, следовательно, к задаче о случайном бросании кругов на плоскость. Моменты этой случайной величины определяются при помощи известной теоремы Г. Робинса, вытекающей из общих свойств условных математических ожиданий, установленных А. Н. Колмогоровым.

Приведем окончательные формулы, описывающие сущность метода флуктуаций прозрачности, полученные К. С. Шифриным [5], и позволяющие определить средний поперечник ослабления света частицей s_0 и их концентрацию n через среднюю интенсивность I прошедшего через водную среду параллельного пучка света, дисперсию сигнала D и площадь сечения светового пучка S .

$$s_0 = \left(\frac{D}{I_0^2} \right) \left[\frac{S \cdot \tau}{\varphi(\tau)} \right], \quad (1)$$

$$\bar{n} = \frac{\tau}{l s_0}, \quad (2)$$

$$\tau = -\ln \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (3)$$

где $\varphi(\tau)$ — специальная функция, приведенная в [5]; τ — оптическая толщина дисперсной среды, I_0 — интенсивность светового потока, падающего на среду, l — длина пути в водной среде.

Используя вычисленные средние значения величин: $\frac{D}{I_0^2} = 2.66 \times 10^{-5}$; $\tau = 1.209$; $\varphi(\tau) = 1.3 \times 10^1$;

$S = 4.9 \text{ мм}^2$, получим значение поперечника ослабления света частицей $s_0 = 1.2 \times 10^{-4} \text{ мм}^2$. Так как в нашем случае параметр дифракции $\rho \gg 1$ (большие частицы) $\rho = 2\pi r/\lambda$, r — радиус частицы; λ — длина волны света в воде, можно записать

$$s_0 = 2\pi r^2, \quad (4)$$

следовательно,

$$r = \sqrt{\frac{s_0}{2\pi}}. \quad (5)$$

Для реализации метода флуктуаций прозрачности нами была разработана принципиальная схема (рис. 1) и создан измерительно-вычислительный комплекс.

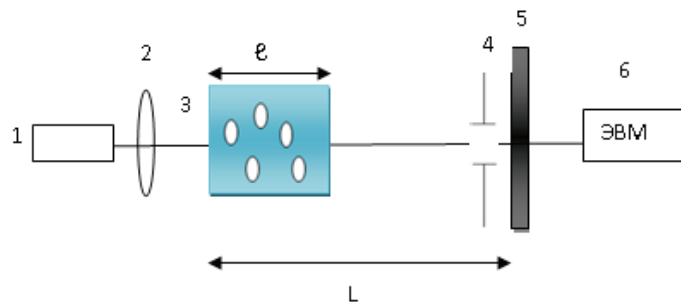


Рис. 1. Принципиальная схема измерительно-вычислительного комплекса:

1 — лазер; 2 — линза для создания параллельного пучка; 3 — кювета 30 мм с исследуемой водой; 4 — диафрагма; 5 — фотодиодная линейка; 6 — ЭВМ

В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны в вакууме $\lambda_0 = 0,64 \text{ мкм}$. Диаметр выходного лазерного пучка составлял 2,5 мм. Размер отверстия диафрагмы, помещенной перед фотодиодной линейкой и предназначенной для отсекаания рассеянного света, составлял 2 мм. Слаборасходящийся лазерный пучок с расходимостью порядка 10° направлялся в кювету с исследуемой жидкостью, оптический путь луча l в среде составлял 30 мм. Измерение интенсивности прошедшего излучения производилось с помощью фотодиодной линейки, сигнал с которой поступал на ЭВМ и обрабатывался специальной программой, разработанной в среде Lab View. Угол приема излучения равнялся 10° . Расстояние L от кюветы до приемной фотодиодной линейки составляло 550 мм.

С помощью данного комплекса измерялась интенсивность излучения лазера, прошедшего через кювету и падающего к ней под прямым углом.

Флуктуации частиц происходят преимущественно из-за броуновского движения, что обеспечивалось методикой эксперимента. Результаты проведенного расчета скорости седиментации и броуновского движения для частиц разных фракций с плотностью вещества, равной $1,01 \text{ г/см}^3$, представлены в таблице 1. Видно, что для частиц изучаемого размера гравитационным осаждением можно пренебречь.

Объектом исследования для градуировки комплекса и апробации метода служили практически монодисперсные частицы ликоподия, взвешенные в дистиллированной воде. Было проведено шесть серий измерений ин-

тенсивности прошедшего излучения, для каждой из них регистрировалось по 10 значений интенсивности с интервалом в 10 секунд. Среднее значение оптической толщины $\tau = 1,2$, что соответствует минимальному значе-

нию погрешности измерения. Подтверждением этому служит рисунок 2, который получен на основании результатов работы [5] (по оси абсцисс отложены значения τ в логарифмическом масштабе).

Таблица 1

Сравнение смещений, вызванных броуновским движением и гравитационным осаждением

Смещение за 1 секунду (мкм) в воде при 21°C		
Диаметр частиц (мкм)	Броуновское движение	Гравитационное осаждение
0,10	2,36	0.0005
0,25	1,49	0.00035
0,50	1,052	0.0014
1,0	0,745	0.0055
2,5	0,334	0.14
10,0	0,236	0.55

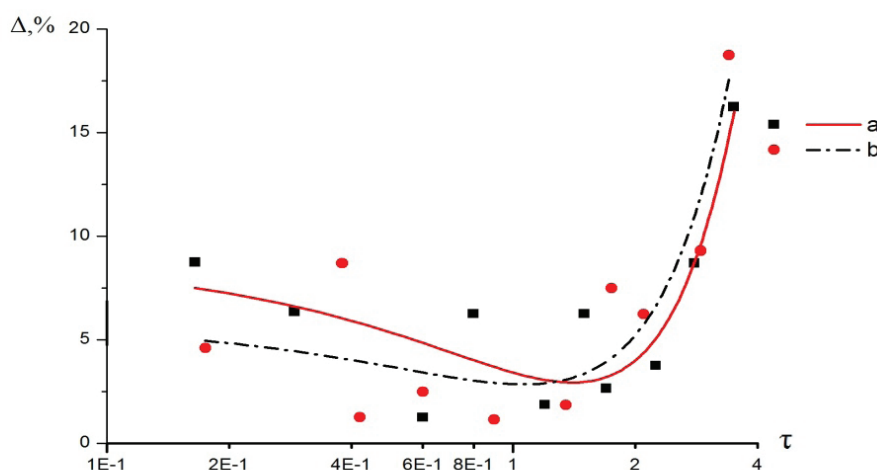


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерений размеров частиц Δ от оптической толщины τ для частиц ликоподия (1) и для частиц полистирола (2): а — экспериментальная погрешность для частиц ликоподия; б — полистирола

Мы учли, что на пути луча в экспериментальном комплексе присутствуют аэрозольные частицы, которые влияют на измеряемую величину. Нами был оценен вклад частиц аэрозоля, присутствовавших в установке. С помощью диффузионного спектрометра аэрозолей ДСА-21 определены их размеры и концентрации. Результат представлен на рисунке 3, на основании которого следует вывод, что наличие частиц аэрозоля в установке размерами более 200 нм может вносить заметную погрешность в измерения.

Средний размер частиц ликоподия, взвешенных в воде, определяется методом флуктуаций прозрачности через поперечник ослабления света частицей s_0 . По результатам этого эксперимента средний ради-

ус частиц составил 12,6 мкм, погрешность в определении размеров частиц ликоподия — 13%.

Полученный результат сравнивался с данными, полученными методом микроскопии, в соответствии с которым средний радиус данных частиц составил $14,5 \pm 2$ мкм. Фотографии частиц, полученных с помощью микроскопа при разных увеличениях, показаны на рисунке 4а–б.

После градуировки и апробации метода на установке были проведены измерения радиусов и концентрации частиц в микрокосме. Проведены четыре серии измерений интенсивности прошедшего через исследуемую среду излучения, в каждой из них регистрировалось по 10 значений с интервалом в 10 с.

Пробы брались с глубины 0,5 м и с поверхностного слоя. Были получены следующие результаты: средний радиус частиц на глубине 0,5 м равен 1,8 мкм, средний радиус частиц из проб, взятых с поверхности, — 2,4 мкм. Средняя концентрация частиц поверхностного слоя, определенная методом флуктуаций прозрачности, составляла $\bar{n} = 2.9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, а придонного

слоя — $\bar{n} = 1.9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Погрешность в определении средних радиусов составила 30–50%. Было получено, что для частиц диаметром 20–40 мкм погрешность измерения с использованием метода флуктуаций прозрачности составляет 6–13%, для частиц, размеры которых менее 20 мкм, погрешность — 30–50% [5].

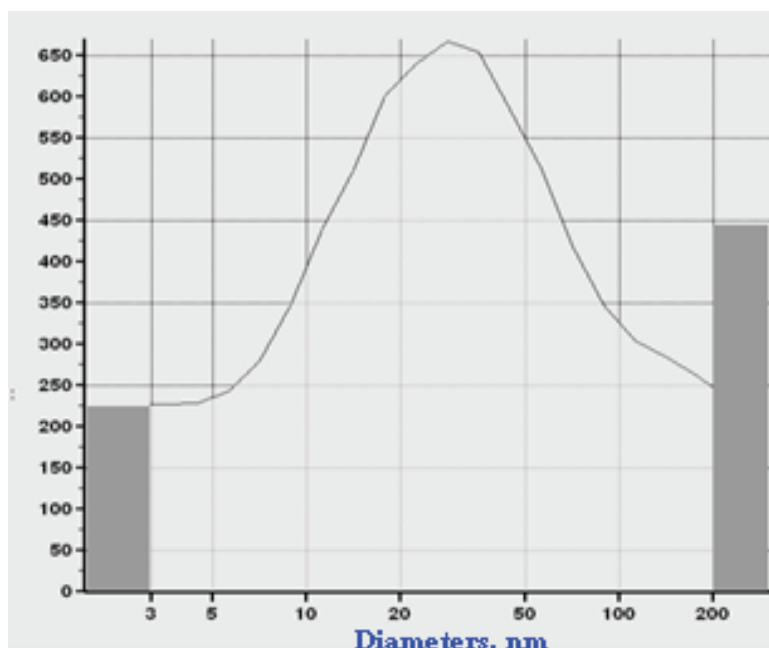


Рис. 3. Распределение частиц аэрозоля по диаметру

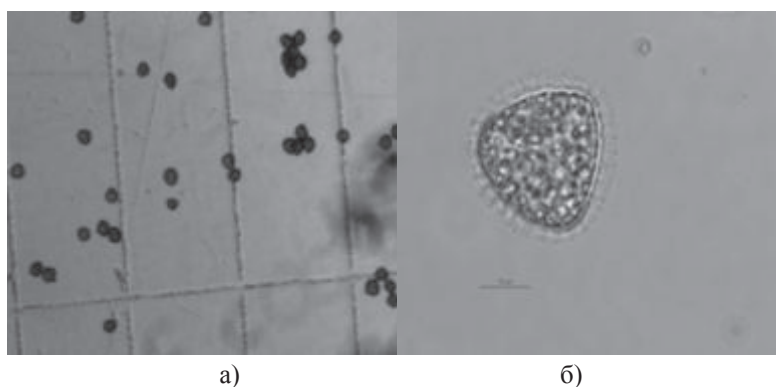


Рис. 4. Фото частиц ликоподия в камере Нажотта

Размеры и концентрации взвешенных частиц озер Алтайского края

Таблица 2

Название озера	Метод флуктуаций		Метод оптической микроскопии	
	средний радиус частиц, мкм	счетная концентрация, см — 3	средний радиус частиц, мкм	счетная концентрация, см — 3
Лапа	3,8	$1,2 \cdot 10^5$	1,7	$2,2 \cdot 10^5$
Красиловское	3,6	$4 \cdot 10^5$	2,4	$3 \cdot 10^5$
Бол. Островное	4	$2,6 \cdot 10^5$	2,3	$5 \cdot 10^5$

При помощи оптического метода флуктуаций прозрачности были определены средний радиус и счетная концентрация частиц водной взвеси для трех разнотипных озер Алтайского края. Приведены результаты для проб, отобранных в мае 2013 г. Для каждой отдельной пробы было проведено три серии измерений, в каждой серии регистрировалось по 10 значений интенсивности с интервалом в 10 с. Результаты сравнивались с методом оптической микроскопии. Размеры и концентрации частиц водной взвеси приведены в таблице 2.

Анализ результатов экспериментов показал, что разработанный измерительно-вычислительный комплекс, основанный на оптическом методе флуктуаций про-

зрачности, позволяет определить концентрацию и средний размер частиц водной взвеси. Он представляет широкие возможности для сопоставления оптических характеристик как модельных, так и природных экосистем, а также для оценки качества воды. Метод обладает следующими преимуществами: возможность применения для экспресс-анализа концентрации и размеров частиц *in situ*, а также относительная простота конструкции приборов для его реализации.

Авторы выражают благодарность аспиранту лаборатории водной экологии ИВЭП СО РАН О. С. Сутченковой за предоставленные фотографии частиц водорослей фитопланктона.

Библиографический список

1. Лисицын А. П. Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция «живого водосбора» // Система Белого моря. Т. I: Природная среда водосбора Белого моря. — М., 2010.

2. Лисицын А. П., Шевченко В. П. Гидрооптика и взвесь арктических морей // Оптика атмосферы и океана. — 2000. — Т. 13, № 1.

3. Лисицын А. П. Осадкообразование в океанах. Количественное распределение осадочного материала. — М., 1974.

4. Антоненков Д. А. Особенности применения различных методов исследования размерного состава и концентрации взвешенного в воде вещества. — Севастополь, 2009.

5. Шифрин К. С. Введение в оптику океана. — Л., 1983.

6. Шифрин К. С., Мороз Б. З., Сахаров А. Н. // ДАН СССР. — 1971. — Т. 199, № 3.