

Структура взвеси в озере Байкал по измерениям индикатрис рассеяния света

По индикатрисам рассеяния света, измеренным в оз. Байкал, рассчитаны характеристики взвеси: массовая концентрация и численность частиц минеральной и биологической фракций, их средний радиус, параметр дисперсности минеральных частиц. Получены данные о вертикальном распределении характеристик взвеси в разных районах озера в летний период. Проведено сравнение характеристик взвеси в зонах подъема и опускания вод в оз. Байкал и Индийском океане, показавшее ее одинаковый специфический состав.

Ключевые слова: индикатриса рассеяния, обратные задачи, взвесь.

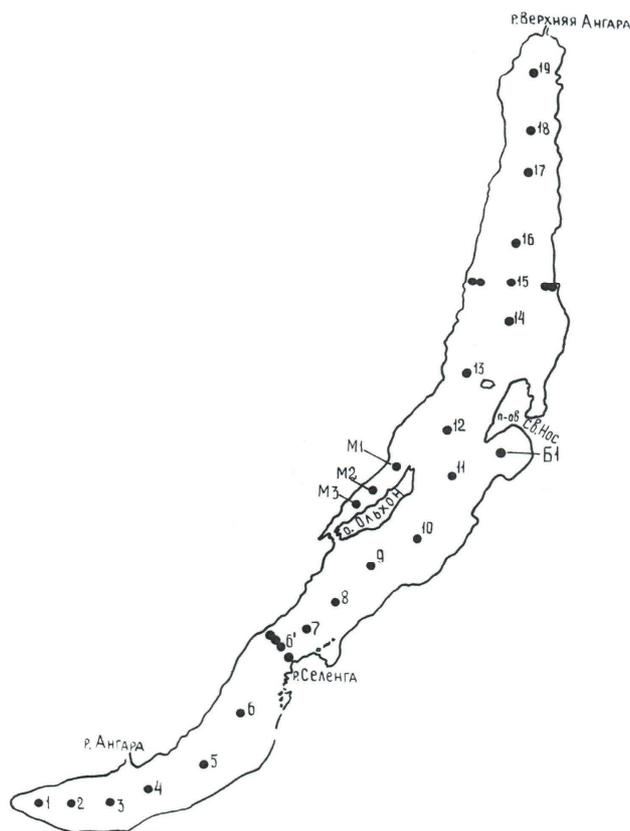
Введение

Индикатрисы рассеяния света содержат информацию о параметрах дисперсной среды, которые можно определить, решая обратные задачи светорассеяния. Процедура обращения характеристик светорассеяния упрощается при решении так называемых ограниченных обратных задач [1]. При решении таких задач используют показатели рассеяния света в данном направлении $\sigma(\theta)$, содержащие информацию о концентрации частиц в воде. Выбор оптимальных углов θ зависит от размера частиц – чем больше их радиус, тем меньше этот угол.

В работе приводятся результаты определения характеристик взвеси в водах оз. Байкал, полученных по измерениям индикатрис рассеяния света с использованием формул для обратных задач из работ [2, 3].

Время и районы измерений

Измерения индикатрис рассеяния света на оз. Байкал были выполнены в 1979 г. во время экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин», проведенной Лимнологическим институтом (СО АН СССР, г. Иркутск) совместно с Морским гидрофизическим институтом (МГИ АН УССР, г. Севастополь). В период 11 июля – 1 августа экспедицией выполнено 20 станций на основном разрезе, проходившем по средней линии озера, ряд станций на поперечных разрезах через озеро и 3 станции на разрезе через пролив Малое море. На рис. 1 показано расположение станций, на которых измерялись индикатрисы рассеяния света.



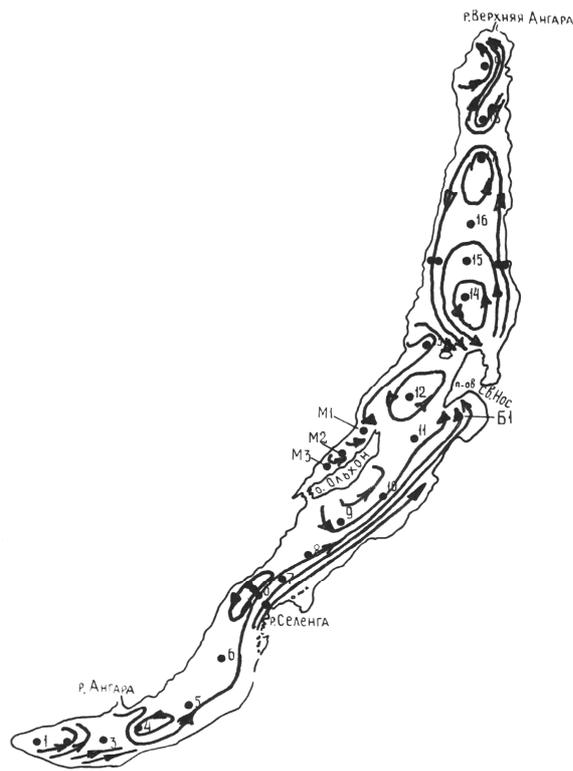
Р и с. 1. Положение станций, на которых проводились измерения индикатрис рассеяния света

Состояние вод озера

Гидрологическая ситуация в оз. Байкал в период наблюдений была неоднородной. В Южном и Среднем Байкале, в Малом море и в небольшой части Северного Байкала, около устья р. Верхняя Ангара, поверхностные слои уже были значительно прогреты и хорошо стратифицированы. Толщина прогретого слоя с температурой воды выше 6°C составляла 10 – 15 м. Наиболее прогретыми, до 15°C на поверхности, были воды в районе устья р. Селенги. Поступая в озеро, они обусловили этот локальный максимум. Холодной и слабо стратифицированной оставалась большая часть северной котловины озера. В соответствии со степенью прогрева воды в разных фазах развития находился фитопланктон: его концентрация значительно возрастала в прогретых водах, что отражалось на оптических характеристиках вод. На рис. 2 показано распределение по осевой линии озера температуры воды на поверхности, прозрачности воды по белому диску и концентрации хлорофилла на глубине 0 м. В Малом море эти показатели составили: на ст. М1 $Z_d = 7$ м, $C_{\text{chl}} = 1,41$ мг/л; на ст. М2 и М3 $Z_d = 6$ м.



Р и с. 2. Распределение характеристик поверхностных слоев воды на продольном разрезе через озеро



Р и с. 3. Схема циркуляции вод в поверхностном слое (0 – 25 м) в период измерений

На рис. 3 приведена схема циркуляции вод в озере в период наблюдений, составленная сотрудником Лимнологического института М.Н. Шимараевым на основе анализа распределения температуры воды. При общей циклонической циркуляции, охватывающей все озеро, в разных районах имелись локальные циклонические вихри. Особенно они были развиты в северной части Байкала.

Аппаратура и методика измерений

Измерения индикатрис рассеяния света проводились нефелометром, разработанным в отделе оптики Морского гидрофизического института [4]. Технические характеристики образца, использованного в измерениях на оз. Байкал, следующие.

Углы измерений, град	2; 7,5; далее через 5 до 162,5
Расходимость пучка света, град	1,07
Угол зрения фотоприемника, град	1,07
Спектральная область измерений, нм	520 ± 40
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$, %	10
Время измерения индикатрисы, мин	7
Глубина погружения, м	250
Режим работы	Автоматический

Измерения индикатрис выполнялись на глубинах 5, 25, 50, 150 м. На каждой глубине индикатриса измерялась 2 – 4 раза, для расчетов брались средние значения.

Необходимые для расчетов по формулам из работ [2, 3] показатели рассеяния на углах менее 2° находились путем экстраполяции индикатрисы в эту область по формуле $\lg \sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для этого использовались три экспериментальные точки: $\sigma(2^\circ)$, $\sigma(7,5^\circ)$, $\sigma(12,5^\circ)$.

Показатели рассеяния в настоящей работе приводятся при десятичном основании.

Расчетные формулы

Работа [2]. В данной работе проводилось обращение индикатрис рассеяния в морской воде с использованием для крупной взвеси метода малых углов, для мелкой взвеси – метода подбора по моделям рассеяния частицами с распределением их численности по закону Юнге $N_{\text{взв}} \sim r^{-\gamma}$. Взвесь разбита на три фракции с радиусами частиц: $r = 0,2 - 0,5$ мкм (минеральные), $r = 0,5 - 1,0$ мкм (минеральные), $r > 1,0$ мкм (органические). Для длины волны 546 нм получены параметры регрессии между угловыми показателями рассеяния $\sigma(\theta)$ и содержанием частиц y : $y = m\sigma(\theta) + n$.

При расчетах весовой концентрации для минеральных частиц плотность принималась равной 2 г/см^3 , для органических – 1 г/см^3 . Оптимальные коэффициенты регрессии m , n и среднеквадратические относительные ошибки δy приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Оптимальные значения коэффициентов регрессии $y = m\sigma(\theta) + n$

Радиус частиц r , мкм	Угол рассеивания θ°	Численность частиц N , млн. шт./л			Массовая концентрация C , мг/л		
		m	n	δN	m	n	δC
0,2 – 0,5	1,0	$6,9 \cdot 10^4$	-1,0	0,29	$2,05 \cdot 10^4$	-3,0	0,16
0,5 – 1,0	6,0	21,9	0,2	0,14	55,3	0,5	0,14
> 1,0	45,0	0,46	0,3	0,35	27,6	16,0	0,20

Работа [3]. Формулы для определения параметров взвеси получены по расчетам модельных индикатрис рассеяния морской взвесью. Численность мелких (минеральных) частиц с радиусами 0,2 – 1,0 мкм задавалась распределением Юнге $N_{\text{мел}} \sim r^{-\gamma}$ с параметром дисперсности $\gamma = 2,5 - 6,0$. Распределение численности крупных (биологических) частиц $N_{\text{круп}}$ описывалось логарифмически-нормальным законом.

В результате расчетов индикатрис рассеяния при различном составе взвеси для длины волны 546 нм применительно к обеим фракциям взвеси получено общее соотношение

$$\xi = A\{B - \lg[\sigma(\theta_1)/\sigma(\theta_2)]\}^P + C \lg[\sigma(\theta_1)/\sigma(\theta_2)] + D, \quad (1)$$

которое позволяет в зависимости от коэффициентов A , B , C , D , P по измеренным значениям $\sigma(\theta_1 = 15^\circ)$ и $\sigma(\theta_2 = 90^\circ)$ определить параметр дисперсности γ и объемную концентрацию мелких частиц, а по измеренным значениям $\sigma(\theta_1 = 0,5^\circ)$ и $\sigma(\theta_2 = 2,0^\circ)$ – средний размер крупных частиц и их объемную концентрацию. При пересчете объемной концентрации взвеси в весовую плотность вещества минеральных частиц принята равной 2 г/см^3 , биологических – 1 г/см^3 .

Коэффициенты формулы (1) определяются по специальной таблице для двух ситуаций в зависимости от величины параметра $\lg[\sigma(15^\circ)/\sigma(90^\circ)]$.

Ошибки определения параметров взвеси (методическая плюс приборная), рассчитанные в [3] с учетом погрешности оптических измерений 10%, составляют: параметр γ – в пределах 10 – 20%; объемная концентрация мелкой взвеси $C_{\text{мел}}$ – до 30%; объемная концентрация крупной взвеси $C_{\text{круп}}$ и средний радиус частиц при $\langle r_{\text{круп}} \rangle$ менее 10 мкм – до 30%, при $\langle r_{\text{круп}} \rangle$ более 10 мкм – до 60%.

Параметр распределения γ , определенный по формуле (1), позволяет рассчитать средний радиус частиц мелкой взвеси $\langle r_{\text{эф}} \rangle$, используя принятые в модели пределы изменения их радиусов: $r_{\text{min}} = 0,02$ мкм, $r_{\text{max}} = 2,0$ мкм. Расчеты ведутся по формуле

$$\langle r_{\text{эф}} \rangle = [(\gamma - 1)/(\gamma - 2)](r_{\text{max}}^{2-\gamma} - r_{\text{min}}^{2-\gamma}) / (r_{\text{max}}^{1-\gamma} - r_{\text{min}}^{1-\gamma}). \quad (2)$$

Валидация расчетных формул

Расчетные формулы в работах [2, 3] получены для длины волны 546 нм. Измерения индикатрис рассеяния света нефелометром проводились в спектральной области 520 ± 40 нм. В связи с этим необходимо было выяснить, как будут «работать» расчетные формулы применительно к данному нефелометру. Для этого было проведено сопоставление результатов, полученных оптическим и весовым методами.

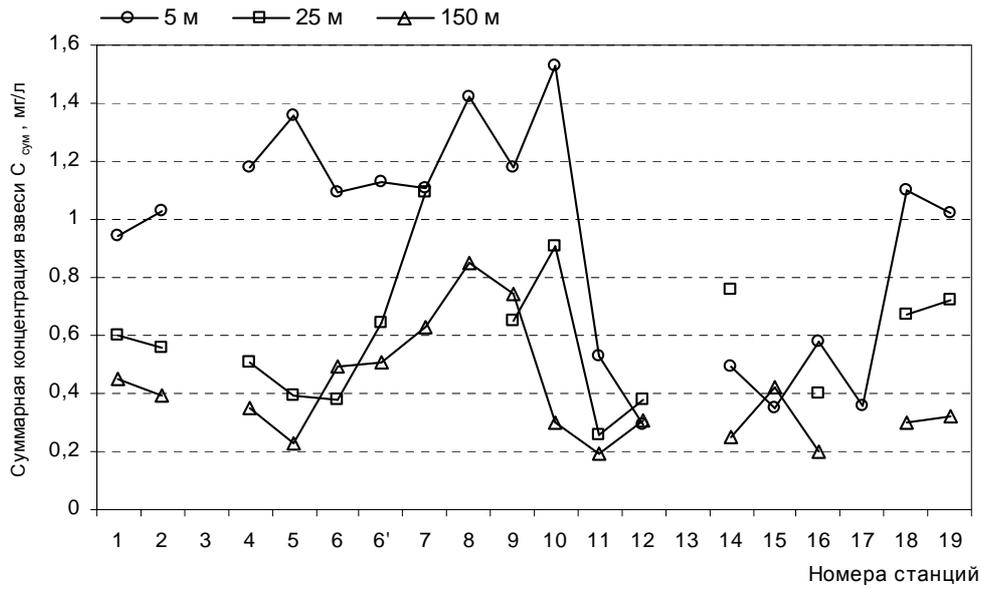
Для определения концентрации взвеси весовым методом одновременно с измерением индикатрис на тех же глубинах отбирались пробы воды. Анализ проб весовым методом был выполнен сотрудником Лимнологического института Е.Н. Тарасовой. По результатам измерений в 25 пробах, концентрация взвеси в которых изменялась в пределах $C_{\text{аан}} = 0,40 - 1,25$ мг/л, было рассчитано отношение $K_{\text{эф}} = \tilde{N}_{\text{аан}} / \tilde{N}_{\text{опт}} :$ по формулам из работы [2] $\hat{E}_{\text{эф}} = 1,058$, по формулам из [3] $\hat{E}_{\text{эф}} = 1,093$. Вследствие незначительной разницы в данных, полученных оптическим и весовым методами, было решено коррекцию оптических данных не проводить.

С учетом валидации расчетных формул в настоящей работе для определения массовой концентрации и численности частиц разных фракций использовались формулы из работы [2]. По формулам из работы [3] определялся средний радиус крупных и мелких частиц и параметр γ дисперсности мелких частиц.

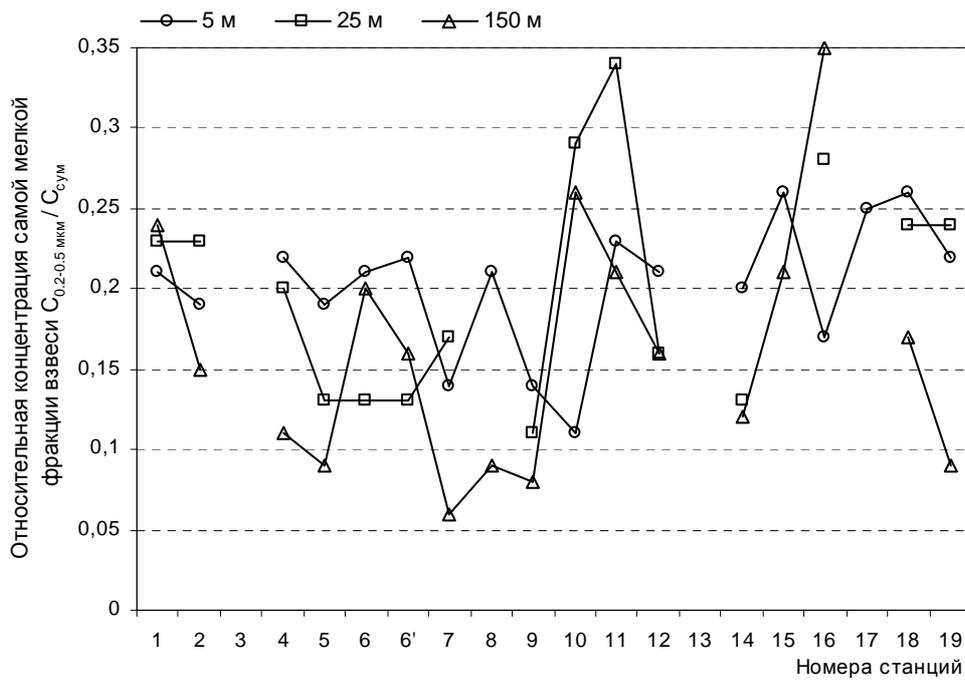
Результаты и их обсуждение

Массовая концентрация взвеси. На рис. 4 – 6 показано распределение на продольном разрезе через оз. Байкал суммарной концентрации взвеси и относительного содержания в ней мелких фракций на глубинах 5, 25, 150 м.

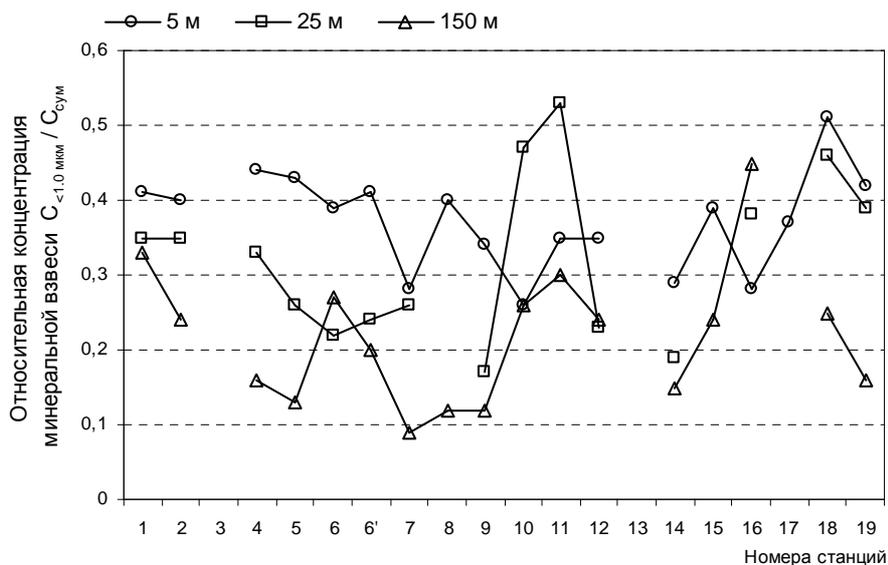
На глубине 5 м наблюдались наиболее высокие значения концентрации суммарной взвеси: $C_{\text{пoi.5i}} = 0,29 - 1,53$ мг/л. Минимальные значения зарегистрированы в холодных водах северной части Байкала, максимальные – в прогретых водах южной и средней частей, в которых происходило цветение планктона. Концентрация взвеси тесно коррелировала с температурой воды на поверхности. Количественно это выразилось формулой $C_{\text{пoi.5i}} = 0,17^{1,028}$, коэффициент корреляции $R = 0,786$.



Р и с. 4. Распределение на продольном разрезе через озеро суммарной концентрации взвеси на разных глубинах



Р и с. 5. Распределение на продольном разрезе через озеро относительной концентрации во взвеси фракции с радиусами частиц 0,2 – 0,5 мкм



Р и с. 6. Распределение на продольном разрезе через озеро относительной концентрации во взвеси фракции с радиусами частиц менее 1 мкм

На глубине 25 м концентрация взвеси в целом была значительно меньше, чем на глубине 5 м: $C_{\text{п}0\text{i}.25\text{i}} = 0,26 - 1,09$ мг/л. Концентрации взвеси на глубине 5 и 25 м коррелировали слабо.

На глубине 150 м концентрация взвеси на большинстве станций была менее 0,5 мг/л (минимальная величина 0,19 мг/л). Только на ст. 7 – 9 она была выше 0,5 мг/л, максимальное значение $C_{\text{п}0\text{i}.150\text{i}} = 0,85$ мг/л наблюдалось на ст. 8.

По данным Е.Н. Тарасовой, микроскопический анализ взвеси на фильтрах в пробах с глубин 5 и 150 м на ст. 8, выполненный гидробиологами Лимнологического института, показал наличие в обоих случаях большого количества створок диатомовой водоросли *synedra*. То есть повышенная концентрация взвеси на глубине 150 м на ст. 8 может быть объяснена обильным цветением в поверхностных прогретых водах водоросли *synedra*, оболочки которой при осаждении не успевали полностью разрушиться, создавая в глубинных слоях повышенную концентрацию взвеси.

Очевидно, таким же цветением *synedra* в поверхностных водах можно объяснить высокую концентрацию взвеси на глубине 150 м на соседних станциях 7 и 9.

Обилие клеток *synedra* имелось во взвеси с глубин 10 и 50 м на ст. 10. Концентрация взвеси на этих глубинах составила $C_{\text{п}0\text{i}.10\text{i}} = 1,53$ мг/л, $C_{\text{п}0\text{i}.50\text{i}} = 1,05$ мг/л. Однако такой же, как на ст. 8 и 9, повышенной концентрации взвеси на глубине 150 м здесь не наблюдалось, она составила $C_{\text{п}0\text{i}.150\text{i}} = 0,30$ мг/л.

На ст. 10 были проведены измерения индикатрис в пробах воды, взятых с глубин 500 и 1000 м. Концентрация взвеси в этих пробах была значительно выше, чем на глубине 150 м: $C_{\text{п}0\text{i}.500\text{i}} = 0,53$ мг/л, $C_{\text{п}0\text{i}.1000\text{i}} = 0,69$ мг/л. В пробах, взятых повторно с этих глубин, весовым методом были получены значения такого же порядка: $C_{\text{п}0\text{i}.500\text{i}} = 0,45$ мг/л, $C_{\text{п}0\text{i}.1000\text{i}} = 0,85$ мг/л.

По данным о рассеянии света, во взвеси на глубинах 500 и 1000 м преобладала органическая фракция, относительное содержание которой $\tilde{N}_{\text{ид}a} / \tilde{N}_{\text{п}0\text{i}}$ составляло: на глубине 500 м – 0,91, на глубине 1000 м – 0,87.

Микроскопический анализ осадков на фильтрах дал следующую характеристику: на глубине 500 м – фон минеральный, остатки клеток диатомовых (*synedra*, *melosira*), на глубине 1000 м – аморфный осадок.

Такой эффект в вертикальном распределении взвеси объясняется наличием в озере на больших глубинах слоев с пониженной прозрачностью, содержащих большое количество взвешенных частиц, состоящих из остатков биоты и продуктов ее жизнедеятельности. Подобные слои наблюдались визуально при погружениях в Байкале на глубоководных аппаратах «Пайсис» и «Мир». Взвесь в этих слоях в свете прожектора выглядит как мелкие снежинки, поэтому она получила название «лимнический снег». Глубоководные слои пониженной прозрачности фиксировались также инструментально при измерениях вертикального распределения показателя ослабления направленного света [5].

Относительное содержание минеральной фракции в суммарной взвеси $C_{\text{и}e\text{f}.\text{i}0\text{i}} = \tilde{N}_{\text{и}e\text{f}} / \tilde{N}_{\text{п}0\text{i}}$ на разных глубинах колеблется в широких пределах – от 0,09 до 0,51. Определенной связи с концентрацией взвеси на глубине 5 м не наблюдается. В среднем этот параметр с увеличением глубины уменьшается. Исключение составляет ст. 16, на которой наблюдалась обратная картина. Эта станция, согласно схеме циркуляции вод в период наблюдений, находилась в зоне опускания вод. Аналогичная картина, по данным [3], наблюдалась в зоне опускания вод в Индийском океане, о чем более подробно будет сказано ниже.

В табл. 2 приведены средние значения $C_{\text{и}e\text{f}.\text{i}0\text{i}}$ на продольном разрезе.

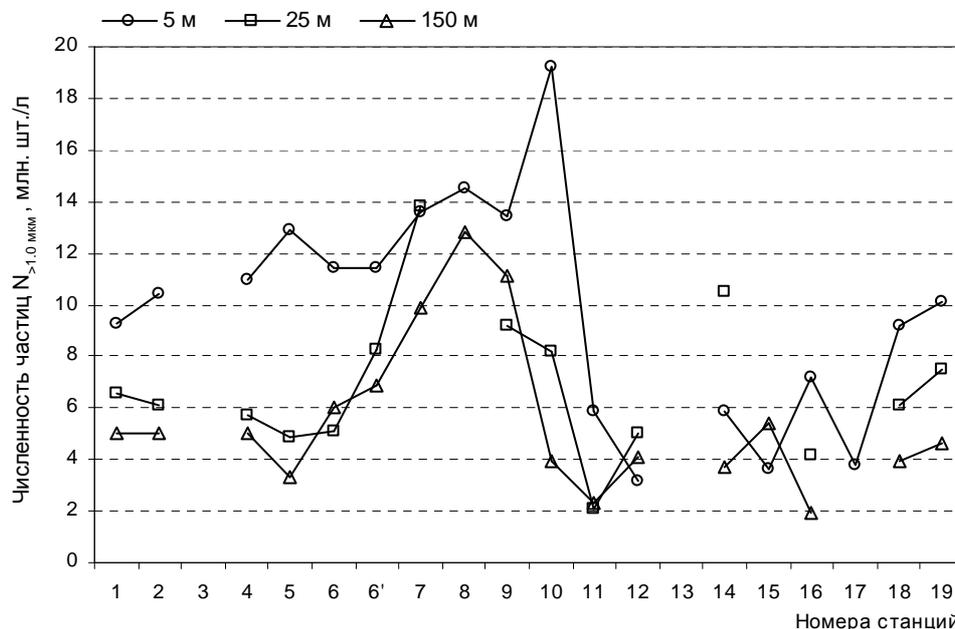
Т а б л и ц а 2

Относительное содержание в суммарной взвеси минеральной фракции

Глубина H , м	$\langle C_{\text{мин. отн}} \rangle$	
	Все станции разреза, кроме ст. 16	Станция 16
5	0,38	0,28
25	0,32	0,38
150	0,20	0,45

Численность частиц. Распределение на продольном разрезе численности частиц в разных ее фракциях представлено на рис. 7 – 9. Численность биологических

гических частиц на всех глубинах тесно коррелирует с распределением суммарной взвеси. Довольно тесная корреляция с суммарной взвесью на глубинах 5 и 25 м наблюдается и в численности минеральных частиц. На глубине 150 м согласованное изменение численности минеральных частиц и концентрации взвеси наблюдалось лишь на ст. 1 – 6, на других станциях связь практически отсутствовала.



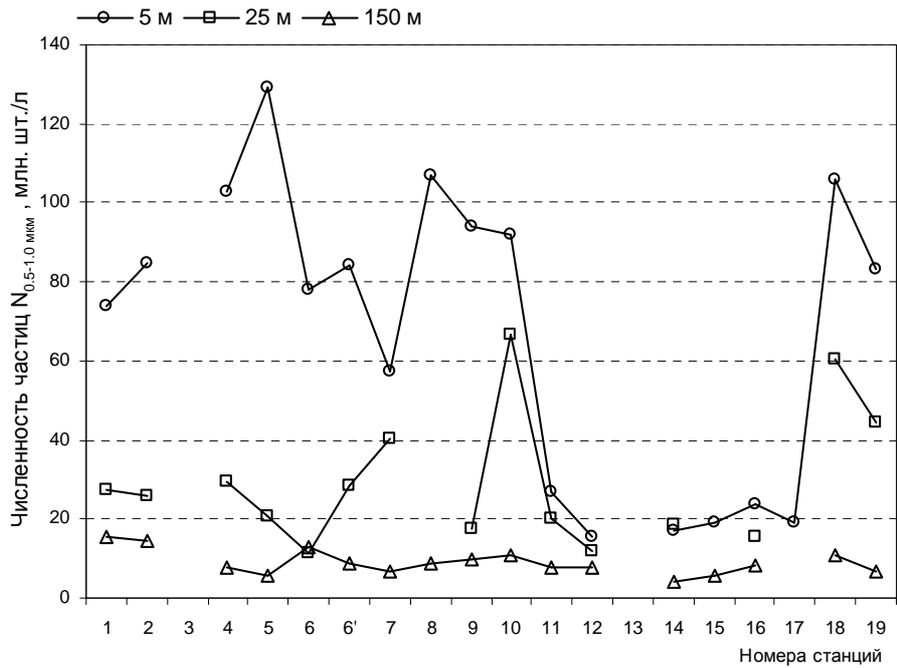
Р и с. 7. Распределение на продольном разрезе через озеро численности биологических частиц с радиусами более 1 мкм

В табл. 3 приведены данные для разных глубин о средней численности частиц и их относительном содержании в единичной концентрации взвеси. На всех глубинах основная численность частиц приходится на самую мелкую фракцию взвеси с радиусами 0,2 – 0,5 мкм. У биологической и минеральной фракций наблюдается разная закономерность изменчивости с глубиной относительной численности частиц на единичную концентрацию взвеси: для биологических частиц она увеличивается, для минеральных – уменьшается.

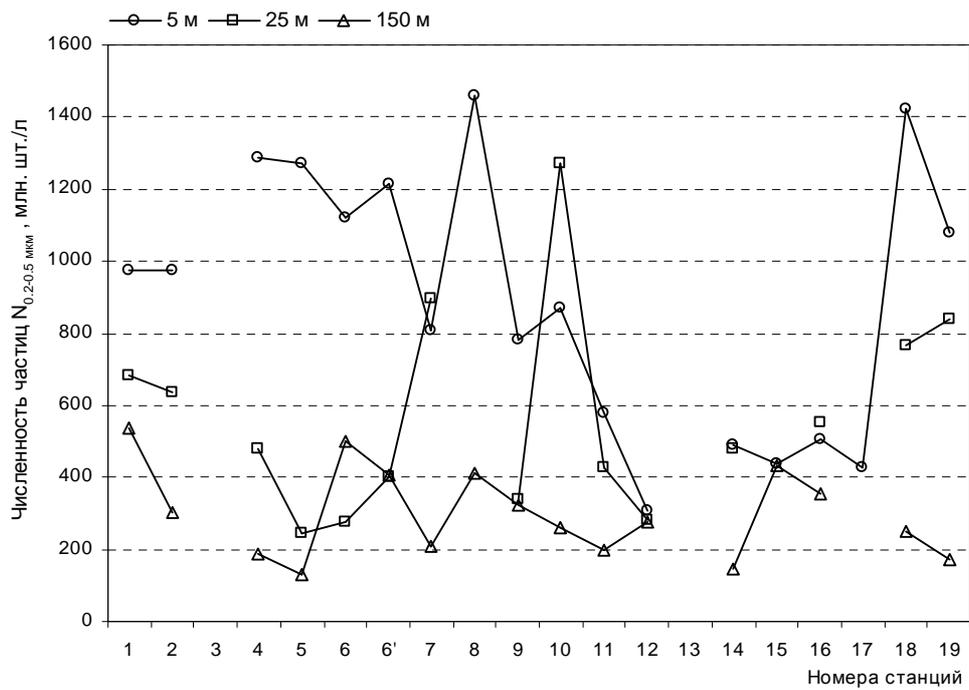
Т а б л и ц а 3

Численность частиц разных фракций и относительное содержание биологических и минеральных частиц в единичной концентрации взвеси

H, м	$\langle N_{\text{био}} \rangle$, млн.шт./л	$\langle N_{\text{мин}}(0,5 - 1,0) \rangle$, млн.шт./л	$\langle N_{\text{мин}}(0,2 - 0,5) \rangle$, млн.шт./л	$\langle N_{\text{био}}/C_{\text{сум}} \rangle$, млн.шт./мг	$\langle N_{\text{мин}}/C_{\text{сум}} \rangle$, млн.шт./мг
5	9,8	75,0	916	9,2	1070
25	6,9	29,9	564	11,5	990
150	5,6	9,3	279	13,8	710

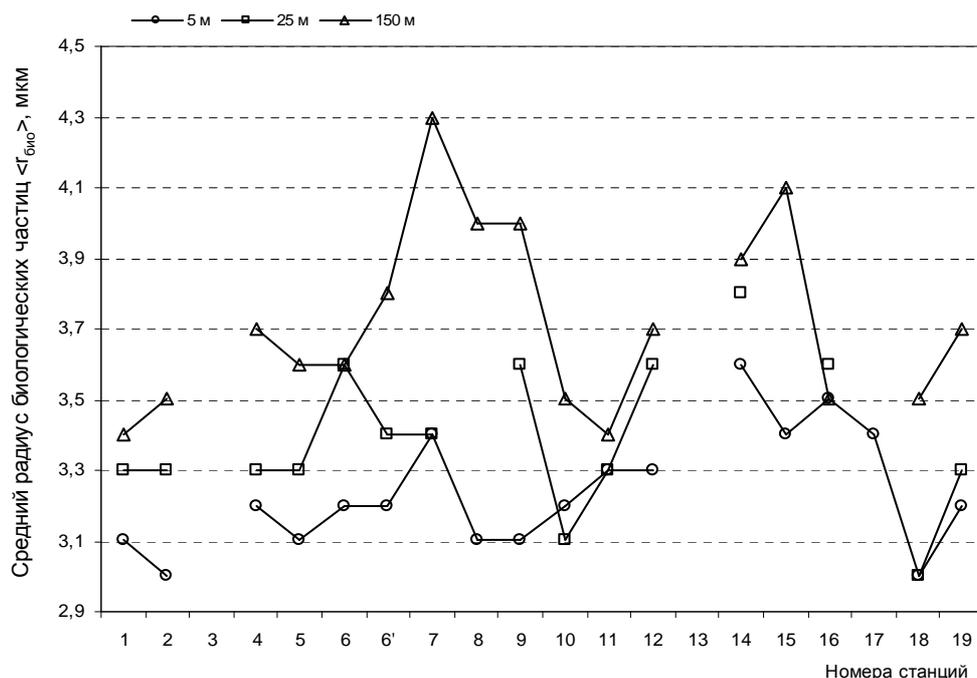


Р и с. 8. Распределение на продольном разрезе через озеро численности минеральных частиц с радиусами 0,5 – 1,0 мкм



Р и с. 9. Распределение на продольном разрезе через озеро численности минеральных частиц с радиусами 0,2 – 0,5 мкм

Средний размер частиц и параметр дисперсности мелких частиц γ . На глубине 5 м средний радиус крупных (биологических) частиц на продольном разрезе изменялся в пределах $\langle r_{\text{дет}} \rangle = 3,0 - 3,6$ мкм (рис. 10). В распределении этого параметра проявляется закономерность: его величина ниже в водах с более высокой концентрацией взвеси, т. е. фитопланктона. При концентрации взвеси более 0,7 мг/л средний размер частиц составил $\langle r_{\text{дет}} \rangle = 3,15$ мкм, при концентрациях менее 0,7 мг/л $\langle r_{\text{дет}} \rangle = 3,40$ мкм. Такая закономерность уменьшения размеров частиц фитопланктона в водах высокой трофности известна в гидробиологии.



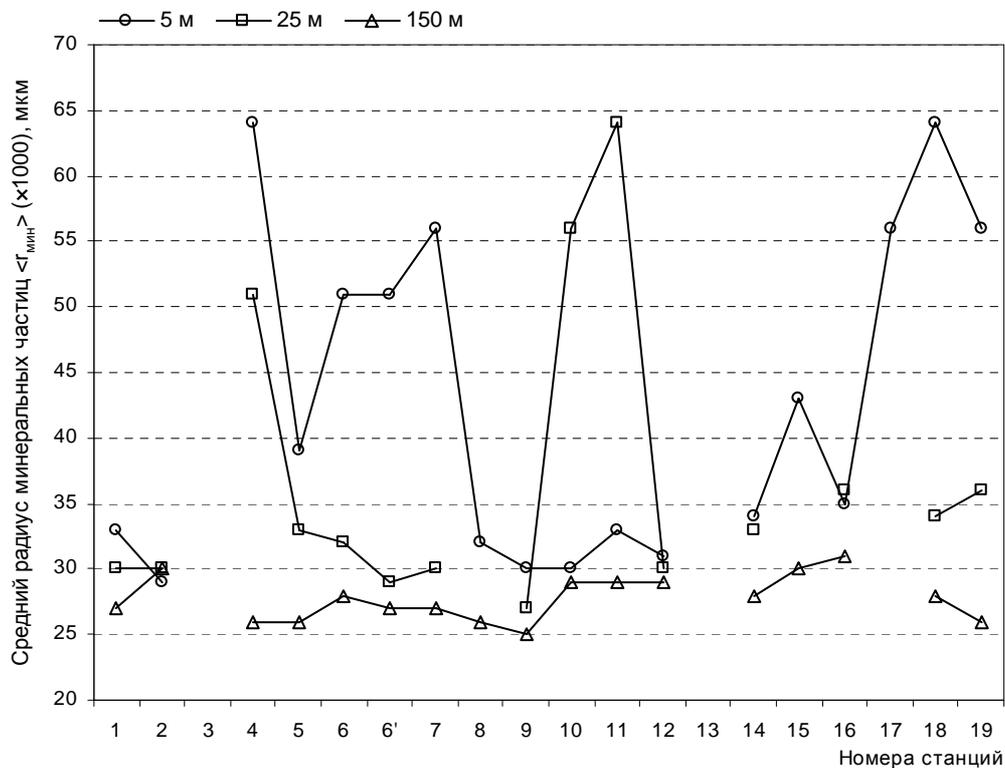
Р и с. 10. Распределение на продольном разрезе через озеро среднего радиуса биологических частиц

Характерным явлением, наблюдавшимся на всех станциях, было увеличение с глубиной среднего радиуса биологических частиц. Наибольшее изменение с глубиной $\langle r_{\text{дет}} \rangle$ наблюдалось на ст. 7 – 9: на ст. 7 – с 3,4 мкм на глубине 5 м до 4,3 мкм на глубине 150 м, на ст. 8 и 9 – с 3,1 до 4,0 мкм. Осредненные по всем станциям значения этого параметра для разных глубин приведены в табл. 4.

**Средний размер частиц разных фракций
и параметр дисперсности γ минеральных частиц на разрезе**

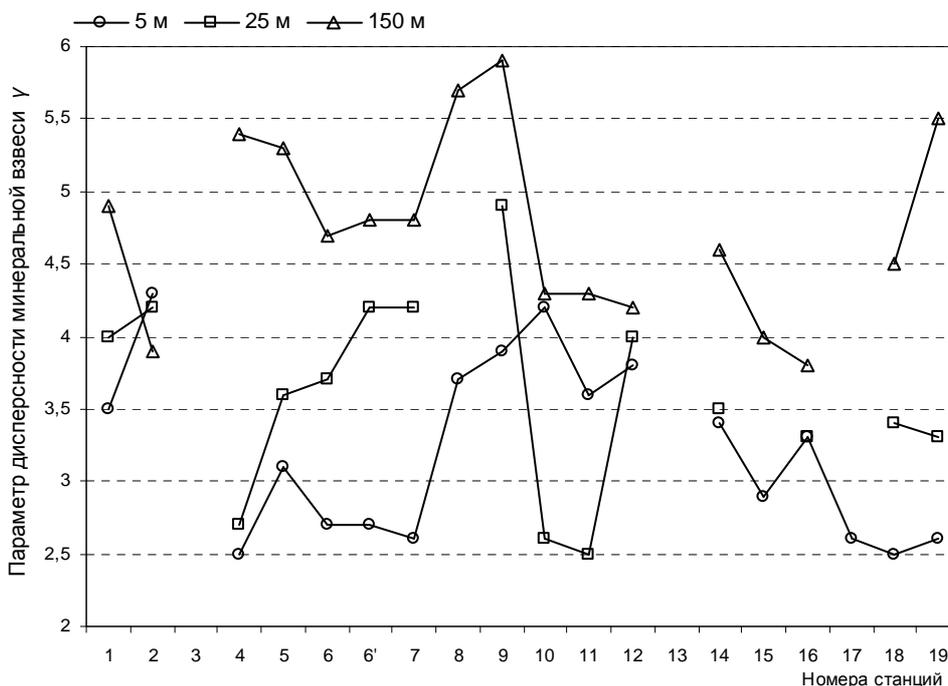
H , м	$\langle r_{\text{био}} \rangle$, МКМ	$\langle r_{\text{мин}} \rangle$, МКМ	$\langle r_{\text{мин}} \rangle$, МКМ	$\langle \gamma \rangle$	$\langle \gamma \rangle$
	Все станции	Кроме ст. 10 и 11	Станции 10 и 11	Кроме ст. 10 и 11	Станции 10 и 11
5	3,3	0,042	0,032	3,2	3,9
25	3,4	0,037	0,060	3,6	2,6
150	3,7	0,028	0,029	4,7	3,4

В распределении среднего радиуса минеральных частиц (рис. 11) на глубине 5 м наблюдается большая изменчивость, причем во многих случаях не связанная с изменением концентрации взвеси. Очевидных причин такого характера изменчивости установить не удалось. При увеличении глубины значение $\langle r_{\text{биог}} \rangle$ уменьшается. Исключение составляют ст. 10 и 11, на которых средний радиус минеральных частиц на глубине 25 м резко увеличивается. Чем была вызвана такая «аномалия», не выяснено.



Р и с. 11. Распределение на продольном разрезе через озеро среднего радиуса минеральных частиц

Параметр дисперсности мелкой взвеси γ (рис. 12) также изменяется с глубиной – его значение возрастает в более глубоких слоях воды. Исключение, как и для $\langle r_{\text{мин}} \rangle$, составляют ст. 10 и 11 на глубине 25 м.



Р и с. 12. Распределение на продольном разрезе через озеро параметра дисперсности минеральных частиц γ (параметр Юнге)

Характеристики взвеси в проливе Малое море. В этом районе они такого же порядка, как и в прогретых водах на продольном разрезе через озеро. Поэтому их распределение на разрезе через пролив отдельно не рассматривается. В обобщенном виде они представлены в табл. 5.

Характеристики взвеси в оз. Байкал с разной температурой на поверхности. Они также приведены в табл. 5. Станции были разбиты на две группы – с температурой воды на поверхности более и менее 7°C . Видно, что параметры взвеси в водах с разной температурой на поверхности существенно отличаются в поверхностных (5 и 25 м) и глубинных (150 м) слоях. Для $\langle C_{\text{ief.ïoi}} \rangle$, $\langle r_{\text{aef}} \rangle$, $\langle r_{\text{ief}} \rangle$, $\langle \gamma \rangle$, $\langle N_{\text{aef}} / C_{\text{noi}} \rangle$, $\langle N_{\text{ief}} / C_{\text{noi}} \rangle$ изменения происходят в обратной зависимости, т. е. при увеличении (уменьшении) на глубинах 5 и 25 м они уменьшаются (увеличиваются) на глубине 150 м.

Параметры взвеси в районах озера Байкал с разной температурой воды на поверхности

Параметр	$T > 7^{\circ}\text{C}$ (7,3 – 15,5 $^{\circ}\text{C}$) $\langle T \rangle = 10,7^{\circ}\text{C}$			$T < 7^{\circ}\text{C}$ (4,1 – 6,0 $^{\circ}\text{C}$) $\langle T \rangle = 5,2^{\circ}\text{C}$			$T > 7^{\circ}\text{C}$	
	5 м	25 м	150 м	5 м	25 м	150 м	5 м	25 м
	Озеро Байкал, ст. 1 – 11, 18, 19			Озеро Байкал, ст. 12 – 17			Малое море, ст. М1 – М3	
$C_{\text{сум}}$, МГ/Л	0,53-1,42	0,26-1,09	0,19-0,85	0,29-0,58	0,38-0,76	0,20-0,42	1,06-1,56	0,52-0,74
$\langle C_{\text{сум}} \rangle$, МГ/Л	1,12	0,62	0,44	0,41	0,51	0,30	1,28	0,63
$C_{\text{мин.отн}}$	0,26-0,51	0,17-0,53	0,09-0,33	0,28-0,39	0,19-0,38	0,15-0,45	0,24-0,43	0,22-0,36
$\langle C_{\text{мин.отн}} \rangle$	0,39	0,34	0,20	0,34	0,27	0,27	0,37	0,30
$r_{\text{био}}$, МКМ	3,0-3,3	3,0-3,6	3,4-4,3	3,3-3,6	3,6-3,8	3,5-4,1	3,0-3,4	3,2-3,6
$\langle r_{\text{био}} \rangle$, МКМ	3,2	3,3	3,7	3,5	3,7	3,7	3,2	3,4
$r_{\text{мин}}$, МКМ	0,029-0,064	0,027-0,064	0,025-0,030	0,031-0,056	0,030-0,036	0,028-0,031	0,034-0,064	0,030-0,056
$\langle r_{\text{мин}} \rangle$, МКМ	0,044	0,038	0,027	0,040	0,033	0,030	0,047	0,041
γ	2,5-4,3	2,5-4,9	3,9-5,9	2,6-3,8	3,3-4,0	3,8-4,6	2,5-3,4	2,6-4,0
$\langle \gamma \rangle$	3,2	3,5	4,9	3,5	3,6	4,2	2,9	3,3
$N_{\text{био}}$, МЛН.ШТ./Л	5,9-19,2	4,9-13,8	3,3-12,8	3,2-7,2	4,2-10,5	1,9-5,4	10,3-20,3	5,7-9,9
$\langle N_{\text{био}} \rangle$, МЛН.ШТ./Л	11,7	7,0	6,1	5,0	6,6	3,8	14,2	7,7
$\langle N_{\text{био}} / C_{\text{сум}} \rangle$, МЛН.ШТ./МГ	10,4	11,3	13,9	12,2	12,9	12,7	11,1	12,2
$N_{\text{мин}}$, МЛН.ШТ./Л	610-1570	260-1340	140-540	320-500	290-570	150-440	990-1160	490-600
$\langle N_{\text{мин}} \rangle$, МЛН.ШТ./Л	1150	640	310	450	450	310	1080	550
$\langle N_{\text{мин}} / C_{\text{сум}} \rangle$, МЛН.ШТ./МГ	1030	1030	700	1100	880	1030	840	870

Характеристики взвеси на станции 10. Здесь наблюдались повышенные значения концентрации взвеси на больших глубинах – 500 и 1000 м. Кроме того, происходило необычное увеличение среднего радиуса и численности минеральных частиц на глубине 25 м. В связи с этим характеристики взвеси на этой станции представляют особый интерес (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Параметры взвеси на станции 10

Параметр	Глубина H , м						
	5	10	25	50	150	500	1000
$C_{\text{сум}}$, мг/л	1,53	1,55	0,91	1,05	0,30	0,53	0,69
$C_{\text{мин.отн}}$	0,26	0,44	0,47	0,14	0,26	0,09	0,13
$r_{\text{био}}$, мкм	3,2	2,9	3,1	4,0	3,5	4,0	3,9
$r_{\text{мин}}$, мкм	0,030	0,064	0,056	0,027	0,029	0,025	0,026
γ	4,2	2,5	2,6	5,1	4,3	6,0	5,4
$N_{\text{био}}$, млн.шт./л	19,2	14,7	8,2	15,4	3,9	8,2	10,3
$N_{\text{био}}/C_{\text{сум}}$, млн.шт./мг	12,5	9,5	9,1	14,7	13,0	15,5	14,9
$N_{\text{мин}}$, млн.шт./л	910	1375	1335	535	270	170	320
$\langle N_{\text{мин}} \rangle$, млн.шт./мг	595	885	1470	510	900	320	465

Сравнение с параметрами взвеси в других водоемах

Индийский океан. В работе [3] приводятся данные о структуре взвеси в водах Индийского океана, полученные по результатам обращения индикатрис рассеяния света, измеренных на двух станциях. Одна из них (ст. 740) располагалась в зоне южной тропической конвергенции (зона опускания вод в районе 77° в. д.), другая (ст. 765) – в зоне субэкваториальной дивергенции (зона подъема вод в районе 50° в. д.). Для сравнения в табл. 7 приведены данные о структуре взвеси в байкальских водах на ст. 16 (зона опускания) и на ст. 14 (зона подъема).

Сравнение показывает одинаковую закономерность основных изменений параметров взвеси с глубиной в водах Индийского океана и в оз. Байкал: при возрастании глубины средний размер биологических частиц увеличивается, а минеральных – уменьшается (параметр γ возрастает). Кроме того, следует отметить характерное различие состава взвеси в зонах опускания и подъема вод: как в Индийском океане, так и в оз. Байкал в зонах опускания на всех глубинах относительное содержание во взвеси минеральной фракции значительно больше, чем в зонах подъема.

**Параметры взвеси в зонах опускания и подъема вод
в Индийском океане и в озере Байкал**

Индийский океан					Озеро Байкал				
H , м	$C_{\text{сум}}$, мг/л	$C_{\text{мин.отн}}$	$\langle r_{\text{био}} \rangle$, мкм	γ	H , м	$C_{\text{сум}}$, мг/л	$C_{\text{мин.отн}}$	$\langle r_{\text{био}} \rangle$, мкм	γ
Станция 740. Опускание вод					Станция 16. Опускание вод				
0	0,39	0,23	3,9	4,2	5	0,58	0,28	3,5	3,4
50	0,35	0,37	3,8	4,4	25	0,40	0,38	3,6	3,3
200	0,14	0,43	4,3	4,7	150	0,20	0,45	3,5	3,8
Станция 765. Подъем вод					Станция 14. Подъем вод				
0	1,01	0,11	4,1	–	5	0,49	0,29	3,6	3,4
50	0,74	0,15	4,2	4,0	25	0,76	0,19	3,8	3,5
200	0,50	0,16	5,5	4,6	150	0,25	0,15	3,9	4,6

Черное море. Измерения индикатрис рассеяния света в Черном море (северная часть глубоководной области) были выполнены в декабре 1991 г. [6]. Использовался тот же нефелометр, что и на оз. Байкал. Индикатрисы измерялись в пробах воды с глубины 3 м.

Данные о структуре взвеси получены по методикам [2, 3]. Соотношение концентраций взвеси, полученных весовым методом (25 проб) и рассчитанных по данным о светорассеянии (формулы из работы [2]), было практически таким же, как и для Байкала: $K_{\text{i0i}} = \tilde{N}_{\text{a0a}} / \tilde{N}_{\text{0a0}} = 1,08$.

При сопоставлении с параметрами взвеси в поверхностных водах оз. Байкал (глубина 5 м) было установлено, что в большинстве случаев они значительно отличаются от аналогичных характеристик в поверхностных водах Черного моря (глубина 3 м). Лишь на ст. 10 продольного разреза они были относительно близки к черноморским. Близкое сходство обнаружено также между параметрами байкальских вод на глубине 150 м и поверхностных черноморских вод. Их осредненные величины приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

**Осредненные параметры взвеси в озере Байкал
на глубине 150 м и в Черном море на глубине 3 м**

Параметр	Озеро Байкал	Черное море
$\langle C_{\text{п0i}} \rangle$, мг/л	0,41	0,55
$\langle C_{\text{i0i}} \rangle$	0,22	0,20
$\langle r_{\text{a0i}} \rangle$, мкм	3,7	3,6
$\langle r_{\text{i0i}} \rangle$, мкм	0,028	0,028
γ	4,7	4,7
$\langle N_{\text{a0i}} / C_{\text{п0i}} \rangle$, млн.шт./мг	13,6	10,7
$\langle N_{\text{i0i}} / C_{\text{п0i}} \rangle$, млн.шт./мг	780	600

Обоснованной версии о причинах сходства параметров взвеси в водах Байкала на глубине 150 м и в поверхностных водах Черного моря нет. Отметим лишь особенности в условиях формирования оптических характеристик вод в Черном море во время измерения индикатрис. Измерения проводились в период наиболее короткого светового дня, когда продуктивность фитопланктона в море минимальна и соответственно невелика концентрация взвеси. Вследствие охлаждения поверхностных слоев воды в этот период возникает плотностная конвекция, вызывающая интенсивное вертикальное перемешивание вод. В результате в море формируется однородное распределение гидрологических и оптических характеристик до глубин ~ 100 м.

Заключение

Подведем основные итоги работы.

1. Для определения структуры взвеси в водах оз. Байкал использованы методы обращения индикатрис рассеяния света, предложенные в работах [2, 3]. Оба метода дали результаты, согласующиеся между собой и с измерениями массовой концентрации взвеси весовым методом.

2. По индикатрисам рассеяния света, измеренным в водах оз. Байкал, определены: массовая и численная концентрация разных фракций взвеси, средний размер крупных (органических) и мелких (минеральных) частиц, параметр Юнге, характеризующий распределение по размерам мелких частиц.

3. Получены данные о структуре взвеси в поверхностных и глубинных водах разных районов озера. Показана их связь с гидрологическими и биологическими характеристиками вод. Главными факторами, определявшими пространственную изменчивость характеристик взвеси, являлись температура поверхностных слоев воды, циркуляция вод, цветение фитопланктона.

4. Установлены закономерности трансформации характеристик взвеси с глубиной: в глубинных водах средний размер частиц крупной фракции увеличивается, мелкой фракции – уменьшается.

5. Проведено сравнение параметров взвеси в зонах подъема и опускания вод в оз. Байкал и Индийском океане. Структура взвеси на разных глубинах в таких зонах имеет характерные особенности, одинаково проявлявшиеся как на Байкале, так и в Индийском океане.

6. Проведено сравнение параметров взвеси на разных глубинах в оз. Байкал и в поверхностных водах Черного моря в зимний период. Найдено, что осредненные параметры взвеси в поверхностных водах Черного моря практически такие же, как и в оз. Байкал на глубине 150 м.

Автор благодарит сотрудников Лимнологического института, способствовавших успешному проведению данного исследования:

– Е.Н. Тарасову, предоставившую для сравнения данные выполненных ею в экспедиции измерений концентрации взвеси весовым методом и результаты микробиологических анализов проб на взвесь;

– М.Н. Шимараева, предоставившего данные о температуре и циркуляции вод в оз. Байкал в период экспедиции.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана // Л.: Гидрометеиздат, 1983. – С. 207 – 264.
2. *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.
3. *Ощепков С.Л., Сорокина Е.А.* Методика экспрессного восстановления дисперсности и концентрации морской взвеси из измерений индикатрис рассеяния // Океанология. – 1988. – 28, вып. 1. – С. 157 – 161.
4. *Маньковский В.И.* Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1981. – С. 87 – 89.
5. *Шерстянкин П.П., Коханенко Г.П., Куимова Л.Н. и др.* О связи оптических структур вод озера Байкал с конвекционными структурами // Тр. Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы с элементами научной школы для молодежи». – Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2009. – С. 540 – 543.
6. *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.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 16.12.09
После доработки 19.02.10

АНОТАЦІЯ За індикатрисами розсіяння світла, виміряним в оз. Байкал, розраховані характеристики суспензії: масова концентрація і чисельність частинок мінеральної і біологічної фракцій, їх середній радіус, параметр дисперсності мінеральних частинок. Отримані дані про вертикальний розподіл характеристик суспензії в різних районах озера в літній період. Проведене порівняння характеристик суспензії в зонах підйому та опускання вод в оз. Байкал і в Індійському океані, що показало її однаковий специфічний склад.

Ключові слова: індикатриса розсіяння, зворотні задачі, суспензія.

ABSTRACT Light scattering functions measured in the lake Baikal are used for calculating suspended matter parameters: mass concentration and quantity of mineral and biological particles, their average radius, parameter of mineral particles dispersivity. Data on vertical distribution of suspended matter characteristics in various regions of the lake in summer are obtained. Comparison of suspended matter characteristics in the upwelling and downwelling zones of the lake Baikal and in the Indian Ocean shows its similar specific composition in these zones.

Keywords: light scattering function, inverse problem, suspended matter.