

В.И. Добрынин, Р.Р. Миргазов, К.А. Почейкин, Б.А. Таращанский

СПЕКТРАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ГЛУБИННОЙ БАЙКАЛЬСКОЙ ВОДОЙ

Представлены некоторые результаты измерений спектрального поглощения в водах оз. Байкал. Приведено описание методики измерений. Производится анализ возможности широкого использования малопараметрической модели для описания спектров поглощения байкальской воды. Рассмотрены временные вариации и глубинные зависимости параметров.

Введение

Водная среда естественных водоемов представляет собой сложную многокомпонентную физико-, химико-, биологическую систему. В настоящее время полный теоретический анализ оптических свойств такой системы невозможен. Особую значимость при этом приобретают результаты непосредственных измерений оптических характеристик природных сред и построение на их основе ряда феноменологических моделей.

Для описания оптических свойств морской воды разработаны и довольно успешно используются разнообразные (статистические и физические) модели [1]. В то же время для байкальской воды сделана лишь первая попытка модельного описания спектров поглощения света [2]. В настоящей статье дана оценка возможности широкого использования идеализации [2], основанная на наиболее точных измерениях спектров поглощения света байкальской водой.

Методика и результаты измерений

В рамках работ по созданию глубоководных нейтринных телескопов (НТ) на оз. Байкал в период 1993–1996 гг. нами проводились систематические наблюдения за оптическими характеристиками водной среды озера в районе расположения НТ (51° 50' N, 104° 20' E; 3,5 км от мыса Ивановский).

Для проведения комплексных исследований оптического состояния водной среды озера был разработан измеритель первичных гидрооптических характеристик – «Бурхан» [3].

Канал измерения показателя поглощения κ в приборе «Бурхан» состоит из измерителя освещенности (ФЭУ-130 со световым коллектором) и перемещаемого точечного источника света (галогенная лампа КГМН-27). Измерения спектров $\kappa(\lambda)$ в диапазоне 350–700 нм проводятся в шестнадцати узких спектральных интервалах, выделяемых интерференционными светофильтрами. Перемещение источника используется для автоматической калибровки прибора, что позволяет получать метрологически обеспеченные результаты.

Поток фотонов через сферу радиуса R , окружающую точечный изотропный источник монохроматического излучения, убывает в однородной рассеивающей среде согласно [1]:

$$F = F_0 \exp(-\xi \tau), \quad (1)$$

где F_0 – поток фотонов, испускаемый источником; $\tau = \kappa R$ – оптическое расстояние по поглощению.

Множитель ξ в общем случае является сложной функцией поглощающих и рассеивающих свойств среды (в отсутствие рассеяния $\xi = 1$). Природные воды обладают высокой анизотропией рассеяния (рассеяние происходит преимущественно вперед). Для таких сред множитель ξ близок к единице. Так, в малоугловом приближении, учитывающем разброс фотонов по пробегаем, решение уравнения переноса излучения для точечного изотропного источника можно записать в виде [4]:

$$F = F_0 \exp(-\tau) \frac{\rho}{\text{sh}(\rho)} \quad \text{при } \rho = \tau \sqrt{P/2} \ll 1. \quad (2)$$

Параметр $P = \sigma \hat{\gamma}^2 / \kappa$ зависит от оптических характеристик среды. Здесь σ – показатель рассеяния света; $\hat{\gamma}^2$ – средний квадрат угла однократного рассеяния,

$$\hat{\gamma}^2 = \int_{-1}^1 \gamma^2 \chi(\gamma) d \cos(\gamma),$$

где $\chi(\gamma)$ – индикатриса рассеяния на угол γ .

Разложив (2) в ряд по степеням ρ и отбросив высшие порядки по ρ из (1) и (2), получим

$$\xi - 1 \approx \tau P/12.$$

Измерения освещенности на больших расстояниях от точечного источника показали, что для глубинной байкальской воды $P \leq 0,2$ [5]. Для максимального значения P , на расстояниях $\tau < 0,6$, мы можем пренебречь вкладом рассеяния ($\xi - 1 < 0,01$).

В этом приближении, используя формулу (1), запишем выражение для измеряемой скорости счета однофотозлектронных импульсов ФЭУ-130 $N_i(R)$ в эксперименте со светофильтром с номером i ($i = 1, \dots, 16$):

$$4\pi R^2 N_i(R) = SW \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) \exp(-\kappa(\lambda)R) T_i(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $I_0(\lambda)$ – спектральная плотность потока фотонов реального источника; $T_i(\lambda)$ – произведение коэффициентов пропускания светофильтра, иллюминатора и светового коллектора; $\eta(\lambda)$ и S – квантовый выход и площадь фотокатода ФЭУ-130; W – вероятность регистрации фотозлектрона; λ_1 и λ_2 – границы спектрального диапазона.

Селективное поглощение света в среде приводит к изменению с расстоянием спектрального состава светового потока от монохроматического источника. Этот эффект (Форбса) может давать существенное искажение результатов спектральных измерений.

Так, из формулы (3) видно, что строгое равенство

$$\kappa(\lambda_i) = -d \ln(N_i(R)R^2)/dR \quad (4)$$

выполняется только при $T_i(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_i)$, что эквивалентно монохроматическому излучению источника.

Реальные светофильтры имеют конечную ширину полосы пропускания. Результат измерения в этом случае относится к некоторой эффективной длине световой волны $\tilde{\lambda}_i$. В общем случае $\tilde{\lambda}_i$ отличается от длины волны в максимуме пропускания светофильтра – λ_i на величину $\delta\lambda_i = \tilde{\lambda}_i - \lambda_i$. Значения $\tilde{\lambda}_i$ были рассчитаны нами по спектральным характеристикам источника, светофильтров, ФЭУ и спектра «нулевого приближения» $-\kappa(\lambda = \lambda_i)$, получаемого непосредственно по формуле (4).

Абсолютная величина $\delta\lambda_i$ для используемых светофильтров с шириной на полувысоте $\Delta\lambda_i < 10$ нм мала ($\delta\lambda_i < 0,5\Delta\lambda_i$). Однако данный эффект имеет систематический характер и его учет приводит к существенному искажению спектров. Так, систематическая погрешность в определении $\kappa(\lambda)$ на отдельных участках спектра может достигать 5–7%, что значительно превышает случайную ошибку, составляющую в наших измерениях 2–3%.

После введения соответствующих поправок мы можем утверждать, что относительная погрешность измерений $\kappa(\lambda)$ не превышает 5% в любой точке спектрального диапазона.

Оценка значений $\kappa(\tilde{\lambda}_i)$ и среднеквадратических отклонений σ_{κ_i} проводилась по методу наименьших квадратов. При этом учитывались как средние значения, так и ошибки измерений $N_i(R_0 + j\Delta R_i)$ в каждой точке на сетке расстояний ($j = 0, \dots, J \geq 10$). Разброс N_i относительно среднего значения обусловлен статистическим характером измерений, вариациями яркости источника и чувствительности приемника в процессе измерений, погрешностями позиционирования. Начальное расстояние $R_0 = 1$ м выбиралось из условия точечности источника. Шаг ΔR_i изменялся от 0,1 до 0,5 м в зависимости от используемого светофильтра (прозрачности среды). В расчетах $\kappa(\tilde{\lambda}_i)$ учитывались точки, удовлетворяющие вышеупомянутому условию малого влияния рассеяния света $-\kappa(\tilde{\lambda}_i)(R_0 + J\Delta R_i) < 0,6$.

Измерения для разных светофильтров проводились в произвольной последовательности. Воспроизводимость данных и отсутствие вариаций свойств среды за время измерения спектра контролировались путем проведения повторных измерений в одном-двух спектральных интервалах.

Пример спектра поглощения для глубинной байкальской воды $\kappa_{\text{бв}}(\lambda)$, полученный описанным выше способом, приведен на рис. 1. В спектральном диапазоне 350–700 нм показатель поглощения света в байкальской воде изменяется на порядок. Как видно из рисунка, рост спектра при $\lambda > 500$ нм обусловлен поглощением света чистой водой. В области $\lambda < 450$ нм доминирует поглощение примесей. Минимум поглощения расположен вблизи $\lambda = 490$ нм. Представленный вид спектральной зависимости является характерным для глубинной зоны.

Результаты измерений и расчетов спектров поглощения света приповерхностными водами озера приведены в [6].

Модель поглощающих свойств байкальской воды

Для описания вида спектральной зависимости показателя поглощения света глубинной байкальской водой в [2] была предложена малопараметрическая модель. В этой модели учитывается вклад наиболее оптически активных компонент природных вод: чистой воды и так называемого «желтого вещества» (ЖВ), которое представляет собой сложный комплекс органических молекул, образующихся в результате деградации планктонных организмов [7]. Спектр поглощения ЖВ в видимой области и ближнем ультрафиолете экспоненциально возрастает с уменьшением длины волны [8]:

$$\kappa_{\text{жв}}(\lambda) \sim \exp(-\mu\lambda), \quad (5)$$

что придает ему характерную окраску.

Обычно в модельном описании спектра поглощения света ЖВ морской воды используется значение $\mu = 0,015 \text{ нм}^{-1}$ [1]. В нашем случае показатель экспоненты μ является независимым варьируемым параметром, характеризующим качественный состав ЖВ.

В данной статье не рассматривается область глубин $H < 100$ м, в которой водная среда озера оптически неоднородна. Соответственно, в отличие от [9], не учитывается вклад пигментов фитопланктона в поглощение света. Такое упрощение возможно, поскольку, как отмечается в [1], между концентрацией ЖВ и количеством пигментов наблюдается корреляция, а относительный вклад пигментов в поглощение света при $H \geq 100$ м, как правило, не превышает 1%.

Таким образом, для описания спектров поглощения света глубинной байкальской водой мы используем следующую модель:

$$\kappa_{\text{бв}}(\lambda) = \kappa_{\text{чв}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) = \kappa_{\text{чв}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda = 390 \text{ нм})\exp(-\mu(\lambda - 390 \text{ нм})), \quad (6)$$

в которой $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ – спектр поглощения света чистой водой, а $\kappa_{\text{жв}}(\lambda = 390 \text{ нм})$ – показатель поглощения ЖВ при длине волны 390 нм (далее для краткости – κ_{390}). Показатель κ_{390} является параметром, пропорциональным концентрации ЖВ.

Спектральное поглощение света чистой водой

Как ни странно, основные трудности модельного представления (6) связаны с отсутствием достаточно точных измерений спектров поглощения света чистой водой.

Известно, что спектр поглощения $\kappa_{\text{св}}(\lambda)$ из-за сильного взаимодействия между молекулами существенно отличается от спектра водяного пара. Происходит расширение и взаимное перекрытие полос, сдвиг полос в длинноволновую область, эффективное усиление поглощения. Для точного теоретического расчета поглощения света жидкой водой требуется определение положения энергетических уровней конденсированной системы, что в настоящее время не представляется возможным.

Обратимся к Эксперименту. Оптические свойства чистой воды изучаются экспериментально с конца прошлого столетия. Тем не менее, к настоящему времени они известны еще недостаточно хорошо. Действительно, результаты измерений $\kappa_{\text{св}}(\lambda)$ у разных авторов в области $\lambda < 500$ нм могут различаться на порядок величины [1].

Как считают авторы [1], это связано с трудностями получения идеально чистой воды и сохранения необходимой чистоты в процессе измерений. По нашему мнению, не последнюю роль в данном случае играет чрезвычайно высокая прозрачность воды при $\lambda < 500$ нм. Так, по данным [1], длина пробега фотона до его поглощения в воде может достигать 500 м. Понятно, что абсолютные измерения столь малой величины (на базе 1 м поглощается менее 0,2% общего потока фотонов) в лабораторных условиях, при необходимости корректного учета эффектов рассеяния (сравнимых с поглощением), чрезвычайно сложны.

Находясь перед проблемой выбора, мы посчитали возможным использовать данные критического обзора оптических свойств чистой воды [10]. В нем приводятся наиболее достоверные, с точки зрения авторов, результаты измерений и оценки значений показателя поглощения для чистой воды $\kappa_{\text{св}}(\lambda)$ в спектральном диапазоне 200–800 нм. Спектр $\kappa_{\text{св}}(\lambda)$ по [10] приведен на рис. 1. Как видно из рисунка, с уменьшением длины волны в области $\lambda < 500$ нм вклад чистой воды в суммарное поглощение уменьшается. Вместе с этим уменьшается и влияние неопределенностей значений $\kappa_{\text{св}}(\lambda)$ на расчетные параметры нашей модели. Несмотря на это, мы поддерживаем мнение авторов [10] о необходимости проведения надежных измерений спектрального поглощения чистой воды при $\lambda < 500$ нм.

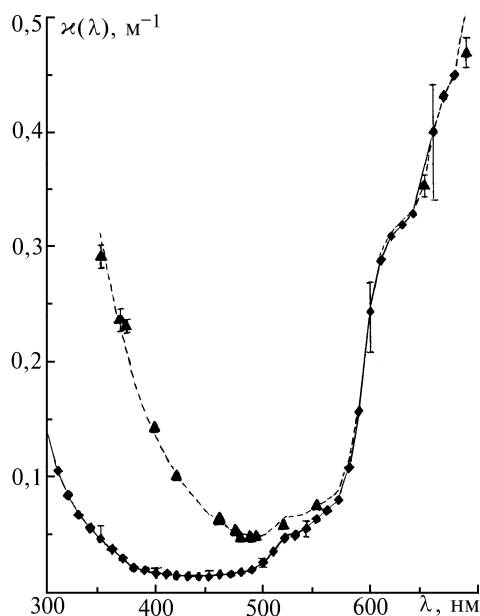


Рис. 1. Спектры поглощения света в воде: треугольники – байкальская вода, результаты наших измерений (южный Байкал, глубина 1000 м, 18.05.1993 г.); ромбы – чистая вода по [10]; сплошная линия – линейная интерполяция данных [10]; пунктир – модельный спектр, пояснение в тексте

Спектр поглощения света ЖВ байкальской воды

Спектр поглощения ЖВ определялся нами согласно (6) как разность между измеренными значениями показателей поглощения света байкальской водой и спектра поглощения для чистой воды:

$$\kappa_{ys}(\tilde{\lambda}_i) = \kappa_{bw}(\tilde{\lambda}_i) - \kappa_{cw}(\tilde{\lambda}_i).$$

На рис. 2 показан типичный пример спектра поглощения для ЖВ глубинной байкальской воды. Значения показателя поглощения света чистой водой для эффективных длин волн $\tilde{\lambda}_i$ получены путем линейной интерполяции данных [10]. Видно, что с небольшими отклонениями спектр ЖВ имеет экспоненциальный вид (5)

$$\kappa_{ys}(\lambda) = \kappa_{390} \exp[-\mu(\lambda - 390 \text{ нм})].$$

Используя метод наименьших квадратов, а также учитывая погрешности измерений κ_{bw} в каждой отдельной точке спектра и оценки точностей определения κ_{cw} , приведенных в [10], мы рассчитали значения параметров и получили оценки для их случайных погрешностей (для приведенного спектра $\kappa_{390} = (0,141 \pm 0,002) \text{ м}^{-1}$, $\mu = (0,0166 \pm 0,0003) \text{ нм}^{-1}$).

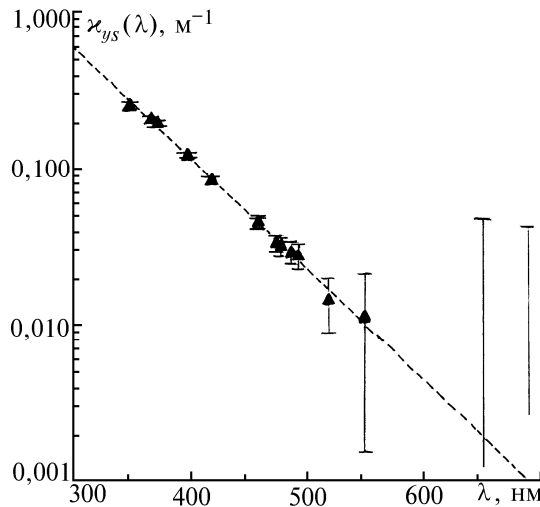


Рис. 2. Спектральное поглощение света «желтым веществом» байкальской воды: треугольники – разность между спектрами поглощения света для байкальской и чистой воды (см. рис. 1); пунктир – аппроксимация спектра зависимостью вида $\kappa_{390} \exp(-\mu(\lambda - 390 \text{ нм}))$. Значения параметров: $\kappa_{390} = 0,141 \text{ м}^{-1}$, $\mu = 0,0166 \text{ нм}^{-1}$

По описанной выше методике нами была произведена обработка экспериментальных данных. Критерием отбора данных для последующего анализа являлось наличие измерений $\kappa_{bw}(\lambda)$ как минимум в шести точках по спектру в области $\lambda < 500 \text{ нм}$. Каждому измеренному спектру были поставлены в соответствие два параметра. Подставляя значения κ_{390} и μ в формулу (6), можно получить непрерывное распределение для показателя поглощения света байкальской водой в спектральном диапазоне 350–700 нм.

Сравнение с экспериментом

В таблице в качестве примера приведены результаты измерений показателей поглощения $\kappa_{bw}^{\text{exp}}(\tilde{\lambda}_i)$ в разные годы для произвольно выбранных глубин. Там же представлены спектры поглощения $\kappa_{bw}^{\text{calc}}(\lambda)$, полученные расчетным путем.

Анализ таблицы показывает, что среднеквадратическое отклонение расчетных спектров от экспериментальных данных:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta \kappa_i / \kappa_{bw}^{\text{calc}}(\tilde{\lambda}_i))^2}, \quad (\Delta \kappa_i = \kappa_{bw}^{\text{exp}}(\tilde{\lambda}_i) - \kappa_{bw}^{\text{calc}}(\tilde{\lambda}_i)),$$

составляет 5,2% (5,8; 3,5%) при средней случайной погрешности эксперимента 2,7% (3,1; 2,3%) для глубин 200 м (500, 1000 м). Поскольку неучтенная систематическая погреш-

ность эксперимента, по нашим оценкам, составляет ~1%, такое соответствие теории и эксперимента можно признать удовлетворительным.

Наибольшие расхождения между экспериментальными данными и расчетом наблюдаются в точке $\lambda = 519$ нм. Анализ спектров показал, что данное отклонение имеет систематический характер (экспериментальные значения $\kappa_{bw}(519 \text{ нм})$ всегда меньше расчетных).

Сравнение расчетных значений показателя поглощения света байкальской водой – $\kappa_{bw}^{\text{calc}}(\tilde{\lambda}_i)$ с результатами эксперимента – $\kappa_{bw}^{\text{exp}}(\tilde{\lambda}_i)$

$\tilde{\lambda}_i$, нм	$\kappa_{bw}^{\text{exp}}, \text{M}^{-1}$	$\kappa_{bw}^{\text{calc}}, \text{M}^{-1}$	$\frac{\sigma_{\kappa}}{\kappa_{\text{exp}}}, \%$	$\frac{\Delta\kappa^*}{\kappa_{\text{calc}}}, \%$	$\kappa_{bw}^{\text{exp}}, \text{M}^{-1}$	$\kappa_{bw}^{\text{calc}}, \text{M}^{-1}$	$\frac{\sigma_{\kappa}}{\kappa_{\text{exp}}}, \%$	$\frac{\Delta\kappa^*}{\kappa_{\text{calc}}}, \%$	$\kappa_{bw}^{\text{exp}}, \text{M}^{-1}$	$\kappa_{bw}^{\text{calc}}, \text{M}^{-1}$	$\frac{\sigma_{\kappa}}{\kappa_{\text{exp}}}, \%$	$\frac{\Delta\kappa^*}{\kappa_{\text{calc}}}, \%$
351	–	–	–	–	0,299	0,315	2	–5	0,421	0,389	4	8
369	0,253	0,252	2	1	0,236	0,231	2	2	0,272	0,282	2	–4
374	0,234	0,231	3	1	0,221	0,211	2	5	0,259	0,257	2	1
400	0,152	0,153	2	–1	0,139	0,137	2	1	0,157	0,163	3	–4
420	0,112	0,115	2	–3	0,098	0,101	2	–3	0,111	0,118	3	–6
459	0,070	0,070	2	0	0,059	0,060	2	–2	0,065	0,067	3	–3
460	0,071	0,069	2	4	0,061	0,060	3	1	0,072	0,066	3	9
475	0,059	0,059	3	0	0,049	0,051	3	–3	–	–	–	–
479	0,056	0,057	2	–2	0,049	0,050	3	–2	0,055	0,054	4	2
488	0,055	0,053	3	4	0,047	0,047	2	2	–	–	–	–
494	0,051	0,053	2	–4	0,049	0,047	2	5	–	–	–	–
519	0,062	0,068	2	–8	0,061	0,063	2	–4	0,057	0,064	4	–11
550	0,074	0,077	2	–3	0,075	0,074	2	1	0,072	0,074	4	–3
651	0,342	0,357	2	–4	0,350	0,356	2	–2	0,377	0,356	2	6
691	0,419	0,516	9	–19	0,477	0,516	2	–8	0,492	0,516	3	–5
Н	200 м				1000 м				500 м			
Дата	22.03.1993 г.				18.05.1995 г.				04.04.1996 г.			
κ_{390}	$0,159 \pm 0,002 \text{ M}^{-1}$				$0,141 \pm 0,002 \text{ M}^{-1}$				$0,173 \pm 0,004 \text{ M}^{-1}$			
μ	$0,0156 \pm 0,0002 \text{ нм}^{-1}$				$0,0166 \pm 0,0003 \text{ нм}^{-1}$				$0,0176 \pm 0,0006 \text{ нм}^{-1}$			

* $\Delta\kappa = \kappa_{bw}^{\text{exp}} - \kappa_{bw}^{\text{calc}}$.

По нашему мнению, это может быть связано с предпочтением, отданным авторами [10] результатам работы Мореля [11] по сравнению с данными Тама [12]. Используемый в [12] метод лазерной оптоакустической спектроскопии свободен от многих неопределенностей, присущих стандартным методикам, и имеет достаточно высокую точность ~10%. Результаты $\kappa_{sw}(\lambda)$ по [12] в области 515–546 нм идут систематически ниже (на 10%) результатов [11] и больше соответствуют нашим измерениям. К сожалению, в этой области мы располагаем единственным светофильтром, что не позволяет пока сделать однозначный выбор между данными [11] и [12].

Высокая чувствительность предлагаемой модели к оптическим характеристикам чистой воды при $\lambda > 500$ нм и малая экспериментальная погрешность позволяют надеяться на возможность повышения существующей точности определения $\kappa_{sw}(\lambda)$ в этой области спектра в 3–5 раз. Проведение с этой целью более детальных измерений $\kappa_{sw}(\lambda)$ одновременно в коротковолновой и длинноволновой областях спектра является нашей ближайшей задачей.

В целом, с учетом сделанных замечаний, можно считать, что рассматриваемая модель в пределах погрешностей 4–6% дает достаточно хорошее описание спектров поглощения света глубинной байкальской водой и может быть использована для дальнейшего анализа. С этой же степенью неопределенности можно рассматривать глубинную байкальскую воду как оптическую систему, состоящую из двух компонент – чистой воды и ЖВ.

Глубинный ход и временные вариации оптических параметров

Вертикальные зависимости параметров модели должны соответствовать изменению количественного и качественного состава поглощающей примеси с глубиной. Параметр μ характеризует качественный состав, а κ_{390} пропорционален концентрации ЖВ.

Как видно из рис. 3, а, диапазон изменений μ с глубиной невелик и равен $\pm 10\%$. Среднее по глубинам значение $\hat{\mu} = (0,0166 \pm 0,0007) \text{ нм}^{-1}$. Полученная нами оценка $\hat{\mu}$ согласуется со средним по глубине для $H \geq 100$ м значением μ , рассчитанным по спектрам ослабления света $\epsilon(\lambda)$ в

области $300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$, $\mu = (0,0161 \pm 0,0048) \text{ nm}^{-1}$ [13]. Измерения $\varepsilon(\lambda)$ проводились на пробах байкальской воды. В то же время утверждение авторов [13] о значительном диапазоне изменений μ с глубиной представляется нам не вполне обоснованным. Действительно, если принять во внимание погрешность определения μ [$\sigma_\mu \sim 0,05 \text{ nm}^{-1}$ (устное сообщение П.П. Шерстянкина)], то мы обнаружим, что все значения из [13] лежат в границах $\pm 2\sigma_\mu$. Относительно высокая погрешность результатов [13] обусловлена, в основном, малой измерительной базой ($R = 10 \text{ cm}$). Близкое значение $\mu = (0,0162 \pm 0,0002) \text{ nm}^{-1}$ для $H = 1000 \text{ m}$ было получено одним из авторов для ранних измерений $\kappa_{bn}(\lambda)$ [2]. Там же дана оценка изменений μ с глубиной ($\pm 0,001 \text{ nm}^{-1}$).

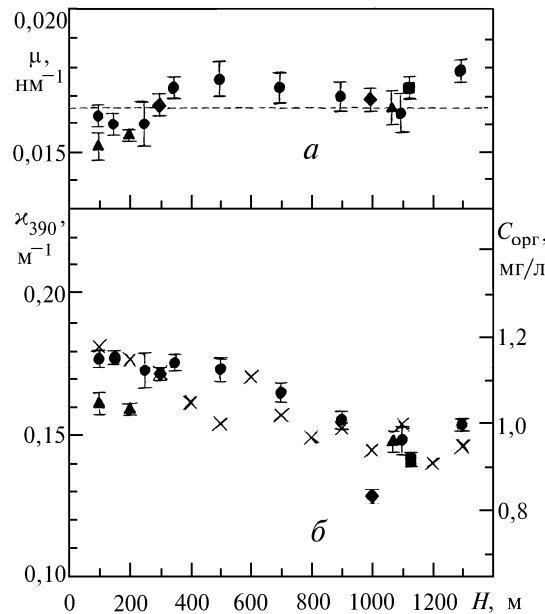


Рис. 3. Глубинная зависимость параметров: треугольники – результаты измерений от 22.03–8.04.1993 г.; ромбы – 25.03–15.04.1994 г.; квадрат – 29.03.1995 г.; кружки – 4.04–5.04.1996 г.; крестики – содержание $C_{\text{орг}}$ в водах Южного Байкала (среднее за 1986–1989 гг.) по [20], пунктир – среднее по глубине значение параметра μ

Приведенные выше данные не противоречат нашим результатам. К сожалению, этим и заканчивается список весьма немногочисленных исследований оптических характеристик ЖВ байкальской воды.

Приведем для сравнения характеристики ЖВ для пресноводных озер Австралии ($\mu = (0,016 \pm 0,002) \text{ nm}^{-1}$) и Новой Зеландии ($\mu = (0,019 \pm 0,002) \text{ nm}^{-1}$) [14].

В [15] на основе измерений спектров поглощения ЖВ океанской воды сделано предположение, что существуют две фракции ЖВ: одна (низкомолекулярная) определяет поглощение ЖВ при $\lambda < 500 \text{ nm}$, другая (высокомолекулярная) – при $\lambda > 500 \text{ nm}$. Утверждается, что состав первой фракции, несмотря на значительные вариации, качественно одинаков в различных водах – океанских, морских, речных и озерных. Значение $\mu = (0,017 \pm 0,001) \text{ nm}^{-1}$ для этой фракции также близко к оценке $\hat{\mu}$, полученной нами.

В целом можно сделать вывод, что предлагаемый метод определения параметра μ по измеренным *in situ* спектрам поглощения является одним из наиболее точных. Изменения параметра μ с глубиной невелики, что говорит о практически неизменном составе ЖВ байкальской воды на глубинах больше 100 м.

Исключение могут составлять поверхностные воды, а также области, подверженные влиянию речного стока.

Действительно, вид спектров, измеренных вблизи поверхности озера, несколько отличается от глубинных. В спектрах поглощения примесей при $H \leq 10 \text{ m}$ мы наблюдали излом вблизи $\lambda = 500 \text{ nm}$. Возможно, это связано с увеличением относительного вклада в суммарное поглощение света таких составляющих, как фитопланктон, крупнодисперсная взесь или высокомолекулярная фракция ЖВ. Однако ввиду малочисленности измерений при $H < 100 \text{ m}$ и

существенного влияния на их результаты высокой пространственной и временной неоднородности оптических характеристик мы не приводим здесь каких-либо оценок.

Для адекватного модельного описания оптических свойств поверхностных вод озера потребуется проведение детальных исследований в широком спектральном диапазоне при помощи малоинерционных приборов с короткой измерительной базой. При этом двухпараметрическая модель может использоваться как первое приближение.

Параметр κ_{390} уменьшается с глубиной в среднем на 20% (рис. 3, б).

В глубинном ходе κ_{390} за 1996 г. можно выделить «плато» ($H = 100 \div 350$ м), где изменения параметра малы; область равномерного падения ($H = 350 \div 1100$ м) и точку $H = 1300$ м, в которой намечается рост параметра в придонной зоне. Глубина в месте проведения измерений равна 1370 м. Разделение на зоны прослеживается также на глубинных зависимостях параметра μ (см. рис. 3, а) и показателя ослабления ϵ [16].

Такую вертикальную структуру κ_{390} мы интерпретируем как проявление областей с различными гидродинамическими характеристиками. В первой области, нижняя граница которой может достигать в марте 300–400 м, наблюдается слабая плотностная стратификация [17]. В ней должно происходить конвективное перемешивание вод и выравнивание концентрации ЖВ. В центральной зоне с устойчивой вертикальной стратификацией концентрация ЖВ уменьшается за счет агрегирования, флокуляции, сорбции и других процессов. На придонную область существенное влияние оказывают крупномасштабные циркуляции, заносящие туда воды с малых глубин, имеющие повышенные концентрации ЖВ.

Первое описание оптических структур вод озера Байкал (по результатам измерений ϵ), с выделением трех зон (верхней, глубинной, придонной) и указанием на динамический характер их происхождения, дано в [16].

Деструкция органической примеси на все более мелкие фрагменты, как ясно из [18], приводит к росту поглощения в коротковолновой области спектра. В нашем случае это эквивалентно увеличению параметра μ . Наблюдаемую на рис. 3, а структуру μ можно объяснить различным «возрастом» вод. Действительно, на глубинах $H < 300$ м водная среда содержит, в основном, малоразложившуюся примесь (значения μ – минимальны). В области $H > 300$ м время замещения глубинных вод на поверхностные значительно возрастает [19]. Это приводит к увеличению относительного вклада в поглощение света для коротких фрагментов органических молекул и соответствующему росту μ .

Вид вертикальной структуры параметров μ и κ_{390} зависит от скорости переноса органической примеси и времени ее распада. Поэтому спектральные измерения $\kappa_{bw}(\lambda)$ могут стать новым методом изучения процессов переноса вещества и энергии в оз. Байкал.

Интересно выявить связь между ЖВ и концентрацией органического вещества, которое обычно характеризуется содержанием органического углерода $C_{орг}$. Используя данные работы [20], мы построили с соблюдением масштаба усредненную по 1986–1989 гг. зависимость $C_{орг}(H)$ для вод Южного Байкала (12 км от м. Половинного) (см. рис. 3, б). Видно хорошее согласие в поведении $C_{орг}$ и κ_{390} с глубиной. Формально рассчитав коэффициенты линейной регрессии ($r = 0,8$), мы получили возможность оценки содержания органического углерода в байкальской воде по данным гидрооптических измерений:

$$C_{орг}[\text{мг/л}] = (4,5 \pm 1,5)\kappa_{390}[\text{м}^{-1}] + (0,3 \pm 0,2).$$

Такое соотношение между коэффициентами означает, что доля «окрашенного» вещества в общем количестве растворенной органики довольно велика – (75±25)%. Уточнение вида зависимости между $C_{орг}$ и κ_{390} планируется в серии одновременных гидрооптических и гидрохимических измерений.

О масштабе временных вариаций параметров модели можно судить по данным измерений в марте – апреле для ряда лет (см. рис. 3).

Сезонные изменения спектров поглощения изучались после установки прибора «Бурхан» в составе гидрологической гирлянды нейтринного телескопа. Наиболее длинные серии измерений приходятся на 1993 и 1995 гг. В эти годы с марта по октябрь проводились периодические (1 раз в месяц) измерения $\kappa_{bw}(\lambda)$ на глубинах 1100 и 1000 м соответственно. Размах колебаний параметров κ_{390} и μ относительно средних значений не превышал 10%, что говорит о высокой стабильности оптического состояния водной среды озера на больших глубинах в исследуемый период.

Заключение

На основе анализа экспериментальных данных доказана возможность широкого использования малопараметрической модели спектрального поглощения света глубинной байкальской водой.

Авторы благодарят руководство Прибайкальского национального парка за предоставленную возможность проведения исследований на охраняемой территории, Н.М. Буднева за пристальное внимание к работе, О.Н. Гапоненко за конструктивную критику, П.П. Шерстянкин за полезные замечания и плодотворные дискуссии, а также всех участников и организаторов экспедиционных работ за всестороннюю помощь.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант N 96-05-65216).

1. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 372 с.
2. Добрынин В. И., Таращанский Б. А. // Оптика моря и атмосферы. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР, 1990. Ч. 1. С. 89–90.
3. Таращанский Б. А., Миргазов Р. Р., Почейкин К. А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 5. С. 771–774.
4. Долин Л. С. // ДАН СССР. 1981. Т. 260. N 6. С. 1344–1347.
5. Безруков Л. Б., Буднев Н. М., Таращанский Б. А. и др. // Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 6. С. 1022–1026.
6. Шерстянкин П. П. Экспериментальные исследования подледного светового поля озера Байкал. М.: Наука, 1975. 92 с.
7. Kalle K. // Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 1966. V. 4. P. 91–104.
8. Ерлов Н. Г. Оптика моря / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
9. Пелевин В. Н., Ростовцева В. В. // Оптика океана и атмосферы. 1995. Т. 8. N 12. С. 1778–1783.
10. Smith R. C., Baker K. S. // Appl. Optics. 1981. V. 20. N 2. P. 177–184.
11. Morel A. and Prieur L. // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 18. P. 3348.
12. Tam A. C., Patel K. N. // Appl. Optics. 1979. V. 18. N 19. P. 3348–3358.
13. Шерстянкин П. П., Бархатова Е. Н. // Оптика моря и атмосферы. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР, 1990. Ч. 1. С. 178–179.
14. Davies-Colley R. J., Vaut W. N. // Limnol. and Oceanogr. 1987. V. 32. N 2. P. 416–425.
15. Копелевич О. В., Люцарев С. В., Родионов В. В. // Океанология. 1989. Т. 29. N 3. С. 409–414.
16. Шерстянкин П. П. Оптические структуры и фронты океанического типа на Байкале: Дис. ... докт. физ.-мат. наук (в форме научного доклада). М.: ИО РАН, 1993. 37 с.
17. Шимараев М. Н., Гранин Н. Г. // ДАН СССР. 1991. Т. 321. Вып. 2. С. 831–835.
18. Гиллем А., Штерн Е. Электронные спектры поглощения органических соединений. М.: ИЛ, 1957. 387 с.
19. Weiss R. F., Carmack E. C., Koropalov V. M. // Nature. 1991. V. 349. P. 665–669.
20. Тарасова Е. Н., Мещерякова А. И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1992. 144 с.

НИИ прикладной физики
Иркутского государственного университета

Поступила в редакцию
10 декабря 1996 г.

V. I. Dobrynin, R. R. Mirgazov, K. A. Pocheikin, B. A. Tarashchanskii. **Spectral Light Absorption by Deep Baikal Water.**

Some measurements results of spectral light absorption in Baikal water are presented. The measurement method is described. The possibility of wide use of the two parameter model for light absorption is under analysis. The model parameters of time variations and depth dependencies are examined.