

Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15

Б.А. Таращанский¹, Г.П. Коханенко², Р.Р. Миргазов¹,
Е.В. Рябов¹, А.С. Ягунов^{1*}

¹ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет», НИИ прикладной физики
664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 14.05.2010 г.

Приводятся некоторые результаты спектральных и угловых зависимостей оптических параметров, измеренных на различных глубинах. Описано устройство прибора ASP-15, предназначенного для непрерывного мониторинга первичных гидрооптических характеристик воды оз. Байкал в месте расположения нейтринного телескопа НТ200+ на глубине 1200 м. Рассмотрены методы измерений световых полей и восстановления значений гидрооптических характеристик.

Ключевые слова: первичные гидрооптические характеристики, поглощение, рассеяние, мониторинг; *inherent optical properties, absorption, scattering, monitoring.*

Введение

Байкальский нейтринный телескоп НТ200+ [1–3], расположенный вблизи мыса Ивановский в южной части озера Байкал, с 1995 г. используется для непрерывного наблюдения за потоками космических нейтрино. Глубокая толща воды (глубина озера в месте расположения телескопа составляет 1336 м) используется как среда для регистрации вторичных частиц (таких, как мюоны или электроны), возникающих при чрезвычайно редком взаимодействии нейтрино с веществом. Фотоприемники регистрируют черенковское излучение, вызываемое релятивистскими заряженными частицами при их распространении в толще воды. Несмотря на высокую прозрачность глубинной байкальской воды, присутствующее в рабочем объеме телескопа поглощение и рассеяние излучения гидрозолем оказывают существенное влияние на регистрируемое излучение. Поэтому в проекте предусмотрена система контроля первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) эффективного объема НТ200+. Необходимые характеристики включают в себя спектральные показатели поглощения $a(\lambda)$,

рассеяния $b(\lambda)$ и индикатрису рассеяния неполяризованного монохроматического света в воде $\chi(\gamma)$. Спектр показателя поглощения учитывается при расчете величины потока космических частиц высоких энергий, регистрируемых телескопом. Спектр показателя рассеяния и форма индикатрисы рассеяния учитываются при вычислении ошибки определения траекторий частиц.

Прикладной аспект мониторинга ПГХ состоит в применении найденных методов для изучения экосистем Байкала и других водоемов. Оптические характеристики в принципе позволяют определять усредненные физические и биохимические параметры взвеси по параметрам светорассеяния, а также состав растворенного органического вещества по спектрам поглощения [4–8]. Хотя в изучении динамики биохимических процессов в природных водоемах дистанционным оптическим методам нет альтернативы, развитие методов и создание приборов для стационарных измерений *in situ* ведутся не очень активно.

Если говорить об аппаратуре для измерений в лабораторных или естественных условиях, то на сегодняшний день наиболее доступна аппаратура для измерения показателя ослабления [9], дискретные спектры ослабления и поглощения можно измерять с помощью достаточно дорогого и сложного в обращении прибора АС9 [10]. Недавно появился измеритель сплошных спектров поглощения *in situ* с разрешением

* Борис Абрамович Таращанский (babr80@mail.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Рашид Рамзельевич Миргазов; Евгений Валерьевич Рябов; Андрей Сергеевич Ягунов.

0,3 нм [11]. Методик и доступных приборов для долговременных стационарных измерений *in situ* нет. Потенциально огромная оптическая информация, заключенная в спектральной матрице рассеяния, не используется вовсе.

В данной статье на некоторых экспериментальных примерах показано, насколько изменчивой и разнообразной может быть оптическая информация. Приведены некоторые результаты измерений, большинство из которых уникальны. Так, например, нам неизвестно об измерениях спектров обратного рассеяния, спектров рассеяния на фиксированные углы, включая близкий к нулю угол. В статье также описаны методы измерений, позволяющие осуществлять непрерывный мониторинг водной среды, и прибор, используемый для этого.

1. Прибор ASP-15 и методы измерений

Все оптические параметры рассеивающей среды (такие, как показатели рассеяния, поглощения и ослабления) имеют строгие математические определения, чем и характеризуется устройство гидрооптических приборов [12, 13], служащих для точного измерения этих величин. Однако большинство известных гидрооптических приборов мало пригодны для непрерывных и долговременных измерений гидрооптических параметров *in situ* из-за трудностей, связанных с невозможностью точной дистанционной юстировки узких световых пучков и уходом калибровки за время измерений. В описываемом приборе используются приближенные методы восстановления оптических параметров по световому полю от точечного источника [14–16]. Прибор располагается на глубине 1200 м в непосредственной близости от НТ200+ и в течение года производит в автоматическом режиме непрерывные измерения оптических параметров водной среды. В марте–апреле ASP-15 поднимают на поверхность для проведения регламентного обслуживания, в этот период возможны измерения на небольших глубинах.

Прибор ASP-15 (Absorption, Scattering, Phase function – 15 filters) (рис. 1) состоит из герметичного корпуса, в котором размещены блок электроники, два ФЭУ-130 и 15 сменных интерференционных светофильтров с центрами полос от 351 до 690 нм. Снаружи корпуса закреплены две насадки, играющие роль приемников с широкой (молочное стекло) и узкой (коллиматор 0,5°) диаграммами приема. Направление луча зрения узконаправленного приемника меняется в плоскости, перпендикулярной чертежу, с помощью поворотного зеркала, вращающегося вместе с блендой. Снизу корпуса закреплена система вертикального перемещения платформы с двумя источниками света и затеняющими экранами.

1.1. Метод измерения спектра поглощения

Простой метод измерения показателя поглощения по освещенности, создаваемой точечным изотроп-

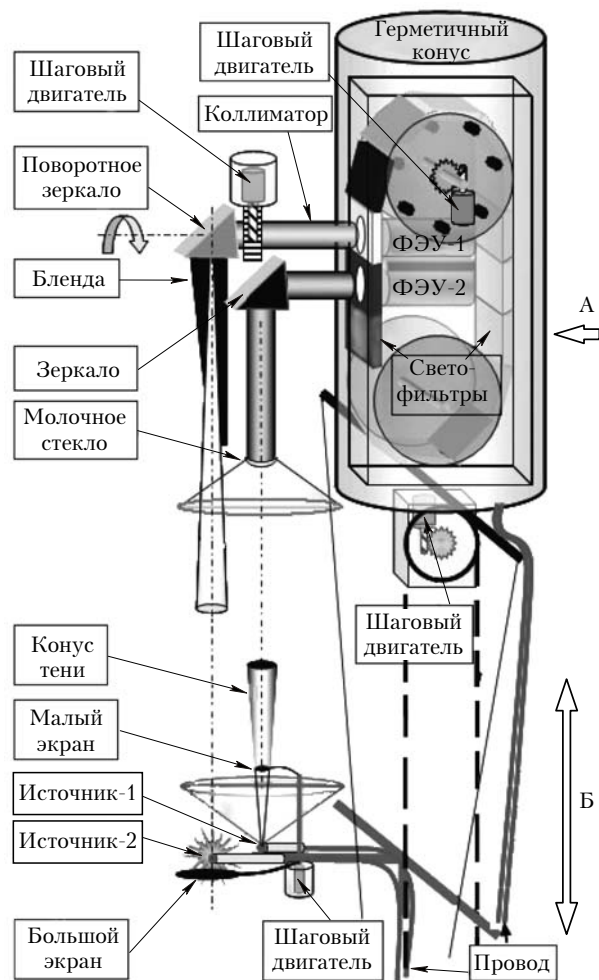


Рис. 1. Устройство прибора ASP-15: А – неподвижно закрепленный на глубине 1200 м блок фотоприемников; Б – подвешенный на тросах, вертикально перемещающийся блок с источниками света

ным источником света, был предложен в [14]. Метод основывался на предположении о том, что затухание светового потока от такого источника в рассеивающей и поглощающей среде обратно пропорционально квадрату расстояния, а зависимость потока от величины истинного поглощения в среде носит экспоненциальный характер. В этом случае показатель поглощения определяется по измерениям зависимости освещенности E_t от расстояния R :

$$E_t(R) \sim E_0 \exp(-aR)/R^2. \quad (1)$$

В дифференциальной форме записи выражения (1) $a = -(1/ER^2)(d(ER^2)/dR)$ константа E_0 отсутствует, что позволяет не учитывать приборные константы (интенсивность, чувствительность, потери в оптических элементах, их изменение за счет обрастания и т.д.). Таким образом, метод является абсолютным и позволяет осуществлять долговременный мониторинг спектра поглощения. Как показано в [15, 16], физическими предпосылками для выполнения зависимости (1) являются предположения о малости обратно рассеянного излучения и пренебрежимо малом

удлинении пути пробега фотонов из-за многократного рассеяния. Поскольку для вод Байкала характерны высокие значения асимметрии рассеяния и значительное истинное поглощение, в большинстве случаев описанный метод измерения показателя поглощения дает адекватные результаты.

Измерение спектра поглощения с помощью прибора ASP-15 происходит по следующему алгоритму: 1) платформа с источниками света перемещается на начальное расстояние; 2) устанавливается начальный светофильтр; 3) включается изотропный источник-2 с произвольной яркостью; 4) включается ФЭУ-2; 5) измеряется освещенность $E(R_i, \lambda_j)$ на заданных расстояниях $1 \text{ м} < R_i < 7 \text{ м}$ ($i = 1 \div 10$) между источником и приемником для каждого светофильтра ($j = 1 \div 15$). Требуемая «изотропность» приемника в угле $\sim 60^\circ$ обеспечивается с помощью плотного молочного стекла.

1.2. Метод измерения спектра рассеяния в переднюю полусферу

Для измерений спектров рассеяния в переднюю полусферу (прямого рассеяния) используются тот же приемник с широкой диаграммой приема, источник-1 и малый экран (см. рис. 1). Полная освещенность приемника на расстоянии R от точечного изотропного источника света, как показано в [15, 16], определяется выражением (1) и складывается из прямого

$$E_d = E_0 \exp(-cR)/R^2 \quad (2)$$

и рассеянного света

$$E_s = E_0 [\exp(-aR) - \exp(-cR)]/R^2. \quad (3)$$

Измеряя E_t (с открытым источником) и E_s (с затененным источником), из (1) и (3) можно вычислить показатель рассеяния

$$b = -\frac{\ln(1 - E_s/E_t)}{R}. \quad (4)$$

В эксперименте (рис. 2) необходимо соблюсти условие $d \ll D \ll r \ll R$. Оно означает, что конус тени, образуемый малым экраном, должен быть достаточно узким, чтобы пренебречь попадающим в него рассеянным излучением.

Кроме того, источник света должен иметь достаточно широкую диаграмму излучения. Нам удалось реализовать следующие параметры эксперимента: $d = 0,8 \text{ мм}$, $D = 4 \text{ мм}$, $r \sim 0,2 \text{ м}$, $R > 3 \text{ м}$, полный плоский угол излучения $> 30^\circ$, угол конуса тени $\sim 0,5^\circ$. Достаточно ли широк угол излучения, можно судить, сравнивая экспоненциальные зависимости (1), измеряемые с помощью незатененного источника-1 и источника-2.

В глубинной зоне Байкала, где индикатриса рассеяния более изотропна [17], отличие показателей поглощения, измеренных с помощью обоих источников, не превышает 10%. Это означает, что методическая ошибка измерения показателя рассеяния, связанная с неизотропностью источника, меньше 10%.

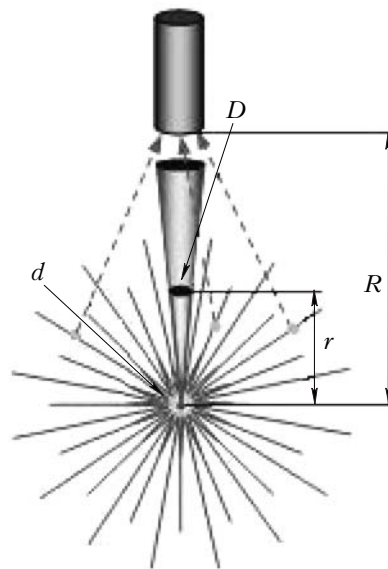


Рис. 2. Схема измерения рассеяния в переднюю полусферу

Отделить свет, рассеянный на малые углы, от света, испытавшего дифракцию на краях экрана, можно, вычислив b' согласно (4) по результатам измерений на разных расстояниях от источника. Можно выделить три области (рис. 3, кривая 1), в которых преобладает соответственно прямой (I), претерпевший дифракцию на краях экрана (II) и рассеянный (III) свет.

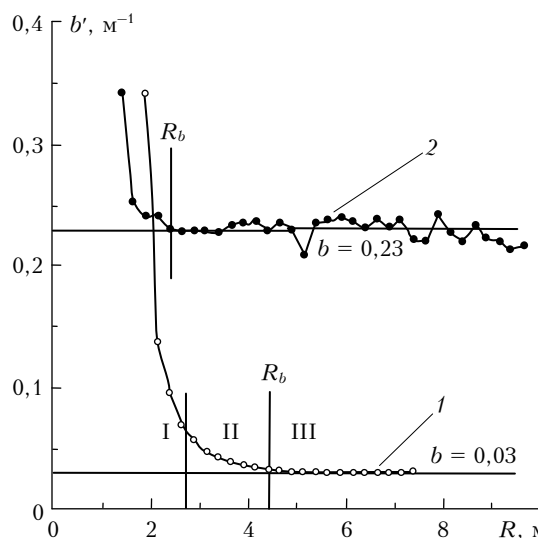


Рис. 3. Влияние дифрагированного на малом экране света на измерение рассеяния вперед: 1 – глубина 1000 м; 2 – 250 м

При увеличении R измеренное значение b' стремится к постоянному значению, равному показателю рассеяния b . Обозначим через R_b расстояние, на котором разница $b' - b$ становится незначительной. Максимальное значение $R_b(\lambda)$ соответствует максимальной длине волны $\lambda = 690 \text{ нм}$, так как величина рассеяния падает с длиной волны. Расположив источник на расстоянии R , заведомо большем максимального

значения $R_b(\lambda)$, можно свести к минимуму влияние дифракции. Для учета «мертвой зоны» (расстояния r между источником и экраном) применяется более точная, нежели (4), формула:

$$b = -\frac{\ln(1 - E_s/E_t)}{R - r}. \quad (5)$$

Измерение спектра прямого рассеяния состоит в поочередном измерении освещенности на расстоянии $R > R_b$ от затененного и открытого источника-1 с каждым из 15 светофильтров.

Общая методическая погрешность измерений по нашим оценкам не превышает 20%, при этом ошибка относительного спектрального хода гораздо меньше, так как систематическая погрешность слабо зависит от длины волны. Метод является абсолютным (не требует калибровки яркости источника) и позволяет осуществлять непрерывный долговременный мониторинг среды.

1.3. Измерение спектра обратного рассеяния

Общий показатель рассеяния b разделяют на показатели рассеяния в переднюю b_f и заднюю b_b полусферы (обратное рассеяние). Отношение показателей называют коэффициентом асимметрии $K = b_f/b_b$ индикатрисы рассеяния. Для измерения количества рассеянного назад света используется изотропный источник-2 (см. рис. 1), излучающий в угле 4π , затененный большим (35 мм) экраном так, что свет от него попадает на приемник, только рассеявшийся на угол, больший $\pi/2$. Для оценки величины, а главное, для определения формы спектра обратного рассеяния $b_b(\lambda)$ мы используем отношение количества света, рассеянного вперед от источника-1 (рис. 4, этап В: измерение с затенением источника-1), к количеству рассеянного назад света от источника-2 (рис. 4, этап D: измерение с затенением источника-2).

Поскольку источники имеют разную яркость, то необходимо измерить отношение их яркостей при открытых источниках $n = A/C$ и учесть это при вычислении коэффициента асимметрии: $K = nB/D$. Очевидно, что схема эксперимента не вполне соот-

ветствует определению измеряемой величины, однако результаты моделирования эксперимента методом Монте-Карло [18] показывают, что при введении необходимых поправок на присутствующее в среде истинное поглощение (которое одновременно измеряется описанным выше методом) возможно определение асимметрии с погрешностью $< 10\%$. Метод также является абсолютным и не требует предварительной калибровки.

1.4. Метод измерения спектральных и угловых характеристик рассеяния

Для измерения угловой зависимости рассеяния в качестве приемника используются (см. рис. 1) находящееся в воде поворотное зеркало с блендой и узконаправленный ($0,5^\circ$) коллиматор, расположенный внутри герметичного корпуса перед ФЭУ-1. Спектральная зависимость выделяется с помощью интерференционных светофильтров. В качестве источника света используется изотропный источник-2. Рассмотрим схему эксперимента в приближении однократного рассеяния (рис. 5).

Число однократно рассеявшихся на угол $\gamma = (\alpha + \theta)$ фотонов $N(\alpha, R)$ определяется [19] следующим образом:

$$N(\alpha, R) = N_0 \frac{bS}{R \sin \alpha} \int_0^{\pi - \alpha} \chi(\alpha + \theta) \times \exp(-cR) \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha + \sin \theta} d\theta. \quad (6)$$

Пренебрегая удлинением траектории (экспонента при малых α близка к единице) и дифференцируя по углу отклонения приемника, получаем выражение для индикатрисы рассеяния:

$$\chi(\alpha) \approx \frac{d[N(\alpha, R) \sin \alpha]}{d\alpha}. \quad (7)$$

Алгоритм измерений угловой и спектральной зависимости следующий: 1) перед ФЭУ-1 устанавливается начальный светофильтр; 2) включается источник-2 с яркостью, не выводящей приемник из

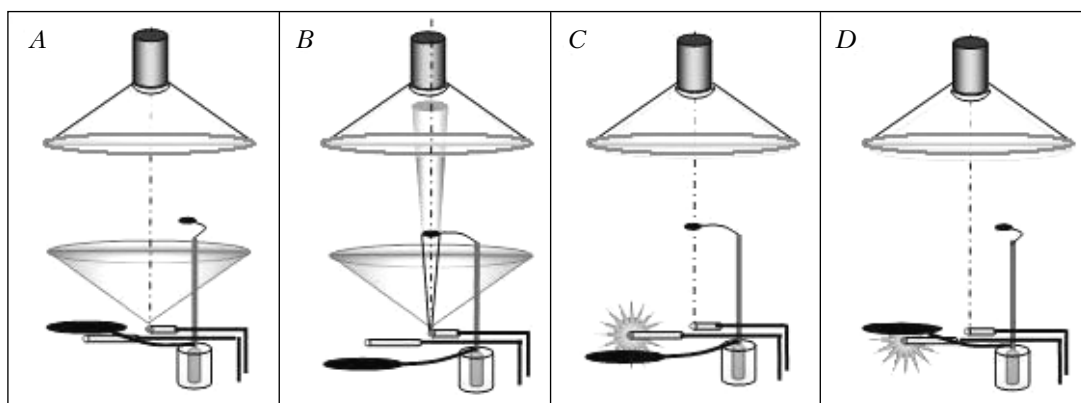


Рис. 4. Этапы измерения коэффициента асимметрии рассеяния: А – открытый источник-1; В – затененный источник-1; С – открытый источник-2; D – затененный источник-2

линейного диапазона — 10^5 имп/с; 3) зеркало устанавливается на некий произвольный небольшой угол, отсчитываемый от направления на источник; 4) зеркало поворачивается с шагом $1/32^\circ$ в направлении уменьшения угла, т.е. приближается к максимуму и проходит через него; 5) измерения продолжают до тех пор, пока сигнал не станет меньше 30-кратного значения темнового темпа счета ФЭУ-1, в нашем случае это 1000 имп/с; 6) зеркало возвращается в исходное положение; 7) устанавливается следующий светофильтр; 8) устанавливается яркость источника-2, соответствующая данному фильтру, и цикл измерений повторяется.

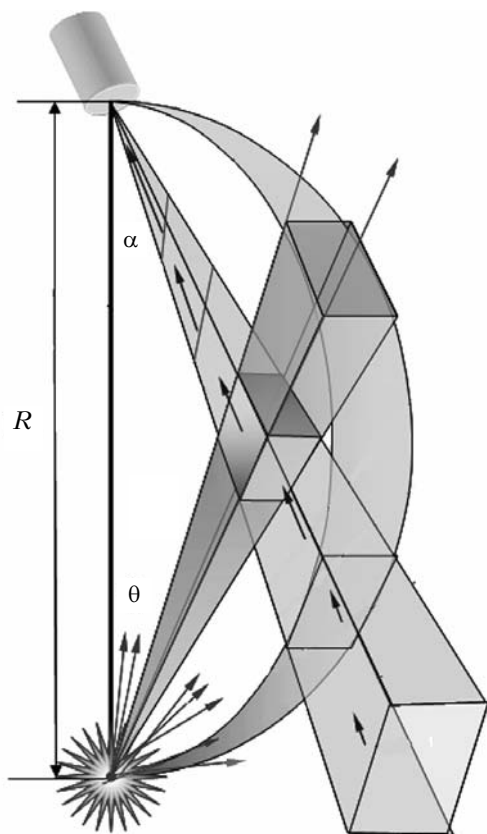


Рис. 5. Измерение индикатрисы рассеяния

Максимальные значения яркости соответствуют нулевому углу. Бленда полностью закрывает приемник от прямого излучения на углах $\alpha > 2,5^\circ$. До этого угла прямое излучение преобладает над рассеянным, причем угловая зависимость прямого излучения неизвестна, вследствие чего график угловой зависимости рассеяния имеет смысл строить, начиная с угла 3° . Для построения спектральной зависимости дифференциального сечения рассеяния полученные угловые зависимости для каждого светофильтра нормируются. Эта операция эквивалентна выравниванию спектра падающего излучения и спектральной чувствительности приемника. После нормировки производится усреднение данных по некоторому оптимальному углу, эта операция необходима для сглаживания функции от статистических выбросов. Затем полученные сглаженные функции дифференцируются

по углу, в результате получается спектральное семейство индикатрис рассеяния. Фиксируя угол, можно получить спектр рассеяния на данный угол.

2. Некоторые экспериментальные результаты

2.1. Спектры поглощения

На рис. 6, а показаны примеры экспоненциальных зависимостей для разных длин волн, измеренных в 2008 г. и соответствующих формуле (1). Символом $L_a(\lambda)$ обозначена длина поглощения, равная $1/a(\lambda)$.

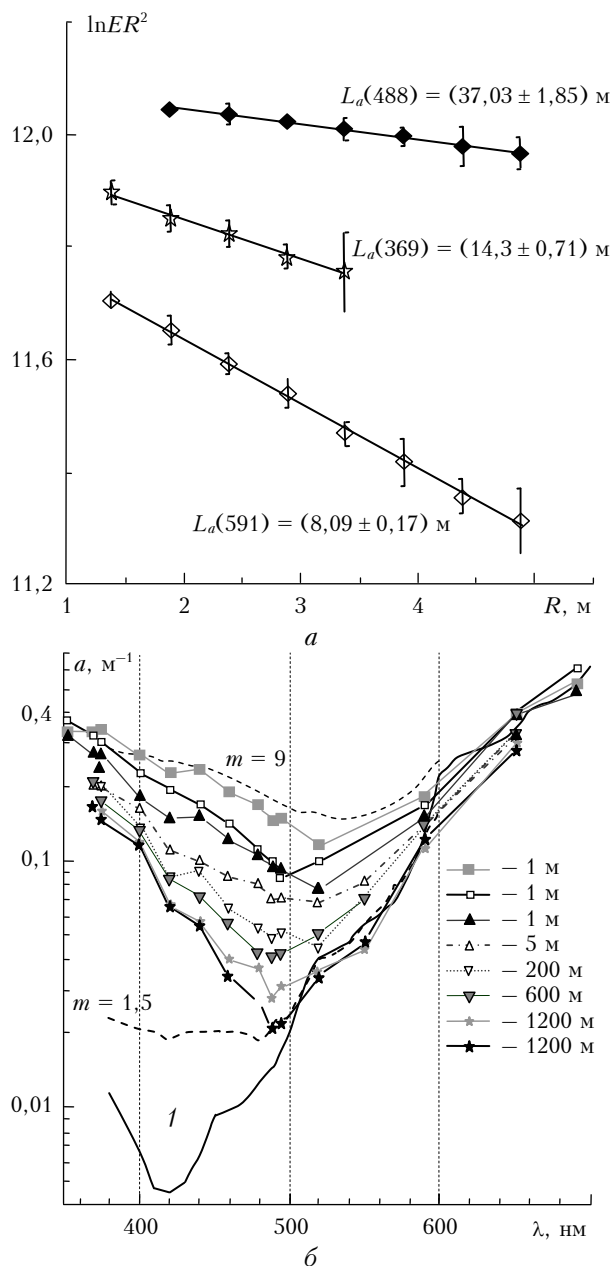


Рис. 6. Измеренные зависимости освещенности от расстояния между источником и приемником (а) и примеры спектров поглощения воды на различных глубинах (б)

На рис. 6, б показаны примеры спектров поглощения для разных глубин, измеренные в 2001 и 2004 гг. Кривая 1 соответствует спектру поглощения чистой воды, полученному в лабораторных условиях [20]. Верхние три кривые, относящиеся к глубине 1 м, показывают достаточно сильную изменчивость спектра поглощения в течение нескольких суток в поверхностном слое озера. В целом поведение спектральной зависимости поглощения соответствует известным зависимостям для вод открытого океана [21]. Видно, что с уменьшением глубины поглощение растет особенно быстро в коротковолновой области спектра (за счет растворенного «желтого» органического вещества), при этом минимум поглощения смещается от 488 до 520 нм. Здесь же пунктиром показаны примеры спектров поглощения для вод открытого океана, полученные Пелевиным и Ростовцевой [22] для случая олиготрофных (значение оптического индекса типа вод $m = 1,5$) и эвтрофных вод ($m = 9$). Видно, что поглощение в коротковолновой части спектра в водах Байкала растет значительно быстрее, чем в океанических водах. Это может быть объяснено повышенной концентрацией (накоплением) «желтого вещества» (растворенной органики) в глубинных водах Байкала из-за затрудненного обмена глубинных и поверхностных вод.

Показанные на рис. 6, б минимальные значения поглощения на уровне $0,02\text{--}0,025\text{ м}^{-1}$ наблюдались только в некоторые годы (1992, 1997, 2001, 2004 и 2008). В остальные годы наблюдений среднее значение показателя поглощения в спектральном минимуме на горизонтах ниже 300 м составляло $0,044\text{ м}^{-1}$.

Независимые измерения рассеяния и поглощения позволяют получить статистическую зависимость между этими величинами. Основой для существования подобной зависимости является то, что в водах открытого океана и в озере вдали от речных стоков динамика оптических параметров определяется в основном развитием крупных органических частиц (фито- и зоопланктон), для которых изменчивость показателя рассеяния значительно больше, чем показателя поглощения, и существуют достаточно стабильные соотношения между микрофизическими и оптическими параметрами вещества частиц. Для вод открытого океана известна основанная на анализе экспериментальных наблюдений зависимость [25] между показателями рассеяния b и ослабления $c = a + b$ для длины волны 550 нм: $b = 0,944c \div 0,048$. В наших измерениях получена похожая зависимость (в минимуме поглощения) для верхних слоев воды и несколько отличная для глубинных:

$$\begin{aligned} b &= 0,933c - 0,049, R = 0,99, h < 400\text{ м}, \\ b &= 0,752c - 0,026, R = 0,66, h > 400\text{ м}. \end{aligned} \quad (8)$$

Изменение вида зависимости и уменьшение коэффициента корреляции R для глубинных вод объясняются тем, что рассеяние гидрозолеи на большой глубине становится незначительным и преобладающий вклад в ослабление здесь вносит собственное поглощение воды и растворенных органических веществ.

Корреляция между одновременно измеренными асимметрией индикатрисы рассеяния K и альбедо однократного рассеяния $\Lambda = b/c$ приведена на рис. 7.

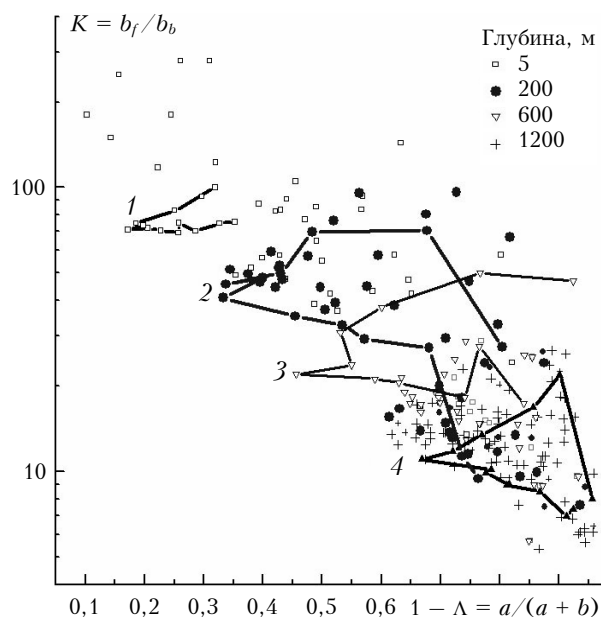


Рис. 7. Корреляция между одновременно измеренными коэффициентом асимметрии K и альбедо однократного рассеяния Λ для частиц гидрозолеи на разных глубинах. Серия 1 – 24.03.2005; 2 – 07.04.2001; 3 – 16.03.2001; 4 – 01.04.2005

Измерения сгруппированы по глубине и для каждой глубины в одной из серий измерений (дата измерения приводится в подписи к рисунку) линиями соединены точки, соответствующие изменению длины волны от 351 до 690 нм. В основном асимметрия индикатрисы растет с увеличением длины волны, достигая максимума в интервале 600 нм, после чего падает к красному краю спектра. Слабо вытянутые индикатрисы характерны для прозрачных (глубинных) вод с малым содержанием гидрозолеи, рассеяние в этом случае мало и мало Λ . Большие значения Λ могут наблюдаться в мутных водах с повышенным содержанием крупных органических частиц, но в этом случае индикатриса рассеяния будет характеризоваться большой асимметрией. Падение асимметрии в красном крае спектра (т.е. усиление обратного рассеяния) в [26] объяснялось адсорбированием на поверхности минеральных частиц взвеси «желтого» поглощающего органического вещества. В [18] показано, что подобное явление может быть объяснено изменением комплексного показателя преломления хлоропластов в линии поглощения хлорофилла 680 нм.

2.2. Спектры и индикатриса рассеяния

На рис. 8, а показан пример наиболее часто встречающейся формы спектра прямого рассеяния (26.03.2006, глубина 1 м), б – «необычная» форма (22.03.2006, глубина 580 м). Чаще всего спектральная зависимость прямого рассеяния близка к $1/\lambda$, но, как видно, не всегда. Так, минимальные и мак-

симальные значения показателя прямого рассеяния на глубине 580 м в 2006 г. в видимом диапазоне спектра изменялись более чем в 20 раз, причем на той же глубине 06.04.2006 г. была похожая картина: форма спектра была другой, но значения изменялись в 10 раз.

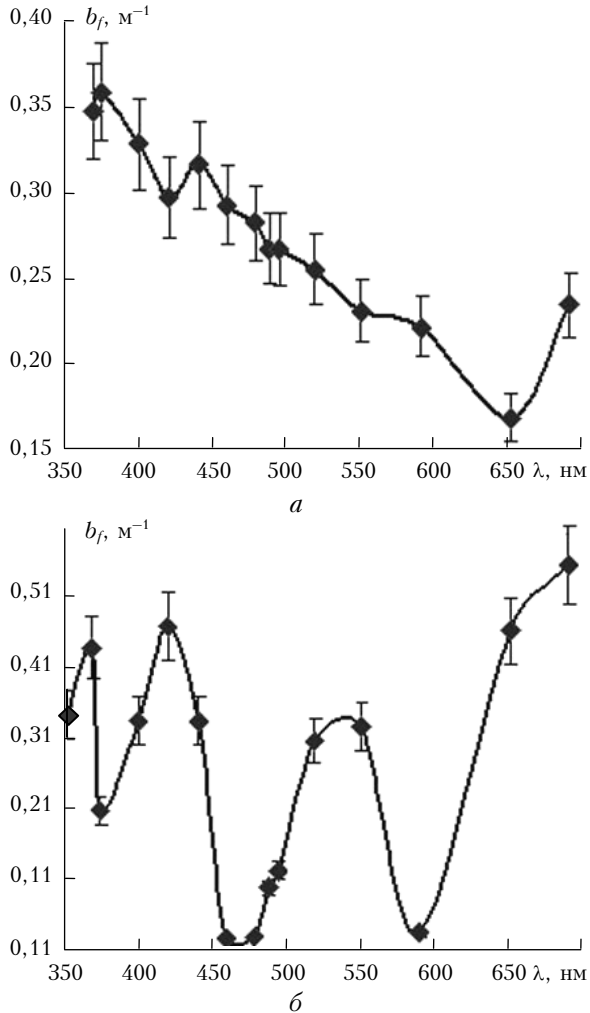


Рис. 8. Спектры прямого рассеяния

Еще большее отличие значений по спектру наблюдается в спектрах коэффициента асимметрии и обратного рассеяния. На рис. 9, *a* показана «обычная» форма спектра коэффициента асимметрии (04.04.2006, глубина 20 м), *б* — «необычная» (26.03.2006, глубина 1 м).

В целом по спектру наблюдаются изменения в десятки — сотни раз (в середине и на краях спектра). 26.03.2006 на глубине 1 м в течение 3 сут было получено 6 спектров коэффициента асимметрии, подобных приведенному на рис. 8, *б*. Экстремумы на графиках рис. 9, *a* и 9, *б* коррелируют, а спектр коэффициента асимметрии, измеренный в тот же день на глубине 1000 м (на рисунке не показан), является уменьшенной в 10 раз копией рис. 9, *б*. Поскольку в тот же период были получены и гладкие спектры, наличие экстремумов невозможно объяснить систематической ошибкой прибора.

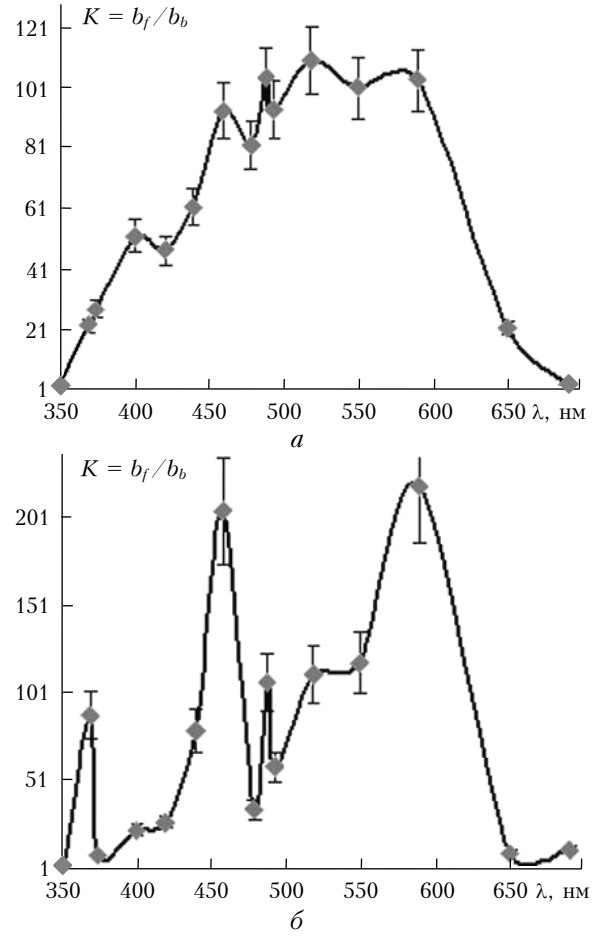


Рис. 9. Спектры коэффициента асимметрии

Описанная в п. 1.4 процедура измерения углового распределения яркости, примененная последовательно для каждого светофильтра, позволяет получить спектральное семейство индикатрис. Естественно, в максимуме яркости, соответствующей нулевому углу, спектр принимаемого сигнала имеет произвольную форму. Нормируя спектр принимаемого сигнала на константу, мы тем самым эффективно формируем спектр излучения источника пропорциональным $\exp(-c(\lambda)R)$, где $R = 1$ м, а эффективную спектральную чувствительность приемника приводим к константе. Дифференцируя затем полученные угловые зависимости яркости по углу, в соответствии с (7), мы получаем спектральное семейство индикатрис рассеяния $\chi(\gamma, \lambda)$, две из которых для излучения с длинами волн 350 и 590 нм показаны на рис. 10.

Минимальный угол измерений ограничен 3° ввиду влияния падающего излучения. Максимальный угол 6° диктует статистика: на больших углах, на краях спектра недостаточно света. Очевидно, что тонкая структура индикатрисы рассеяния зависит от длины волны.

В результате операции спектральной нормировки можно построить зависимость значений индикатрис рассеяния от длины волны для фиксированного угла. Приборную зависимость спектра принимаемого сигнала от угла поворота приемника (зеркала)

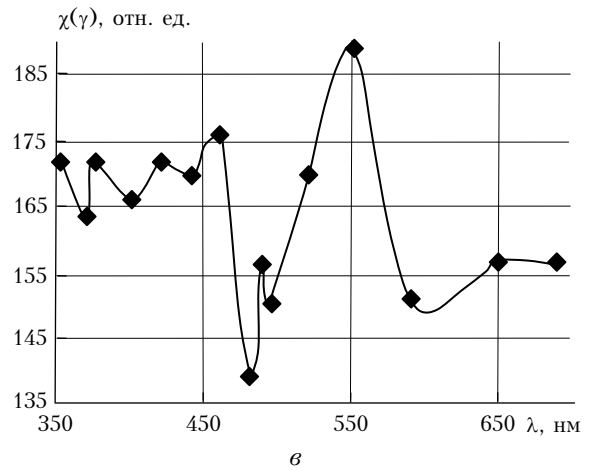
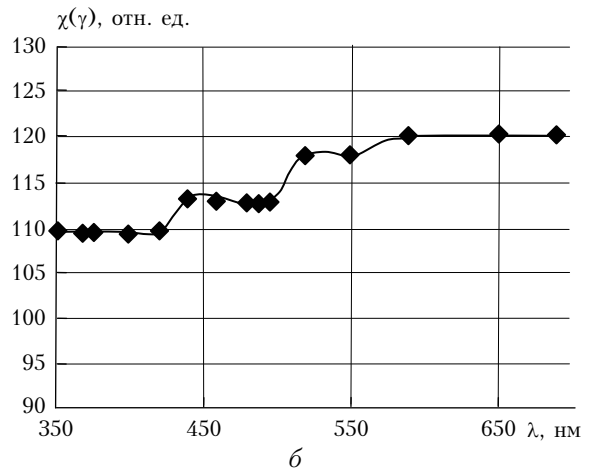
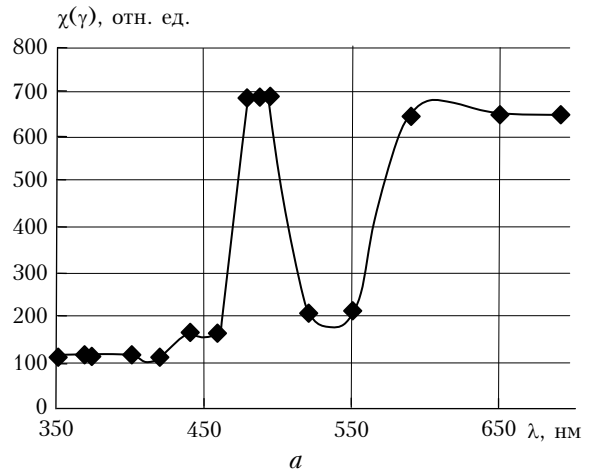
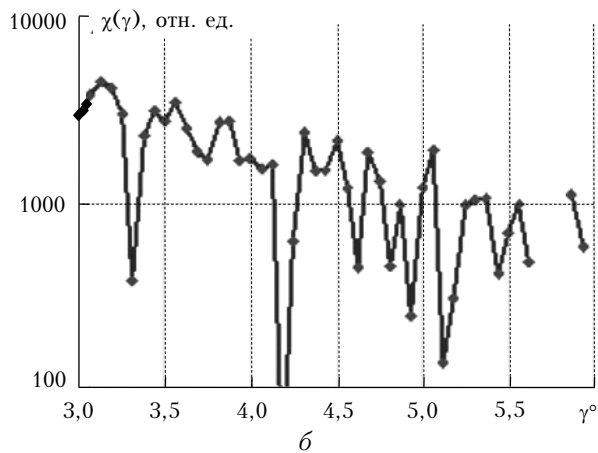
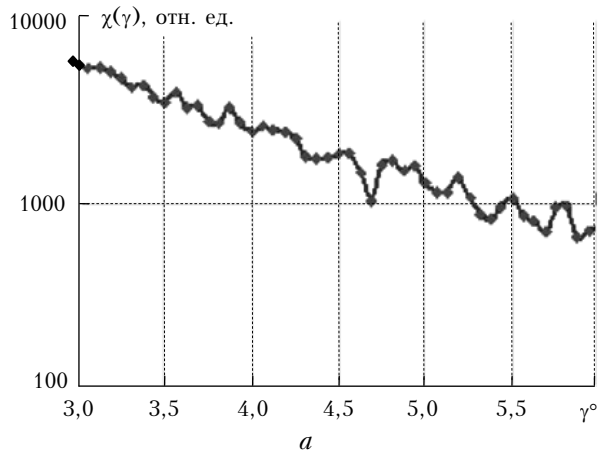


Рис. 10. Индикатрисы рассеяния для длин волн 350 (а) и 590 нм (б)

можно считать константой, а так как спектр падающего на приемник прямого (не рассеянного) излучения мы искусственно сгладили, то этот свет не внесет искажений в форму получаемых спектров рассеяния. На рис. 11 показаны полученные спектры рассеяния на углы 0,0625, 0,25 и 0,5°.

Наибольшего внимания заслуживает тот факт, что спектр рассеяния на угол 0,5° является «дополнением» к спектру рассеяния на 0,0625°. Посередине между «нулем» и углом 0,5°, т.е. на угле 0,25°, спектр рассеяния близок к константе. Характерно, что 0,25° — это половинный угол зрения приемника. Мы пока затрудняемся объяснить эффект «дополнения», наблюдаемый во всех шести измерениях, полученных с 25.03.09 по 31.03.09 на глубине 1 м. Эффект «дополнительного» спектра — это известное явление в поглощающих прозрачных пленках [23], возможно мы имеем дело с чем-то подобным.

Коэффициент корреляции спектров рассеяния на углы < 5°, измеренных с 25 по 28.03.09, выше 0,5. Спектры, измеренные 30-го и 31-го, также коррелируют между собой, но заметно отличаются от первых, несмотря на неизменные условия измерений и параметры прибора. Отличие спектров указывает на то, что наблюдаемые эффекты не являются приборными, по-видимому в последние дни марта произошли изменения состава водной среды.

Рис. 11. Измерения спектра рассеяния на фиксированный угол: а — 0,0625; б — 0,25; в — 0,5°

На рис. 12 представлены спектры рассеяния на 3°, измеренные в период с 26.03.09 по 31.03.09. На этом угле наблюдается максимальная корреляция спектров.

Первоначально целью данных измерений была попытка объяснить природу экстремумов, иногда наблюдаемых в спектрах прямого рассеяния (например, на рис. 8, б). По-видимому, при некоторых условиях экстремумы в спектрах рассеяния на фиксированный угол не сглаживаются за счет интегрирования

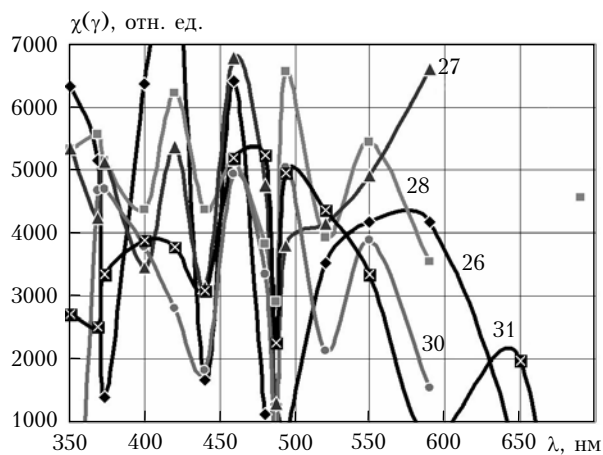


Рис. 12. Спектр рассеяния на угол 3° . Цифры указывают дату измерений в марте 2009 г.

по всем углам и проявляются в спектрах прямого рассеяния. Спектры рассеяния на фиксированный угол, насколько нам известно, до сих пор не измерялись. На наш взгляд, спектры являются не просто иной формой представления двумерной функции $\chi(\gamma, \lambda)$, а могут нести дополнительную, по сравнению с угловой зависимостью рассеяния, информацию о составе взвешенного вещества.

Заключение

Сложность получения оптической информации и сложность извлечения из нее информации о биохимических и физических процессах в естественных водоемах – основные причины невнимания к оптическим методам. Методы измерений ПГХ, описанные выше, позволяют создавать стационарную подводную аппаратуру, пригодную для непрерывного мониторинга оптических характеристик воды в афотической зоне.

Совместные испытания ASP-15 и стандартного прибора AC9 [10], проводившиеся в 2001 г., показали совпадение результатов и подтвердили работоспособность метода [24]. Дальнейшее развитие методов и потребность в регулярных измерениях ПГХ не только в глубинных, но и в поверхностных водах Байкала привели к разработке двух отдельных приборов: ВАИКАЛ-4D (Deep), предназначенный для измерения в афотической зоне, и ВАИКАЛ-1S (Surface) – для измерений вблизи поверхности в фотической зоне. В настоящий период приборы проходят испытания.

Таким образом, мы пытаемся научиться изменять оптические характеристики максимально подробно, непрерывно во времени, в дискретных точках пространства. В перспективе – вертикальное зондирование со стационарной буйковой станции.

Открытым остается вопрос об извлечении полезной информации. На наш взгляд, необходим комплексный подход, сочетающий модельный расчет и поиск эмпирических связей между известными параметрами частиц и параметрами светорассеяния. Это, в свою очередь, требует создания метрологически обеспеченного лабораторного оборудования

и выполнения большого объема совместных биохимических и оптических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гк. № 02.740.11.0018, П1242), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)» (задания РНП 2.2.1.1/1483, 2.1.1/1539, 2.2.1.1/5901 НОЦ «Байкал»), Минобрнауки (госконтракт 02.740.11.0674), РФФИ (гранты № 07-02-00791, 08-05-98007, 10-02-10000).

1. *Baikal Neutrino Collaboration*. The Baikal underwater neutrino telescope: design, performance, and first results // *Astropart. Phys.* 1997. V. 7, Is. 3. P. 263–282.
2. *Айнутдинов В.М., Аврорин А.В., Балканов В.А., Белолуптиков И.А., Богородский Д., Буднев Н.М., Вишневецки Р., Гапоненко О.Н., Голубков К.В., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гришин О.Г., Данильченко И.А., Джилкибаев Ж.-А.М., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Дьячок А., Жуков В.А., Клабуков А.М., Климов А.И., Конышев К., Кочанов А.А., Кошечкин А.П., Кузьмичев Л.А., Кулепов В.Ф., Кулешов Д.А., Мидделл Е., Миленин М.Б., Мирзагов Р.Р., Михеев С.П., Осипова Е.А., Панфилов А.И., Паньков Л.В., Паньков Г.Л., Петухов Д.А., Плисковский Е.Н., Полещук В.А., Попова Е.Г., Похил П.Г., Просин В.В., Розанов М.И., Рубцов В.Ю., Суворова О.В., Таращанский Б.А., Фиалковский С.В., Шайбонов Б.А., Шейфлер А.А., Штиринг К., Яшин И.В.* Статус Байкальского нейтринного эксперимента // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73, № 5. С. 682–684.
3. *Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белолуптиков И.А., Богородский Д.Ю., Буднев Н.М., Вишневецки Р., Гапоненко О.Н., Голубков К.В., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гришин О.Г., Данильченко И.А., Джилкибаев Ж.-А.М., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Дьячок А.Н., Жуков В.А., Клабуков А.М., Климов А.И., Конышев К.В., Кочанов А.А., Кошечкин А.П., Кузьмичев Л.А., Кулепов В.Ф., Кулешов Д.А., Мидделл Е., Миленин М.Б., Мирзагов Р.Р., Михеев С.П., Осипова Э.А., Панфилов А.И., Паньков Л.В., Паньков Г.Л., Петухов Д.П., Плисковский Е.Н., Полещук В.А., Попова Е.Г., Похил П.Г., Просин В.В., Розанов М.И., Рубцов В.Ю., Суворова О.В., Таращанский Б.А., Фиалковский С.В., Шайбонов Б.А., Шейфлер А.А., Широков А.В., Штиринг К., Яшин И.В.* Поиск нейтрино высоких энергий в байкальском нейтринном эксперименте // *Письма в Астрон. ж.* 2009. Т. 35, № 10. С. 723–735.
4. *Иванов А.П.* Основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.
5. *Ерлов Н.* Оптическая океанография. М.: Мир, 1970. 224 с.
6. *Оптика океана и атмосферы* / Ред. К.С. Шифрин. М.: Наука, 1981. 230 с.
7. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 656 с.
8. *Сидько Ф.Я., Лопатин В.Н., Парамонов Л.Е.* Поляризационные характеристики взвесей биологических частиц. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. 98 с.
9. *Hobilabs*, C-beta manual in www.hobilabs.com
10. *WETLabs*, AC9 manual in www.wetlabs.com
11. *Hobilabs*, In-Situ Spectrophotometer / Absorption Meter manual in www.hobilabs.com
12. *Козлянинов М.В.* Основные принципы оптических измерений в море и некоторые гидрофотометрические расчеты

- // Оптика океана и атмосферы / Ред. К.С. Шифрин. М.: Наука, 1981. 230 с.
13. Буренков В. И., Кельбалиханов Б. Ф., Копелевич О.В. Методы измерений оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Ред. А.С. Монин. М.: Наука, 1983. С. 114–149.
 14. Bauer D., Brun-Cottan J.C., Saliot A. Principe d'une mesure direct dans l'eau de mer du coefficient d'absorption de la lumier // Cah. Oceanogr. 1971. V. 23, N 9. P. 841–858.
 15. Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гальперин М.Д., Джилкибаев Ж.-А.М., Ланин О.Ю., Таращанский Б.А. Измерение показателя поглощения света в водной среде озера Байкал // Океанология. 1990. Т. 30, № 6. С. 1022–1026.
 16. Буднев Н.М., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р., Таращанский Б.А. Численное моделирование аномальных пространственных распределений освещенности, получаемых в ходе измерений показателя поглощения света байкальской водой // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 351–359.
 17. Маньковский В.И. Характеристики индикатрис рассеяния света в водах оз. Байкал // Автоматизация лимнологических исследований и световой режим водоемов. Новосибирск: Наука, 1984. С. 125–137.
 18. Буднев Н.М., Коханенко Г.П., Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С., Миргазов Р.Р., Таращанский Б.А. Измерения асимметрии рассеяния гидрозоля по световому полю точечного источника // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 105–113.
 19. Гапоненко О.Н., Миргазов Р.Р., Таращанский Б.А. Определение первичных гидрооптических характеристик по световому полю точечного источника // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9, № 8. С. 1069–1076.
 20. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 33. P. 8710–8722.
 21. Копелевич О.В. Экспериментальные данные об оптических свойствах морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Ред. А.С. Монин. М.: Наука, 1983. С. 166–208.
 22. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 9. С. 989–995.
 23. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехтеоретиздат, 1951. 288 с.
 24. Simultaneous measurement of water optical properties by AC-9 transmissometer and ASP-15 inherent optical properties meter in lake Baikal. Nucl. Instrum. Meth. A298. 2003. P. 231–239.
 25. Levin I.M., Kopelevich O.V. Relationships between the seawater optical properties at 550 nm // Current Problems in Optics of Natural Waters / I. Levin and G. Gilbert, eds.: Proc. of D.S. Rozhdestvensky Optical Society. St. Petersburg, 2003. P. 289–292.
 26. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. «Аномальная» спектральная зависимость показателя рассеяния света назад в водах, отличающихся большим содержанием фитопланктона // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 4. С. 319–322.

B.A. Tarashchanskii, G.P. Kokhanenko, R.R. Mirgazov, E.V. Ryabov, A.S. Yagunov. Methods and results of monitoring optical characteristics of the Baikal Neutrino Telescope with the use of a stationary deep-water device ASP-15.

Some results of the spectral and angular dependences of the IOP at different depths are presented. The submerged device ASP-15 is designed for continuous monitoring of inherent optical properties (IOP) of the Baikal Lake water. It is placed in South Baikal near the Neutrino Telescope NT200+ and used for optical accompaniment of its work at 1200 m depth. The construction of the device, methods of the light field measurements and retrieval of the optical properties are described.