

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.463.5

Н.М. Буднев<sup>1</sup>, Г.П. Коханенко<sup>2</sup>, Р.Р. Миргазов<sup>1</sup>, Б.А. Таращанский<sup>1</sup>

**Численное моделирование аномальных пространственных  
распределений освещенности, получаемых в ходе  
измерений показателя поглощения света байкальской водой**

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики Иркутского госуниверситета*

<sup>2</sup> *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 1.11.2005 г.

Проведен анализ работы стационарного глубоководного комплекса ASP-15, расположенного в южной части оз. Байкал, с помощью которого проводятся круглогодичные измерения гидрооптических характеристик на глубинах 1000–1200 м. Метод определения показателя поглощения основан на измерении скорости спада освещенности от изотропного излучателя при изменении расстояния между источником и приемником. На основе численного моделирования светового поля проведена оценка точности применяемого метода, выявлены возможные причины появления аномальных зависимостей освещенности от расстояния. Приведены экспериментальные данные, полученные прибором ASP-15 в 2001–2005 гг.

**Введение**

В 1960 г. М.А. Марков предложил использовать глубокие природные водоемы с прозрачной водой для регистрации нейтрино высоких энергий [30]. С 1998 г. на оз. Байкал работает первый глубоководный нейтринный телескоп НТ-200 [1], эффективный объем которого в 2005 г. был существенно увеличен за счет развертывания трех дополнительных гирлянд с оптическими модулями [31]. Также ведутся работы по созданию глубоководных нейтринных телескопов в Средиземном море [32]. Во всех этих проектах природная вода является одновременно и веществом мишени, с которой взаимодействуют нейтрино, и средой, в которой генерируется и распространяется черенковское излучение, вызываемое релятивистскими заряженными частицами. Для правильного анализа получаемых с помощью нейтринных телескопов данных необходимо иметь информацию об оптических параметрах водной среды, которые в Байкале, как и в любом природном водоеме, не могут быть постоянными [3].

Для долговременного мониторинга первичных оптических характеристик в районе нейтринного телескопа НТ-200 в 1992 г. создан прибор ASP-15 (прежнее название – «Бурхан») [8]. С помощью этого прибора ведутся круглогодичные измерения оптических характеристик воды (коэффициентов поглощения и рассеяния и индикатрисы рассеяния) в диапазоне длин волн 350–690 нм на глубине 1200 м. В марте–апреле, в период профилактики аппаратуры, проводятся измерения гидрооптических характеристик во всем слое от поверхности до дна [2, 33].

Все оптические параметры рассеивающей среды (такие, как показатели рассеяния, поглощения и ослабления) имеют строгие математические определения [4–6], чем и обуславливается устройство гидрооптических приборов, служащих для точного измерения этих величин. Однако большинство известных гидрооптических приборов [7] 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 комплексе ASP-15 используются приближенные методы восстановления оптических параметров по световому полю от точечного источника [9, 10]. Для измерения показателя поглощения используется метод, принцип которого впервые предложен в [11]. Он основан на предположении, что в однородной среде зависимость освещенности площадки от расстояния до источника описывается экспоненциальным законом с показателем, равным показателю поглощения. Анализ нескольких лет работы комплекса ASP-15 [10] показал, что большинство измерений с точностью не хуже 5% описываются указанным законом. Однако в некоторых случаях (как правило, при экстремально высокой прозрачности воды) наблюдались заметные отклонения от этой зависимости, затрудняющие интерпретацию измерений. Приведенный в [9] анализ возможных погрешностей метода основан на приближении однократного рассеяния и условии сильной анизотропии рассеяния, что не всегда выполняется в реальных измерениях.

В данной статье проводится анализ работы комплекса ASP-15, основанный на численном

моделировании светового поля от изотропного источника в рассеивающей среде с оптическими параметрами, характерными для различных типов естественных вод.

## 1. Измерение показателя поглощения по параметрам светового поля от точечного источника

Вычисление показателя поглощения основано на известном выражении для дивергенции светового вектора  $\mathbf{H}$  [12,13]:

$$\operatorname{div}\mathbf{H} = -aE^0, \quad (1)$$

где  $a$  — показатель поглощения;  $E^0$  — пространственная освещенность. Вектор светового потока  $\mathbf{H}$ , определенный Гершуном [14], характерен тем, что его проекция на любую ось равна разности освещенностей площадок, ориентированных в направлении оси и в противоположном направлении. Так, если ось  $z$ , как обычно предполагается в гидрооптических измерениях, направлена вертикально вниз, то  $H_z = E_D - E_U$  ( $E_D$  и  $E_U$  — соответственно освещенности сверху и снизу). Напомним, что в этом случае  $E^0 = E_D + E_U$ . Непосредственно измерить дивергенцию вектора  $\mathbf{H}$  в натуральных условиях очень трудно. Выражения для вычисления показателя поглощения через обычно измеряемые погружаемыми приборами величины (освещенности  $E_D$  и  $E_U$ , показатель вертикального ослабления освещенности  $\alpha_d$ , угловое распределение яркости) также известны и приводятся Пелевиным [15]. Идеализация условий наблюдения может привести к очень простым, но весьма приближенным зависимостям. Например, для поверхностного слоя моря (горизонтальная однородность) при солнечном освещении и разумном предположении о том, что  $E_U \ll E_D$ , Ерлов [5] приводит выражение

$$E_D = E_0 \exp(-aR), \quad (2)$$

где  $E_0$  — освещенность на поверхности моря;  $R$  — глубина наблюдения. Однако использование солнечного освещения невозможно в аппаратуре, предназначенной для глубоководных исследований. В этом случае, как правило, применяются искусственные источники света. В случае точечного изотропного источника в однородной среде для вектора  $\mathbf{H}$  не равен нулю только радиальный компонент  $H_r$ , и можно записать выражение (1), используя полярные координаты:

$$\operatorname{div}\mathbf{H} = \frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r^2 H_r) \right] = -aE^0 \quad (3)$$

или, поскольку модуль  $H = H_r$ ,

$$\frac{dH}{dr} + H \frac{2}{r} = -aE^0. \quad (4)$$

Выражение (4) получено в [16] и приведено к виду, содержащему измеряемые в гидрооптических экспериментах величины:

$$a = \alpha_F(r) \frac{H}{E^0} = \alpha_F(r) \mu(r), \quad (5)$$

где  $\alpha_F$  — показатель ослабления потока  $F(r) = 4\pi r^2 H(r)$  через сферу радиуса  $r$ , окружающую источник;  $\mu(r)$  — средний косинус тела яркости излучения в точке  $r$ . Еще более простой способ определения поглощения, требующий измерения только освещенности площадки со стороны источника, был предложен в [11]. Будем обозначать по-прежнему освещенности площадок, ориентированных в направлении на источник и от него, через  $E_D$  и  $E_U$ . Предположим, что рассеяние назад пренебрежимо мало и, кроме того, мала скорость изменения обратно рассеянного излучения:

$$E_U \ll E_D \approx E^0; \quad \frac{dE_U}{dr} \ll \frac{dE_D}{dr}. \quad (6)$$

В этом случае выражение (4) преобразуется к виду

$$\frac{dE_D}{dr} + E_D \frac{2}{r} = -aE_D, \quad (7)$$

откуда следует простой закон убывания освещенности площадки с удалением от источника:

$$E_D = \frac{F_0}{r^2} \exp(-ar). \quad (8)$$

Здесь  $F_0$  — световой поток, испускаемый источником. Пелевин [16] указывает, что выражение (7) впервые предложено Н.Г. Болдыревым. Измеряя зависимость освещенности от расстояния, определяем поглощение по скорости спада сигнала, не нуждаясь в проведении абсолютной калибровки прибора.

Условия (6) являются достаточными для справедливости выражения (8), однако они выглядят чересчур сильными и их выполнимость для различных рассеивающих сред требует проверки. Кроме того, их выполнимость невозможно оценить *a priori*, не выполняя расчетов или измерений светового поля. Следует отметить, что в работе [11] закон убывания освещенности (8) был получен не из уравнения (3), а из общих соображений: а) об убывании потока излучения обратно пропорционально квадрату расстояния и б) об экспоненциальной зависимости потока от величины истинного поглощения в среде. Рассмотрим эти моменты отдельно.

а) Пусть мы имеем консервативную среду ( $a = 0$ ). В этом случае из (1) точно следует, что модуль светового вектора  $H = E_D - E_U$  обратно пропорционален квадрату расстояния (закон сохранения энергии). Чтобы это выполнялось для измеряемой компоненты  $E_D$ , достаточно условия  $E_U \ll E_D$ . Предпосылки к этому — малое обратное

рассеяние и достаточно большое поглощение, поскольку пришедший из внешней сферы поток сильнее поглотится, чем прямое излучение, из-за большей длины пробега фотонов.

б) При постоянном  $r=R$  зависимость  $E_D \sim \exp(-aR)$  строго выполняется только тогда, когда отсутствует удлинение путей фотонов в результате рассеяния. Во всяком случае необходимо, чтобы доля энергии, приходящаяся на фотоны, путь которых в среде существенно превышает расстояние между источником и приемником  $R$ , была пренебрежимо мала. Это выполняется при очень вытянутых индикатрисах рассеяния (не просто малом обратном рассеянии) и (или) при значительном поглощении, поскольку задержанные фотоны ослабляются более сильно.

Таким образом, обе составляющие формулы (8) выполняются при одинаковых условиях: необходимы сильная вытянутость вперед индикатрисы рассеяния и значительное истинное поглощение в среде. Следует ожидать, что в других случаях могут наблюдаться отклонения от (8).

Некоторый анализ получаемых комплексом ASP-15 данных приведен в [2, 18]. Характер спектральной зависимости показателя поглощения в целом соответствует наблюдающейся в водах океанов [17]. Вариации спектров поглощения на глубине 1200 м в среднем не превышают 20%. На рис. 1, а приведены примеры линейных (в логарифмическом масштабе) зависимостей, наблюдающихся в большинстве измерений и соответствующих зависимости (8). Восстановленные значения показателя поглощения приведены рядом с линиями.

Однако в некоторые периоды измерений (в 1992, 1997 и 2001 гг.), иногда в течение нескольких недель, в экспериментах наблюдаются кривые совсем другого типа (рис. 1, б). Они характеризуются ростом  $E_D R^2$  с расстоянием при малых  $R$  и часто — наличием максимума, после которого вновь начинается экспоненциальный спад. Происходит это в периоды, когда величина показателя поглощения существенно уменьшается по сравнению с типичной. Например, для длины волны  $\lambda = 488$  нм  $a = 0,02 \text{ м}^{-1}$  вместо типичного значения  $0,04\text{--}0,05 \text{ м}^{-1}$ .

Систематическая повторяемость подобных результатов не позволяет объяснить их неисправностью аппаратуры или ошибками измерений. Причина, очевидно, лежит в том, что чрезвычайно упрощенное выражение (8) не может применяться во всем диапазоне изменений оптических параметров байкальской воды. Например, в глубинной воде озера содержание гидрозоля очень мало. По измерениям с помощью ASP-15 видно, что величина показателя рассеяния иногда падает до  $0,01 \text{ м}^{-1}$ , что всего лишь в 4 раза больше показателя молекулярного рассеяния. В этих условиях велик вклад молекулярного рассеяния, имеющего симметричную индикатрису, и велико рассеяние назад. В сочетании с малым поглощением это может приводить к нарушению условий выполнимости формулы (8).

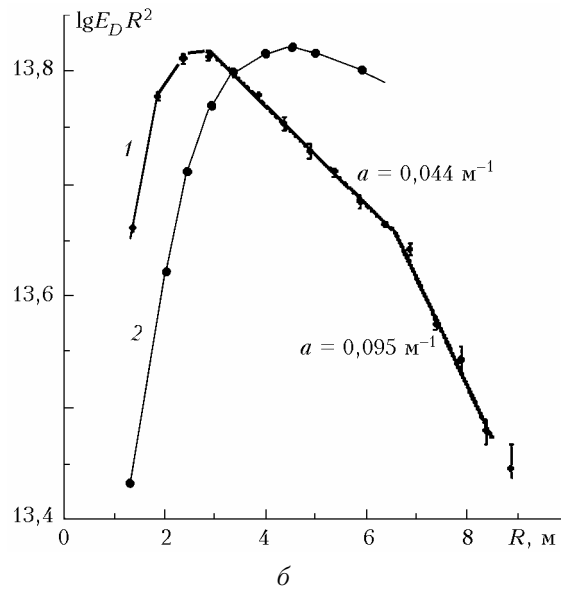
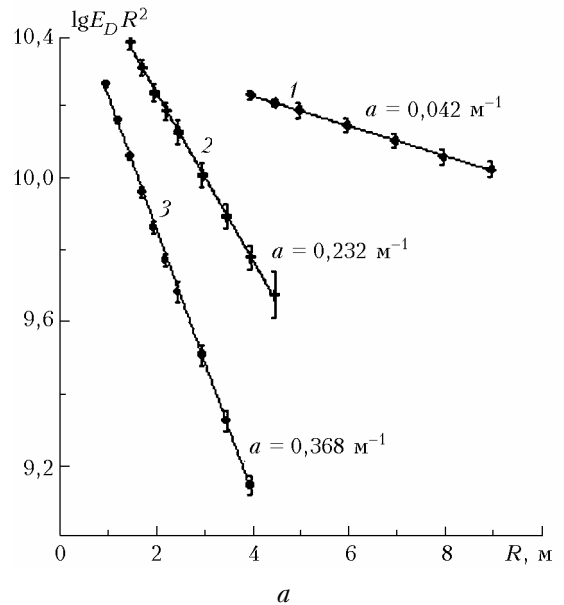


Рис. 1. Экспериментально измеренные зависимости освещенности от расстояния до источника: а — 27.12.1997 г., глубина 850 м. Длины волн  $\lambda$ : 1 — 488; 2 — 374; 3 — 651 нм; б — 1 — 13.07.2001 г., 1200 м,  $\lambda = 488$  нм; 2 — 06.04.2001, 10 м,  $\lambda = 550$  нм. Цифры у кривых — значения показателя поглощения, определенные по наклону линий

Ниже рассмотрим, при каких оптических параметрах воды могут наблюдаться аномальные зависимости типа приведенной на рис. 1, б и какие при этом могут возникать погрешности в измерении коэффициента поглощения.

## 2. Алгоритмы расчета светового поля

Моделирование световых полей от изотропного источника проводилось методом Монте-Карло с использованием алгоритмов локальной оценки [19, 20] для нестационарного уравнения переноса. Предполагается, что точечный источник  $P_0(r, t) = \delta(r)\delta(t)$

с единичной интенсивностью находится в однородной бесконечной рассеивающей среде, характеризующейся показателями рассеяния  $b$ , поглощения  $a$  и индикатрисой рассеяния  $g(\gamma) = \beta(\gamma)/b$  ( $\beta(\gamma)$  — показатель направленного рассеяния;  $\gamma$  — угол рассеяния). На расстоянии  $R$  от него располагается точечный приемник с косинусной диаграммой приема (в реальном эксперименте  $R$  меняется от 0,2 до 10 м). Принимаемый световой поток выражается в виде

$$P(t) = \int_{2\pi} L(t) \cos\phi d\Omega,$$

где  $L(t)$  — яркость в точке приемника, и определяет временную форму сигнала или, в другой терминологии, распределение фотонов по длинам пробега  $l = vt$  ( $v = 0,224$  м/нс — скорость света в воде). Первые фотоны достигают приемника в момент  $T_0 = R/v$ . Излучение, попадающее на приемник без рассеяния (прямой пучок), не моделируется, а рассчитывается по формуле

$$E_{dir} = \frac{1}{4\pi R^2} \exp(-cR),$$

где  $c$  — показатель ослабления.

Освещенность в точке приемника получается интегрированием потока по времени:

$$E_D = E_{dir} + \int_{T_0}^{\infty} P(t) dt.$$

Особенности моделирования начального направления вылета фотонов для изотропного источника подробно рассмотрены в [26]. Расчеты проводились для консервативной среды ( $a = 0$ ). Расчет для заданного поглощения проводился согласно соотношению  $P(t, b, a \neq 0) = P(t, b, a = 0) \exp(-avt)$  [22]. Значения показателя поглощения выбирались в пределах  $a = 0,005 - 0,5$  м<sup>-1</sup>, что перекрывает наблюдаемый диапазон поглощения в области спектра 400–700 нм. Были выбраны четыре типа индикатрисы рассеяния морской воды (экспериментально измеренных в разное время О.В. Копелевичем и В.М. Павловым), взятых нами из работы [21]. Две индикатрисы имеют экстремальную асимметрию. Наименее вытянутая индикатриса  $g_1$  (асимметрия  $K = 11$ ,  $\langle \cos\gamma \rangle = 0,788$ ) наблюдалась в прозрачных водах Саргассова моря, наиболее вытянутая  $g_4$  ( $K = 361$ ,  $\langle \cos\gamma \rangle = 0,987$ ) в водах Черного моря. Индикатрисы  $g_2$  ( $K = 40$ ,  $\langle \cos\gamma \rangle = 0,924$ ) и  $g_3$  ( $K = 139$ ,  $\langle \cos\gamma \rangle = 0,97$ ) типичны для вод открытого океана. Кроме того, использовалась индикатриса молекулярного рассеяния  $g_m$ . При расчете бралось от 10 до 100 млн траекторий в зависимости от вида индикатрисы рассеяния, шкала времени разбивалась на равномерные в логарифмическом масштабе участки гистограммы (5 точек на декаду).

На рис. 2 приведен типичный вид распределения  $P(t)$  фотонов по длинам пробега для различ-

ных расстояний  $R$  между источником и приемником в среде с индикатрисой  $g_2$  и значением показателя рассеяния  $b = 0,15$  м<sup>-1</sup>.

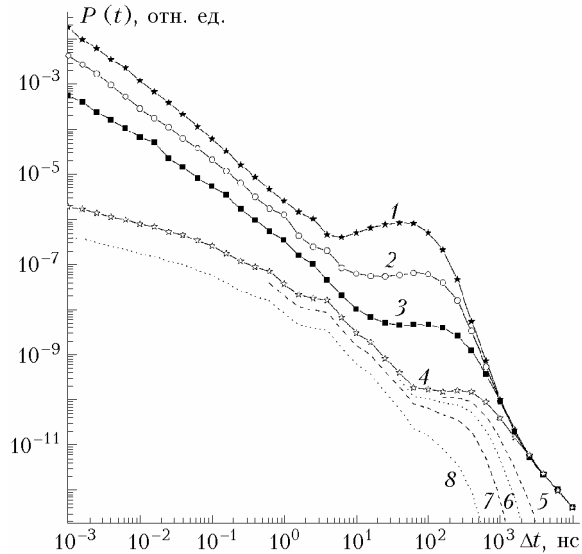


Рис. 2. Световое поле для различных расстояний между источником и приемником. Кривые 1–4 соответствуют  $R = 0,2; 1; 5; 30$  м. Кривые 5–8 соответствуют  $a = 0,005; 0,01; 0,02; 0,05$  м<sup>-1</sup> при  $R = 30$  м

По оси абсцисс отложено запаздывание  $\Delta t$  фотонов по отношению к времени прихода первого фотона  $T_0$ . Кривые 1–4 соответствуют изменению  $R$  от 0,2 до 30 м. При больших моментах  $\Delta t$  кривые выходят на типичную для изотропного источника [22] асимптотическую зависимость  $P(t) \sim t^{-3/2}$ .

Наиболее характерной особенностью приведенного распределения фотонов по длинам пробега является его двухмодальная структура, наблюдающаяся для не слишком больших оптических толщин в случае точечных источников излучения [23]. Дельтаобразный пик излучения в начальные моменты времени вызван преобладанием в эти моменты рассеяния на малые углы, не приводящего к сколько-нибудь заметному удлинению пробега фотонов. Причина появления второго максимума — это возникающий в условиях многократного рассеяния на большие углы диффузный фон, который характеризуется заметным запаздыванием во времени относительно прихода первого фотона [24].

В условиях неограниченной рассеивающей среды, как это было показано в [25], значительный вклад в него вносит свечение обратной (относительно направления от источника на приемник) полусферы. Доля энергии, приходящаяся на этот диффузный фон, определяется видом индикатрисы рассеяния и составляет около 75% для молекулярной, 30% для представленной на рис. 2 индикатрисы  $g_2$  и лишь 4% для индикатрисы  $g_4$ . Следует сказать, что именно эта диффузная часть излучения может вызвать нарушение условий (6) и привести к погрешностям в измерении показателя поглощения. Кроме того, пунктирными кривыми 5–8 на рис. 2 приведены распределения фотонов для раз-

личных значений показателя поглощения (от 0,005 до 0,05 м<sup>-1</sup>) для  $R = 30$  м. Уже малое поглощение вызывает сильное ослабление фотонов с большими длинами пробега, уменьшая вклад диффузно рассеянного излучения.

### 3. Формирование освещенности на приемнике и анализ метода измерения показателя поглощения

Результаты расчетов освещенности на различных глубинах в рассеивающей среде позволяют рассмотреть, как выполняются основные допущения, принятые в применяемом при измерении поглощения приближении (8). Напомним, что это — экспоненциальный характер зависимости освещенности от поглощения (при фиксированном расстоянии  $R$ ) и квадратичная зависимость освещенности от расстояния.

Наиболее характерная картина формирования потока излучения на приемнике наблюдается для консервативной среды, поскольку при отсутствии поглощения наиболее сильно проявляются отклонения от квадратичной зависимости. На рис. 3,а для значений  $a = 0$ ,  $b = 0,15$  м<sup>-1</sup> показаны зависимости от расстояния отдельных составляющих освещенности: прямого пучка  $E_{dir}$  (кривая 1), рассеянного  $E_{scat}$  (2) и суммарного  $E_D$  (3) потоков для среды с индикатрисой рассеяния  $g_1$ . Все рассчитанные величины на рис. 3 умножены на квадрат расстояния  $R^2$ . Величина светового потока  $HR^2 = (E_D - E_U)R^2$  должна быть в этом случае постоянной (пунктирная линия на рис. 3,а). Видно, что при увеличении расстояния  $R$  прямой поток ослабевает как  $E_{dir}R^2 = \exp(cR)$ , тогда как доля рассеянного потока  $E_{scat}$  растет. Суммарная освещенность  $E_D$  при этом также растет, и превышение величины  $E_D R^2$  над константой определяется неучтенным в (8) обратным потоком  $E_U$ . Это превышение, как и следовало ожидать, наиболее заметно для слабовытянутых индикатрис.

На рис. 3,б представлены зависимости прямого (кривая 1), рассеянного (2) и суммарного (3) потоков от показателя поглощения  $a$  для фиксированного расстояния  $R = 10$  м. Прямой поток экспоненциально уменьшается с увеличением поглощения. Для  $R = 10$  м освещенность определяется в основном рассеянным излучением, которое значительно превосходит прямой поток. При увеличении показателя поглощения сразу же наблюдается более быстрый, чем по  $\exp(-aR)$  (пунктир на рис. 3,б), спад освещенности, вызванный преимущественным ослаблением фотонов с большими длинами пробега. (Напомним, что в (8) удлинение путей фотонов не принимается во внимание). Затем (при  $a > 0,1$  м<sup>-1</sup>) скорость спада приближается к экспоненциальной, но остается результирующее ( $\approx 30\%$ ) занижение сигнала. При малых  $R$  прямой поток значительно больше рассеянного и отклонения от экспоненты менее заметны. В результате занижение сигнала растет

с увеличением расстояния  $R$ , и это может привести к завышенной оценке показателя поглощения.

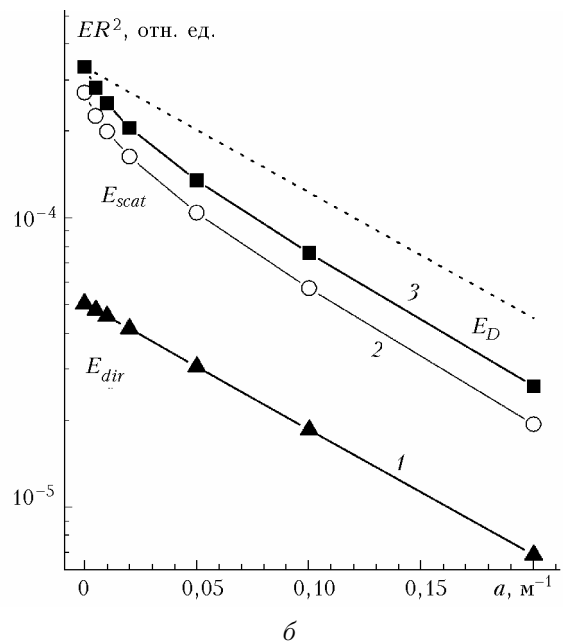
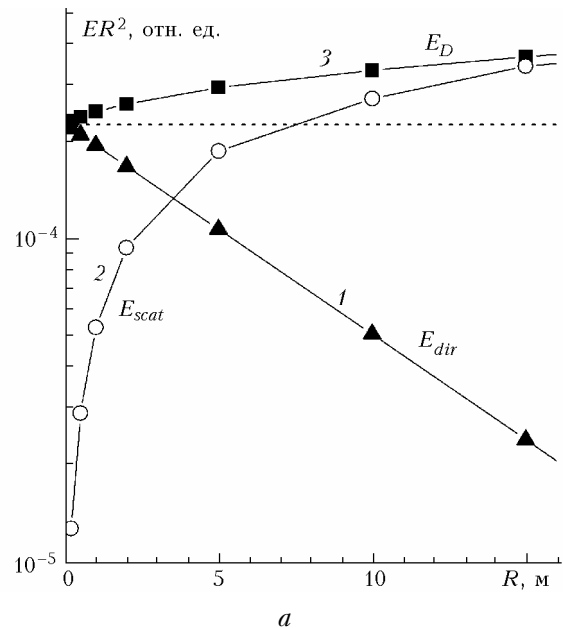


Рис. 3. Формирование освещенности на приемнике: 1 — прямой поток, 2 — рассеянный, 3 — суммарный. Среда с индикатрисой  $g_1$ ,  $b = 0,15$  м<sup>-1</sup>; а — среда с отсутствием поглощения; б — влияние поглощения при  $R = 10$  м

Интересующие нас с практической точки зрения зависимости величины  $E_D R^2$  от расстояния, по которым определяется поглощение в измерениях прибором ASP-15, представлены на рис. 4 для сред с разными индикатрисами рассеяния (включая молекулярную) и для значений  $a = 0,02$  м<sup>-1</sup>,  $b = 0,15$  м<sup>-1</sup> (альbedo однократного рассеяния  $\Lambda = b/c = 0,88$ ).

Для слабовытянутых индикатрис хорошо заметен максимум на зависимости  $E_D(R)$ , похожий на наблюдающийся иногда в экспериментах (см.

рис. 1,б). Максимум сдвигается влево при увеличении вытянутости индикатрисы.

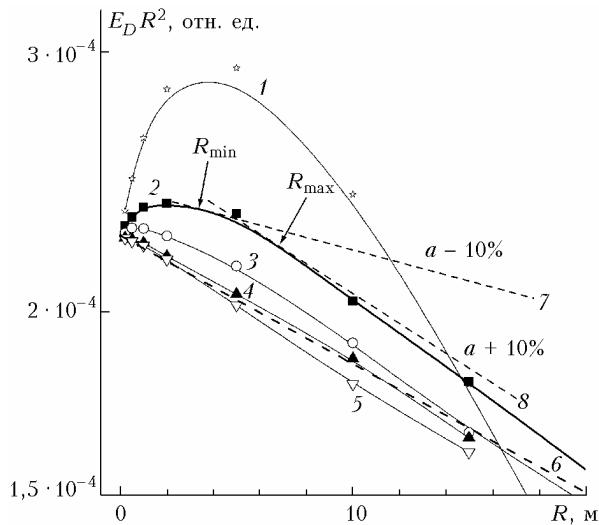


Рис. 4. Зависимость освещенности от расстояния. Кривые 1–5 соответствуют индикатрисам  $g_m, g_1, \dots, g_4$ . Пунктирные кривые – зависимость  $\exp(-aR)$  для истинного значения  $a$  (6) и отличающегося от истинного на  $\pm 10\%$  (7, 8)

Для индикатрисы с максимальной асимметрией он не заметен, и спад начинается с нуля. При увеличении показателя поглощения величина максимума уменьшается, и при  $a = 0,5 \text{ м}^{-1}$  ( $\Lambda = 0,23$ ) отклонение от экспоненты не превышает 1%. При больших расстояниях для всех индикатрис спад выходит на экспоненту, но наклон при больших расстояниях завышен. Наибольшее завышение наблюдается при малых поглощениях и слабовытянутых индикатрисах. При наблюдающемся в водах Байкала диапазоне одновременной изменчивости асимметрии  $K$  и альбедо  $\Lambda$  (рис. 5) значение измеряемого показателя поглощения лишь в редких случаях может превысить 10%.

Наличие максимума на зависимостях  $E_D(R)$  (подобных представленным на рис. 4) накладывает ограничения на интервал расстояний, в котором возможны измерения показателя поглощения с приемлемой точностью. Действительно, с увеличением расстояния от источника после прохождения максимума наклон кривых постепенно увеличивается. Пунктирная линия 7 на рис. 4 имеет наклон на 10% меньше истинного показателя поглощения и касается кривой 2 в точке  $R_{\min}$ . Начиная с этого расстояния, занижение измеренного показателя поглощения станет меньше заданной величины  $\Delta a = 10\%$ . На некотором интервале расстояний отклонения от экспоненты не превышают  $\pm \Delta a$ , но затем, после  $R > R_{\max}$ , завышение наклона кривой (и, следовательно, измеряемой величины) превышает  $\Delta a$  (прямая 8).

Из представленных данных ясно, что ограничения будут существенны для слабовытянутых индикатрис рассеяния и малых поглощений. Для молекулярной индикатрисы интервал выполнимости

$R_{\min} - R_{\max}$  приближения (8) очень узкий. С увеличением вытянутости индикатрисы интервал расширяется, при этом ограничения со стороны больших расстояний существенны только для слабовытянутых индикатрис типа  $g_1$  и  $g_2$ . Ограничения со стороны малых расстояний существенны для всех индикатрис, и  $R_{\min}$  растет при увеличении альбедо ( $\Lambda \rightarrow 1$ ).

Приведенные на рис. 4 результаты получены при задании величины показателя рассеяния  $b = 0,15 \text{ м}^{-1}$ , характерного для прозрачных приповерхностных вод Байкала в феврале–марте. Известные в теории переноса излучения соотношения подобия [4, 22] позволяют получать зависимости светового потока для других значений показателя рассеяния  $b$  путем простой замены масштабов, оставляя при этом неизменными безразмерные оптические параметры – оптическую толщину  $\tau = cR$  и альбедо однократного рассеяния  $\Lambda = b/c$ .

На рис. 5 приведен график в безразмерных координатах, показывающий минимальные значения оптических глубин  $\tau_{\min} = R_{\min}(a + b)$ , начиная с которых вычисленное занижение показателя поглощения составляет менее 10%. По оси абсцисс отложена величина  $1 - \Lambda$ , по оси ординат – асимметрия индикатрисы  $K$ . Цифры у линий показывают значения  $\tau_{\min}$ .

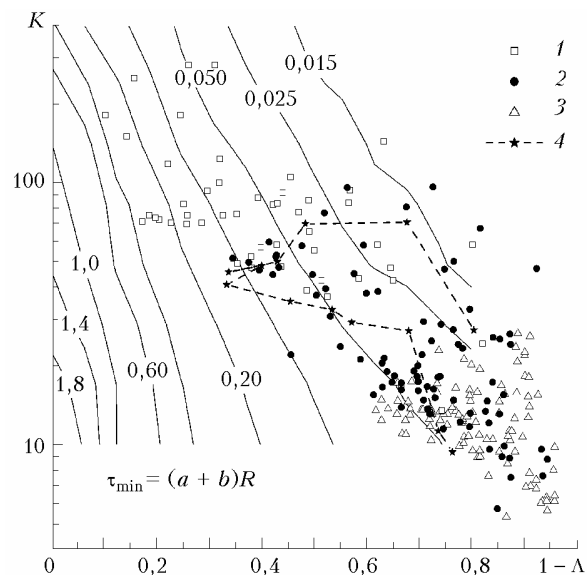


Рис. 5. Минимальные оптические толщины, для которых приближение (8) выполняется с погрешностью менее 10%. Значками показаны комбинации параметров  $K$  и  $\Lambda$ , наблюдавшиеся в одновременных измерениях на глубинах: 1 – 0–100; 2 – 200–600; 3 – 1000–1200 м

Рис. 5 подтверждает ранее высказанную закономерность: чем менее вытянута индикатриса и чем меньше поглощение (левый нижний угол графика), тем больше дистанция, начиная с которой скорость спада освещенности удовлетворяет выражению (8). Значками показаны комбинации параметров ( $K, \Lambda$ ), наблюдавшиеся в измерениях в течение ряда лет.

Для большинства ситуаций  $\tau_{\min} \ll 1$  и «правильная» экспоненциальная зависимость наблюдается на всей измерительной трассе. Аномальные зависимости (типа рис. 1,б) возникают при попадании оптических параметров в левую область графика на рис. 5 с очень высоким значением альбеда  $\Lambda$ . Поскольку ASP-15 позволяет измерять все необходимые оптические параметры (относительно точности измерения асимметрии рассеяния см. [25]), имеется возможность контролировать условия выполнимости приближения (8) и избежать грубых ошибок в измерениях показателя поглощения.

#### 4. Экспериментальные данные об оптических параметрах воды

На рис. 5 и 6 представлены данные некоторых измерений, проведенных прибором ASP-15 в 2001–2005 гг. На рис. 5 приведена корреляция между двумя одновременно измеренными оптическими параметрами: асимметрией индикатрисы рассеяния  $K$  и альбедо однократного рассеяния  $\Lambda = b/c$ , наблюдающаяся в водах Байкала.

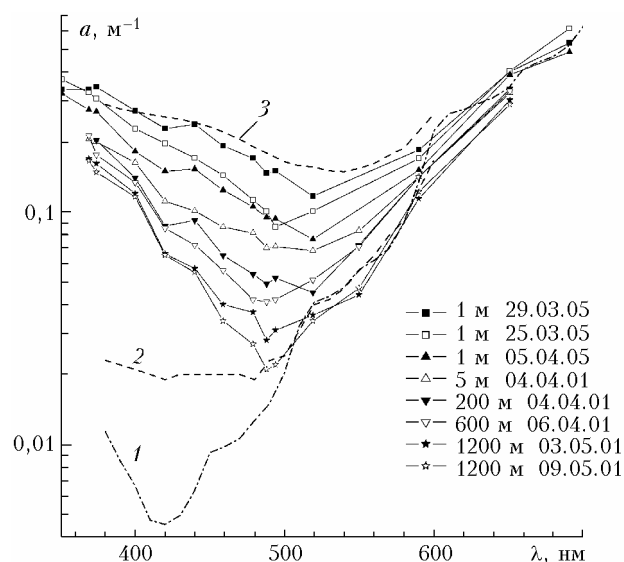


Рис. 6. Изменчивость спектров поглощения воды в оз. Байкал на различных глубинах

Измерения сгруппированы по глубине, для одной серии измерений (16.03.2001, кривая 4) пунктиром соединены точки, соответствующие изменению длины волны от 351 нм (левая точка) до 690 нм (правая точка). Подобная зависимость характерна и для других серий. В основном асимметрия индикатрисы растет с увеличением длины волны, при этом предельно малые значения  $\Lambda$  характерны для крайних (красной и фиолетовой) участков спектра. Хорошо выраженная корреляция двух параметров легко объясняется, если учитывать, что в удаленных от берега водах динамика оптических параметров вызывается в основном развитием крупных органических частиц (планктона), для которых изменчивость показателя рассеяния значи-

тельно больше, чем показателя поглощения. Слабовытянутые индикатрисы (типа  $g_1$ ) характерны для прозрачных (глубинных) вод с малым содержанием гидрозоля, рассеяние в этом случае мало и мала величина  $\Lambda$ . Большие значения  $\Lambda$  могут наблюдаться в мутных водах с повышенным содержанием крупных органических частиц, но в этом случае индикатриса рассеяния будет характеризоваться большой асимметрией (индикатрисы типа  $g_3 - g_4$ ).

На рис. 6 показаны спектры поглощения для разных глубин. Штрихпунктиром 1 показан спектр поглощения чистой воды, полученный в лабораторных условиях [28]. Видно, что с уменьшением глубины поглощение растет в основном в коротковолновой области спектра (за счет растворенного органического вещества), при этом минимум поглощения смещается от 488 до 520 нм. Верхние три кривые, относящиеся к глубине 1 м, показывают достаточно сильную изменчивость спектра поглощения в течение нескольких суток в поверхностном слое озера.

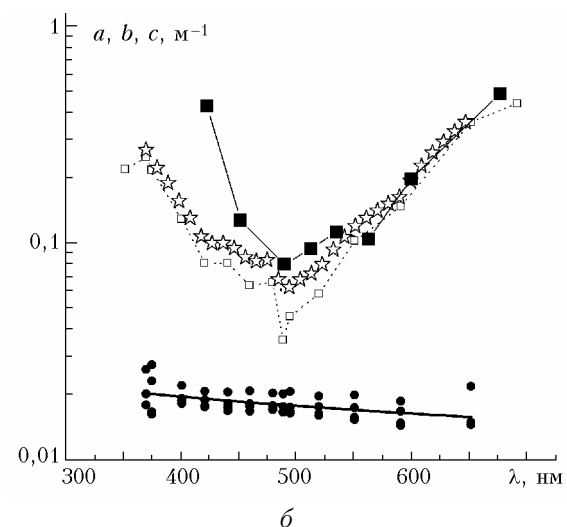
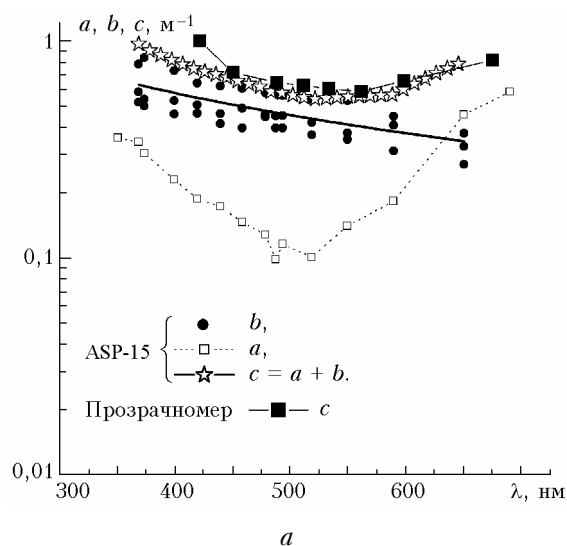


Рис. 7. Сравнение результатов измерения прозрачности двумя приборами. Глубина наблюдений: а – 5 м, б – 1000 м

В целом поведение спектральной зависимости поглощения соответствует известным зависимостям для вод открытого океана [17]. Здесь же показан пример спектра поглощения для вод открытого океана, полученный Пелевиным и Ростовцевой [29] для случая олиготрофных (кривая 2, значение оптического индекса типа вод  $m = 1,5$ ) и эвтрофных вод (3,  $m = 9$ ). Видно, что поглощение в коротковолновой части спектра в водах Байкала растет значительно быстрее, чем в океанических водах.

Сравнение результатов одновременных измерений в апреле 2005 г. оптических параметров прибором ASP-15 и погружаемым фотометром-прозрачномером [27] показано на рис. 7. Прозрачномер измеряет непосредственно показатель ослабления  $s$  (показан черными квадратиками), для данных ASP-15 ослабление получено суммированием рассеяния и поглощения  $s = a + b$  (звездочки). Для показателя рассеяния (черные кружочки) взят средний спектральный ход за несколько дней измерений на заданной глубине. Видно, что данные независимых измерений хорошо совпадают в длинноволновой области спектра, однако имеется существенное различие в области 420 нм. Причина подобных расхождений пока не выяснена. Характерно, что для глубины 5 м спектральный ход показателя рассеяния имеет вид  $b \sim \lambda^{-1,04}$ , что соответствует модели рассеивающих свойств воды О.В. Копелевича [17].

### Выводы

Метод измерения показателя поглощения рассеивающей среды, рассмотренный в данной статье, основан на предположении о малости обратно рассеянного излучения и пренебрежимо малом удлинении пути пробега фотонов из-за многократного рассеяния. Результаты расчетов показывают, что эти предположения могут нарушаться при некоторых значениях гидрооптических параметров. Особенно заметные аномалии, выражающиеся в немонотонном ходе величины  $E_D R^2$  (произведение освещенности площадки на квадрат расстояния между источником и приемником), могут наблюдаться при одновременном выполнении двух условий — слабой асимметрии индикатрисы рассеяния и малом поглощении. Подобная ситуация возможна при измерениях в глубинной зоне Байкала, где вода может быть очень прозрачной и асимметрия рассеяния мала из-за отсутствия крупных органических частиц. Наиболее отчетливо это может проявиться в области 480–520 нм, где поглощение минимально, и в области спектра 690 нм, где иногда наблюдается резкое уменьшение асимметрии рассеяния [25]. В то же время наиболее вероятные сочетания оптических параметров — асимметрии рассеяния и альбедо однократного рассеяния, наблюдающиеся в водах Байкала, дают основания говорить о выполнении в большинстве случаев условий (6), для которых описанный метод измерения показателя поглощения дает адекватные результаты и может быть применен в долговременном мониторинге оптических свойств байкальской воды.

Авторы выражают благодарность Г.В. Домогацкому за постоянное внимание и интерес к работе.

Работа поддержана программой 6.3 Отделения наук о Земле РАН (проект «Исследование загрязнений атмосферы и поверхностных вод Байкала»), проектами РФФИ № 04-02-16171 и 05-02-31004к.

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. *Budnev N.M., Mirgazov R.R., Tarashchansky B.A.* Possibilities and advantages of using in hydrobiology of *in situ* monitoring of optical water parameters // *Proc. of V Workshop on Phys. Processes in Natural Waters / S. Semovski, ed. Irkutsk: Limnological Inst., 2000. P. 59–62.*
3. *Шерстянкин П.П.* Экспериментальные исследования подледного светового поля озера Байкал. М.: Наука, 1975. 90 с.
4. *Иванов А.П.* Основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.
5. *Ерлов Н.* Оптическая океанография. М.: Мир, 1970. 224 с.
6. *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.*
7. *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.*
8. *Тарацанский Б.А., Миргазов Р.Р., Почейкин К.А.* Стационарный глубоководный измеритель гидрооптических характеристик «Бурхан» // *Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 5. С. 771–774.*
9. *Гапоненко О.Н., Миргазов Р.Р., Тарацанский Б.А.* Определение первичных гидрооптических характеристик по световому полю точечного источника // *Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 8. С. 1069–1076.*
10. *Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гальперин М.Д., Джилкибаев Ж.-А.М., Ланин О.Ю., Тарацанский Б.А.* Измерение показателя поглощения света в водной среде озера Байкал // *Океанология. Т. 30. Вып. 6. 1990. С. 1022–1026.*
11. *Bauer D., Brun-Cottan J.C., Salot 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.
12. *Гершун А.А.* Световое поле от поверхностных излучателей равномерной и неравномерной яркости // *Тр. ГОИ. 1928. Т. 4. Вып. 38.*
13. *Болдырев Н.Г.* О световом поле в светорассеивающих средах // *Тр. ГОИ. 1931. Т. 6. Вып. 59.*
14. *Гершун А.А.* К теории светового поля в рассеивающей среде // *Докл. АН СССР. 1945. Т. 49. № 8. С. 578.*
15. *Пелевин В.Н.* Об измерении показателя истинного поглощения света в море // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1965. Т. 1. № 5. С. 539–544.*
16. *Пелевин В.Н., Прокудина Т.М.* Определение величины показателя поглощения света морской водой по параметрам светового поля изотропного источника // *Оптика океана и атмосферы. Л.: Наука, 1972. С. 148–157.*
17. *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.*



18. *Budnev N.M., Kokhanenko G.P., Mirgazov R.R., Penner I.E., Tarashchansky B.A., Shamanaev V.S., Sherstyankin P.P., Blinov V.V., Ivanov V.G.* The experiments on simultaneously remote and *in situ* measurements of the inherent hydrooptical properties of Baikal Lake // *Current Problems in Optics of Natural Waters* / I. Levin and G. Gilbert, eds.: Proc. of D.S. Rozhdestvensky Optical Society. St. Petersburg, 2001. P. 318–322.
19. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
20. *Креков Г.М., Михайлов Г.А., Каргин Б.А.* Об алгоритмах метода Монте-Карло для решения задач теории распространения узких пучков света // *Изв. вузов. Физ.* 1968. № 4. С. 5–10.
21. *Гурфинк А.М.* Расчет временной структуры сигнала, приходящего на приемник малой угловой апертуры, расположенный в произвольной точке среды // *Световые поля в океане*. М.: ИО АН СССР, 1980. С. 115–165.
22. *Зеге Э.П., Кацев И.Л.* Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 326 с.
23. *Коханенко Г.П., Крутиков В.А.* Временная структура сигнала при освещении рассеивающей среды изотропным источником // *Численные методы решения уравнения переноса*: Тез. докл. Тарту: АН ЭССР, 1988. С. 98–101.
24. *Вергун В.В., Генин Е.В., Коханенко Г.П., Крутиков В.А., Межевой Д.С.* Особенности временной структуры излучения в плотных рассеивающих средах. Ч. 3. Использование диффузионных приближений для описания формы импульсов // *Оптика атмосф.* 1990. Т. 3. № 9. 921–928.
25. *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 атмосф. и океана*. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 109–114.
26. *Kokhanenko G.P., Tarashchansky B.A., Budnev N.M., Mirgazov R.R.* Investigations of Baikal Lake water absorption with ASP-15 device: measurement method and experimental data // *Proc. SPIE / G. Matvienko and V. Lukin, eds.* 2005. V. 6160. Part 2. P. 64–76.
27. *Шерстянкин П.П., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Ростов А.П., Куимова Л.Н., Иванов В.Г., Блинов В.В.* О формировании конвергентной зоны фронта подо льдом на озере Байкал // *Докл. РАН*. 2002. Т. 383. № 1. С. 106–110.
28. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. N 33. P. 8710–8722.
29. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // *Оптика атмосф. и океана*. 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.
30. *Markov M.A.* On high energy neutrino physics // *Proc. 1960 Annual Int. Conf. on High Energy Phys.* Rochester, 1960. P. 578.
31. *Baikal Neutrino Collaboration.* The BAIKAL neutrino project: status, results, and perspectives // *Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl.* 2005. V. 143. P. 335–342.
32. *Resvanis L.K., ed.* // *Proc. 3rd NESTOR Int. Workshop.* Pylos, Greece, 1993.
33. *Добрынин В.И., Таращанский Б.А.* Спектральное поглощение света байкальской водой // *Тез. 11-го Пленума по оптике океана / Под ред. Ф.Я. Сидько.* Красноярск: Ин-т физики им. Л.В. Киренского, 1990. Ч. 1. С. 89–90.

*N.M. Budnev, G.P. Kokhanenko, R.R. Mirgazov, B.A. Tarashchanskii.* **Numerical modeling of abnormal spatial distribution of irradiance obtained in the process of measuring the Baikal water light absorptivity.**

The operation of the ASP-15 stationary deep-water measuring complex located in the south part of Lake Baikal is under analysis. The complex conducts all-year measurements of hydrooptical water characteristics at 1000–1200 m depths. The method of finding the absorptivity is based on measuring the decay rate of irradiance from isotropic radiator as the distance between the source and the receiver changes. Based on numerical modeling of the light field, the method accuracy is estimated and possible causes of appearance of abnormal distance dependences of the irradiance are determined. The experimental data obtained by the ASP-15 complex in recent years are presented.