

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.463.3

Приборы и методы долговременного мониторинга гидрооптических характеристик глубинных вод оз. Байкал

А.В. Аврорин¹, А.Д. Аврорин¹, В.М. Айнутдинов¹, В.А. Аллахвердян²,
З. Бардачова^{3, 10}, И.А. Белоланчиков², Е.А. Бондарев¹, И.В. Борова², Н.М. Буднев⁴,
А.Р. Гафаров⁴, К.В. Голубков¹, Н.С. Горшков², Т.И. Грес⁴, Р. Дворничи³,
Ж.-А.М. Джилкибаев¹, В. Дик^{2, 5}, А.А. Дорошенко¹, Г.В. Домогацкий¹, А.Н. Дячок⁴,
Т.В. Елзов², Д.Н. Заборов¹, С.И. Завьялов², Д.Ю. Звездов², В.К. Кебкал⁶,
К.Г. Кебкал⁶, М.И. Клейменов¹, В.А. Кожин⁷, М.М. Колбин², С.О. Колигаев¹¹,
К.В. Конищев², А.В. Коробченко², А.П. Кошечкин¹, М.В. Круглов², В.Ф. Кулепов⁸,
А.А. Куликов⁴, Ю.Е. Лемешев⁴, Р.Р. Миргазов⁴, Д.В. Наумов², А.С. Николаев⁷,
Д.П. Петухов¹, И.А. Перевалова⁴, Е.Н. Плисковский², М.И. Розанов⁹, Е.В. Рябов⁴,
Г.Б. Сафронов¹, А.Э. Сиренко², А.В. Скурихин⁷, А.Г. Соловьев², М.Н. Сорокочиков²,
А.П. Стромаков¹, О.В. Суворова¹, В.А. Таболенко⁴, В.И. Третьяк², В.Н. Фомин,
И.В. Харук¹, Е.В. Храмов², В.А. Чадымов, А.С. Чепурнов⁷, Б.А. Шайбонов²,
Ф. Шимковиц^{3, 10}, Е.В. Широков⁷, В.Ю. Шишкин⁷, И. Штекл¹⁰, Э. Эцкерова^{3, 10},
Ю.В. Яблокова^{2*}

¹ Институт ядерных исследований РАН, 117312, г. Москва, В-312, пр. 60-летия Октября, 7а

² Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

³ Univerzita Komenského v Bratislave, Šafárikovo námestie 6, P.O.BOX 440, 814 99 Bratislava 1, Slovakia

⁴ Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

⁵ Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,

050032, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Ибрагимов, 1

⁶ АО «Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации»,

199106, г. Санкт-Петербург, линия 22-я В.О., 3, корп. 1

⁷ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ,

119234, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

⁸ Нижегородский государственный технический университет, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

⁹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

¹⁰ Czech Technical University in Prague, Jugoslávských partyzánů 1580/3, 16000 Prague 6–Dejvice, Czech Republic

¹¹ ООО «Лаборатория прикладных информационных технологий „Инфрад“»,

141981, Московская область, г. Дубна, ул. Энтузиастов, 3б

Поступила в редакцию 02.12.2024;

после доработки 25.02.2025;

принята к печати 11.03.2025

Развитие проекта глубоководного нейтринного телескопа BAIKAL-GVD предусматривает создание аппаратуры для регулярного долговременного мониторинга первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) водной среды в пределах эффективного объема установки. Регулярный мониторинг ПГХ не только позволяет повысить точность восстановления энергии и траектории движения нейтрино, но и предоставляет уникальные данные для лимнологических исследований. В настоящей работе описан разработанный для решения этой задачи прибор BAIKAL-5D, а также рассмотрены используемые в нем методы и алгоритмы мониторинга *in situ* ПГХ. Исследованы источники приборной погрешности измерения показателей поглощения и рассеяния света в воде и определены необходимые поправочные величины. Приводятся некоторые результаты измерения ПГХ глубинных вод оз. Байкал приборами BAIKAL-5D.

Ключевые слова: первичные гидрооптические характеристики, поглощение, рассеяние, индикатриса рассеяния, долговременный мониторинг, оз. Байкал; inherent optical properties, absorption, scattering, volume scattering function, long-term monitoring, Lake Baikal.

* Александр Валентинович Аврорин (avrorin@yandex.ru);
Александр Дмитриевич Аврорин (a.d.avrorin@gmail.com);

Владимир Маратович Айнутдинов (aynutdin@yandex.ru);
Владимир Артурович Аллахвердян (allahwerdian@yandex.ru);

Введение

Проект по созданию Байкальского нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба BAIKAL-GVD активно реализуется в южной части оз. Байкал [1]. Оптические модули (ОМ) телескопа, расположенные на глубинах от 700 до 1240 м, регистрируют распространяющееся в воде черенковское излучение заряженных частиц, рождающихся в результате взаимодействия нейтрино с водой. Для корректного восстановления энергии и направления движения нейтрино по амплитудно-временным характеристикам регистрируемых черенковских импульсов необходимо знать с высокой точностью абсолютные величины длин поглощения и рассеяния света в воде, а также свойства индикатрисы рассеяния.

Поскольку оптические свойства воды меняются со временем, необходимо вести регулярный мониторинг первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) в пределах эффективного объема установки, а именно [2]: показателя поглощения $a(\lambda) = 1/L_a(\lambda)$, показателя рассеяния $b(\lambda) = 1/L_b(\lambda)$ и индикатрисы рассеяния света $\chi(\gamma, \lambda)$, где L_a — длина поглощения; λ — длина волны излучения; L_b — длина рассеяния; γ — угол рассеяния. В других глубоководных нейтринных проектах указанная задача тоже актуальна и решается путем периодических измерений с помощью стандартных приборов [3] либо созданием собственных сложных и габаритных систем для непрерывных измерений [4, 5].

С учетом специфики реализации проекта BAIKAL-GVD была поставлена задача создания приборов, способных осуществлять мониторинг ПГХ *in situ* без подъема на поверхность в течение года и более. Применение известных гидрооптических

приборов [6–9] или коммерческих приборов [10–12] было бесперспективным из-за невозможности их долговременной эксплуатации без обслуживания.

Продолжительное время для измерения ПГХ в Байкальском нейтринном проекте использовался прибор ASP-15, разработанный сотрудниками Научно-исследовательского института прикладной физики Иркутского государственного университета (НИИПФ ИГУ). Он измерял ПГХ только в 15 дискретных точках спектра, определяемых набором используемых светофильтров [13–15]. Существенным недостатком ASP-15 являлась засветка ближайших ОМ телескопа, которая была связана с примененной оптической схемой, когда среда освещалась источником с широким спектром, а спектральные преобразования выполнялись набором светофильтров перед приемником света. На смену ASP-15 в НИИПФ ИГУ мы разработали новый тип прибора — BAIKAL-5D, конструкция которого рассмотрена ниже.

Цель настоящей работы — создание методического обеспечения долговременного мониторинга ПГХ глубинных вод оз. Байкал в проекте нейтринного телескопа BAIKAL-GVD с помощью приборов BAIKAL-5D.

Материалы и методы

Конструкция приборов BAIKAL-5D

В основном герметичном корпусе 1 (рис. 1) прибора BAIKAL-5D находятся электронные устройства и монохроматор. На торцевой крышке корпуса установлен излучатель 2. На основном корпусе 1 снаружи смонтированы шаговый привод пере-

Зузана Бардачова (bardacova4@uniba.sk); Игорь Анатольевич Белолаптиков (belolap@jinr.ru); Евгений Александрович Бондарев (evgeniy.bondarev3@gmail.com); Ирина Владимировна Борина (borina@jinr.ru); Николай Михайлович Буднев (nbudnev@api.isu.ru); Александр Равильевич Гафаров (gaffaric@mail.ru); Кирилл Владимирович Голубков (k.golubkov@gmail.com); Никита Сергеевич Горшков (gorshkovns@jinr.ru); Татьяна Ивановна Гресь (tigress@api.isu.ru); Растислав Дворнишки (dvornicky@fmph.uniba.sk); Жан-Арыс Магисович Джилкибаев; Виктория Дик (viktoriya@jinr.ru); Александр Александрович Дорошенко (a.dor@mail.ru); Григорий Владимирович Домогацкий; Алексей Николаевич Дячок (dan999@mail.ru); Тимур Валерьевич Елзов (telzhov@jinr.ru); Дмитрий Николаевич Заборов (zaborov@inr.ru); Сергей Игоревич Завьялов (zav.postline@yandex.ru); Денис Юрьевич Звездов (alirn@mail); Вероника Константиновна Кебкал (veronika.kebkal@latena.ru); Константин Георгиевич Кебкал (kebkal@gmail.com); Максим Игоревич Клейменов (kleimenov.maksim.i@gmail.com); Владимир Анатольевич Кожин (vlad@mics.msu.ru); Максим Михайлович Колбин (maxsonitdm@gmail.com); Сергей Олегович Колигаев (dex@mail.ru); Константин Владимирович Конищев (kostya_kv@mail.ru); Андрей Владимирович Коробченко (korrav@yandex.ru); Андрей Петрович Кошечкин (ap.kosh@mail.ru); Максим Викторович Круглов (maxiboy87@yandex.ru); Виктор Федорович Кулепов (sekretar@dfngtunnov.ru); Алексей Александрович Куликов (aleksey.kulikov.2002@mail.ru);

Юрий Евгеньевич Лемешев (Lemeshevyra@yandex.ru); Рашид Рамзельевич Миргазов (rashid@irkutsk.ru); Дмитрий Вадимович Наумов (dmitryvnaumov@gmail.com); Алексей Станиславович Николаев (nassa@marathon.ru); Дмитрий Петрович Петухов (kurpas@mail.ru); Ирина Александровна Перевалова (irenadler1@rambler.ru); Евгений Николаевич Плисковский (ugeen4@yandex.ru); Михаил Иванович Розанов (mirznv@list.ru); Евгений Валерьевич Рябов (e_v_ryabov@mail.ru); Григорий Борисович Сафронов (grigorybs@gmail.ru); Анна Эркиновна Сиренко (sirenko@jinr.ru); Александр Васильевич Скурихин (sk@mics.msu.ru); Алексей Геннадьевич Соловьев (solovjev@jinr); Максим Николаевич Сороковиков (sorokovikov@jinr.ru); Александр Петрович Стромаков (_alex2001@mail.ru); Ольга Васильевна Суворова (suvorova@inr.ru); Виктор Александрович Таболенко (vit-usol@yandex.ru); Виктор Иванович Третьяк (tretiyak@jinr.ru); Виктор Николаевич Фомин (vrider-18@yandex.ru); Иван Вячеславович Харук (ivan.kharuk@phystech.edu); Евгений Владимирович Храмов (khramov@jinr.ru); Владимир Анатольевич Чадымов (v@prof-kb.ru); Александр Сергеевич Чепурнов (aschepurnov@yandex.ru); Баир Александрович Шайбонов (bair@jinr.ru); Федор Шимкович (fedor.simkovich@fmph.uniba.sk); Евгений Вадимович Широков (shirokov@phys.msu.ru); Василий Юрьевич Шишкин (shishkin.vi18@physics.msu.ru); Иван Штекел (ivan.stekl@utef.cvut.cz); Элишка Эцкерова (eliska.eckeroval@fmph.uniba.sk); Юлия Викторовна Яблокова (yablokova@jinr.ru).

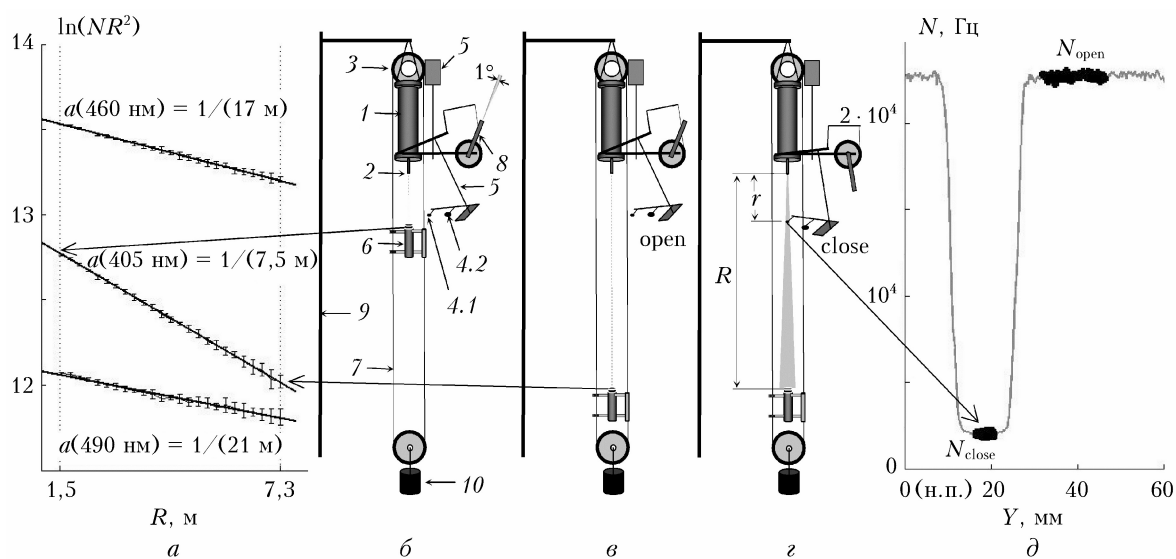


Рис. 1. Устройство прибора BAIKAL-5D и схема измерения поглощения и рассеяния: *a* — измеренная зависимость $\ln(N(R)R^2)$ и определение показателя поглощения $a(\lambda)$; *б–г* — положение приемника и затеняющих экранов при измерении поглощения и рассеяния; *д* — определение N_{close} и N_{open} для расчета рассеяния (Y — координата относительно начального положения (н.п.), определяющая положение экранов); обозначения см. в тексте

мещения приемника света 3 и система затенения прямого света источника 5, состоящая из перемещаемой шаговым двигателем штанги с экранами 4.1 и 4.2 диаметрами 7 и 14 мм, которые обеспечивают угловой размер тени 1 и 2°. С системой затенения прямого света совмещен узел поворота остроугольного излучателя 8, используемого для оценки индикатрисы рассеяния. Широкоугольный приемник 6 в отдельном корпусе, включающем ФЭУ-130 с источником высокого напряжения и контроллер, перемещается на тонкой тросовой петле 7 так, что расстояние R между источником и приемником может изменяться с заданным шагом в пределах 1,5–7,5 м. Таким образом, исследуемый объем воды находится в слое толщиной 7,5 м между источником 2 и приемником 6 в крайнем нижнем положении (рис. 1, в). Считаем, что ПГХ в пределах этого объема постоянны. Натяжение тросов 7 обеспечивается грузом 10. Весь прибор крепится на кронштейне к кабель-тросу 9 гидрооптической гири. Глубина установки прибора — до 1500 м, течение в точке установки — не более 2 см/с (обычно контролируется датчиком течения над прибором).

В оптической схеме прибора BAIKAL-5D излучение от комбинации ультрафиолетового светодиода, светодиода OSM54L3131P с максимумом на длине волны 405 нм (широкий спектр 420–620 нм, так называемое «теплое» белое свечение) и двух лазерных диодов 450 и 655 нм освещает входную щель монохроматора, выполненного на основе дифракционной решетки 40×40 мм с частотой штрихов 1200 мм^{-1} . Светодиоды формируют излучение со спектром в диапазоне 390–620 нм, а лазерные диоды используются для проверки работы электромеханических датчиков начальной установки монохроматора. С выходной щели монохроматора узкополосное

излучение (ширина спектральной линии 3 нм на уровне 0,1 от максимума) через световод поступает в излучатель 2. Из излучателя в воду монохроматическое излучение выходит через герметизирующий диск из оргстекла толщиной 4 мм и тонкую рассеивающую пластинку. Размер светящегося пятна — 2 мм, диаграмма направленности выходного излучения близка к косинусной в диапазоне углов до 50° и ограничена углом 70°. Свет, прошедший через воду, регистрируется широкоугольным приемником света с прозрачным иллюминатором на основе ФЭУ-130, работающим в режиме счета фотонов. В такой оптической схеме освещение внешней среды очень слабое и гарантировано не создает дополнительную засветку ОМ телескопа, расположенных на расстояниях более 200 м от точки установки прибора BAIKAL-5D.

Методы и алгоритмы измерения ПГХ

В приборе BAIKAL-5D используется метод измерения поглощения по освещенности, создаваемой точечным изотропным источником света [16–18] (также известный как метод однократного рассеяния), опробованный в приборе ASP-15 [13–15, 19]. В данном методе предполагается, что в поглощающей (показатель поглощения a) и рассеивающей среде освещенность зависит от расстояния R при $\tau = aR < 0,6$ [17, 19]:

$$E(R) = E_0 \exp(-\xi\tau)/R^2, \quad \xi \approx 1. \quad (1)$$

В процессе измерений приемником регистрируется зависимость от R количества фотонов $N_1(R)$, попадающих на фотокатод в единицу времени. Считаем $N_1(R)$ пропорциональным освещенности E_1 ,

эквивалентной фотокатоду площадки сверху (со стороны источника 2 (см. рис. 1, б). Если придерживаться рассуждений и обозначений статьи [14], а методическую и инструментальную погрешности измерения a формально учесть поправкой Δa к измеренному значению a_{mes} , то

$$a = -\frac{1}{N_0(R)R^2} \frac{d((N_1(R) - N_2(R))R^2)}{dR} = a_{\text{mes}} - \Delta a,$$

$$a_{\text{mes}} = -\frac{d(\ln(N_1(R)R^2))}{dR} \quad (2)$$

при условии, что для пространственной освещенности E_0 и освещенностей эквивалентной фотокатоду площадки сверху E_1 и снизу E_2 , соответствующих сигналам приемника N_0 , N_1 и N_2 , выполняются условия [18, 19]:

$$|d[N_1(R)]/dR| \gg |d[N_2(R)]/dR|,$$

$$N_0(R) \approx N_1(R) \gg N_2(R). \quad (3)$$

Для измерения рассеяния используется метод затенения экраном прямого света источника. При максимальном расстоянии R экраны 4.1 и 4.2, расположенные на расстоянии r от излучателя (рис. 1, в, з), перемещаются так, что они поочередно перекрывают прямой свет. Из сигнала широкоугольного приемника 6 при движении экрана выделяются отсчеты, соответствующие моменту затенения прямого света и моменту, когда прямой свет источника 2 не затенен. Соответствующие значения измеряемых сигналов N_{close} и N_{open} (рис. 1, д) позволяют вычислить по формуле из [14, 15] измеряемый показатель рассеяния в переднюю полусферу b_{mes} на угол, больший угла конуса тени, создаваемой экраном, а поправку на ограниченную диаграмму излучения и затеняющий экран учитывать поправочным коэффициентом X :

$$b_{\text{mes}}(\lambda) = 1/L_b(\lambda) = -\ln(1 - N_{\text{close}}(\lambda)/N_{\text{open}}(\lambda))/R,$$

$$b(\lambda) = X(\lambda)b_{\text{mes}}(\lambda). \quad (4)$$

Так как в системе затенения 5 используются два экрана 4.1 и 4.2, создающие углы тени 1 и 2°, то формально можно определить два значения $b_{\text{mes}}^{1^\circ}$ и $b_{\text{mes}}^{2^\circ}$. Наиболее близкое к истинному показателю рассеяния будет, конечно, $b_{\text{mes}}^{1^\circ}$, но их отношение $b_{\text{mes}}^{1^\circ}/b_{\text{mes}}^{2^\circ}$ используется для уточнения индикатрисы рассеяния в области малых углов. Далее в статье считаем $b_{\text{mes}} = b_{\text{mes}}^{1^\circ}$.

Алгоритмы, используемые для измерения показателей поглощения (A1, A2) и рассеяния (S1, S2), подробно описаны в [20]. В алгоритме A1 при фиксированной длине волны света сигнал $N(R)$ измеряется в нескольких точках на базе прибора с усреднением в каждой точке и последующей аппроксимацией $\ln(N(R)R^2) = -a_{\text{mes}}R + \text{const}$ (см. рис. 1, а). В алгоритме S1 измеряются усредненные значения N_{open} и N_{close} при движении затеняющих экранов (см. рис. 1, д.). В алгоритме измерения спектра поглощения A2 регистрируется спектральная зависимость сигнала $N(\lambda, R_1)$, $N(\lambda, R_2)$ в двух точках на базе прибора. Алгоритм S2 основан на измерении спектров сигналов $N_{\text{open}}(\lambda, R)$, $N_{\text{close}}(\lambda, R)$ для открытого и затененного источника с последующим расчетом спектра рассеяния по формуле (4). Для расчета спектра поглощения в алгоритме A2 используем формулу

$$a_{\text{mes}}(\lambda) = -\frac{[\ln(N(\lambda, R_1)R_1^2) - \ln(N(\lambda, R_2)R_2^2)]}{(R_1 - R_2)}. \quad (5)$$

Метод измерения индикатрисы рассеяния основан на регистрации приемником излучения от узконаправленного излучателя 8 при его повороте в плоскости, проходящей через центр приемника (рис. 2, а). Приемник при этом устанавливается

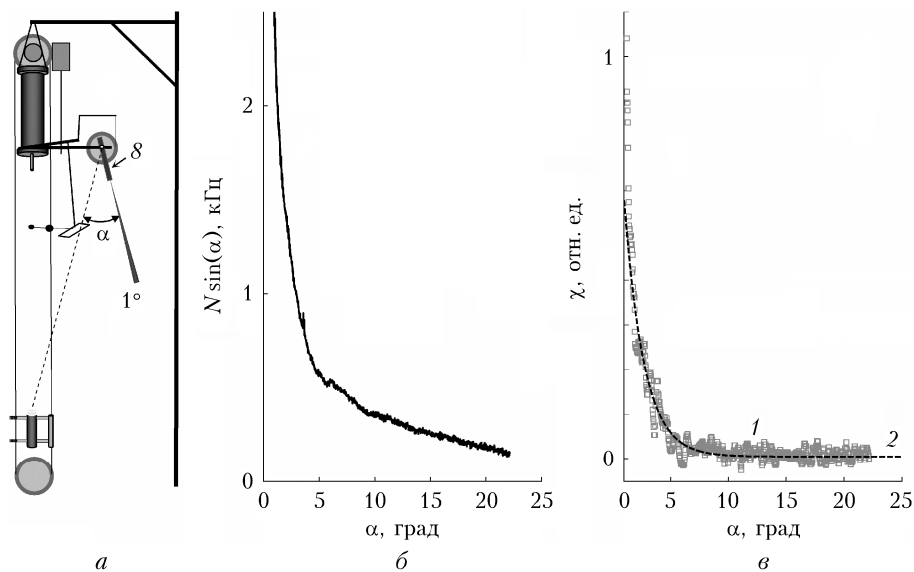


Рис. 2. Измерение индикатрисы рассеяния $\chi(\alpha)$ для $\alpha < 30^\circ$: а – схема измерения; б – регистрируемый сигнал; в – $\chi(\alpha)$, рассчитанная по формуле (6) (кривая 1) и ее аппроксимация функцией $A \exp(-s\alpha) + \text{const}$ (кривая 2)

на максимальном расстоянии от излучателя R ; угол поворота излучателя α определяется углом между осью луча и линией, соединяющей центр приемника и ось вращения излучателя.

Узконаправленный излучатель представляет собой «мокрый» дырчатый коллиматор, обеспечивающий расходимость луча 1° в приближении геометрической оптики. Однако с учетом размера окна ФЭУ и дифракции гарантировать отсутствие засветки прямым светом приемника можно только для углов $\alpha > 1,5^\circ$. Источником света является синий светодиод с максимумом интенсивности излучения на длине волны 468 нм и шириной полосы 30 нм.

В приближении однократного рассеяния для значительно вытянутой в области малых углов α индикатрисы рассеяния $\chi(\alpha)$ и пренебрежимо малом удлинении траектории рассеянных фотонов нами получена формула для приближенного расчета индикатрисы для $2^\circ < \alpha < 30^\circ$:

$$\chi(\alpha) \approx -f \frac{d[N(\alpha)\sin(\alpha)]}{d\alpha}, \quad (6)$$

где $N(\alpha)$ — зависимость регистрируемого приемником сигнала от угла поворота α (рис. 2, а) излучателя; f — нормировочный множитель.

Если при одной яркости источника вести измерения в широком диапазоне углов, то расчет индикатрисы по формуле (6) из-за малой величины регистрируемого сигнала при $\alpha > 5^\circ$ приводит к большим погрешностям, усиливаемым дифференцированием. Поэтому сначала при малой интенсивности источника находится положение максимума, соответствующего направлению на приемник ($\alpha = 0^\circ$); затем от этого положения излучатель 8 поворачивается на 1° и в 10 раз увеличивается интенсивность источника, после чего с малым шагом ($\approx 1/40^\circ$) измеряется зависимость $N(\alpha)\sin(\alpha)$ (рис. 2, б).

Для экстраполяции индикатрисы в область малых углов рассеяния γ в [21] использовалась зависимость $\ln\chi(\gamma) = A + B\gamma + C\gamma^2$. Однако при обработке данных по рассеянию в глубинных водах Байкала третье слагаемое настолько незначительно при $\gamma < 2^\circ$, что его мы опускаем и используем выражение $\chi(\gamma) = A\exp(-s\gamma)$. Значения s находятся в интервале 20–40 рад $^{-1}$, и погрешность их определения мы оцениваем на уровне $\pm 25\%$.

Для численного моделирования процесса формирования сигнала от рассеянного излучения в оптической схеме прибора мы использовали модель индикатрисы вида $\chi_M(\gamma, A, s) = f(A\exp(-s\gamma) + 1 + \cos^2(\gamma))$, которая является суммой малоугловой аппроксимации экспериментально измеренной индикатрисы и релеевской составляющей. При численном моделировании наилучшее совпадение расчетных $b_{cal}^{1^\circ}/b_{cal}^{2^\circ}$ и измеренных значений $b_{mes}^{1^\circ}/b_{mes}^{2^\circ}$ (средние значения на глубине 1180 м) получено для $s(\lambda = 405 \text{ нм}) = 30 \text{ рад}^{-1}$, $s(\lambda = 460 \text{ нм}) = 33 \text{ рад}^{-1}$, $s(\lambda = 532 \text{ нм}) = 35 \text{ рад}^{-1}$. Такая спектральная зависимость s в нашей модели индикатрисы рассеяния

$\chi_M(\gamma, A, s)$ согласуется с выводом в [22] об уменьшении вытянутости углового распределения рассеянного света с увеличением длины волны.

Полученные другими авторами [9, 14, 15, 23, 24] индикатрисы рассеяния для вод Байкала немногочисленны и характеризуются большим разбросом значений, достигающих двух десятичных порядков для фиксированного направления в области углов 4–30°. Для $\gamma > 30^\circ$ измерений индикатрисы в глубинной байкальской воде нет совсем. Для океанических вод [25] индикатрисы имеют схожую структуру с используемой нами $\chi_M(\gamma, A, s)$: остронаправленные в области малых углов и слабораствующие в области обратного рассеяния.

Точная зависимость индикатрисы рассеяния на малые углы (менее 1°) не принципиальна для обработки данных нейтринного телескопа. Важно контролировать рассеяние назад. Как показывает практика, использование узконаправленного излучателя в глубинных водах Байкала не позволяет измерить рассеяние на углы $\gamma > 45^\circ$ (в идеале — прописать индикатрису от 0 до 180°), когда сигнал на углах поворота излучателя $\alpha > 45^\circ$ (рис. 2, а) составляет не более 10^{-5} от сигнала регистрируемого прямого света.

Для оценки интегральных параметров индикатрисы (коэффициента асимметрии индикатрисы K , среднего косинуса и среднего угла рассеяния) мы использовали излучатель с диаграммой направленности, ограниченной конусом с полным углом 70° (рис. 3, а). Конструкция этого прибора полностью повторяла прибор, приведенный на рис. 1, только вместо узконаправленного излучателя 8 был применен широкоугольный излучатель на основе трехцветного светодиода с максимумами на длинах волн 468, 521, 620 нм, а система затенения прямого света была дополнена экраном 4.3. Механика привода затеняющих экранов (рис. 3, а) рассчитана так, что при повороте источника света 8 экран 4.3 затеняет прямой свет, попадающий на приемник излучения (положение приводов А), и регистрируется сигнал $N_A = N_{close}$, соответствующий рассеянию вперед. Измерить непосредственно соответствующее значение интенсивности света при открытом источнике N_{open} в таком положении мы не можем и используем аппроксимацию, исходя из максимальной регистрируемой интенсивности излучения и ранее измеренной ее угловой зависимостью (рис. 3, б). Затем в процессе поворота источника 8 регистрируется зависимость сигнала от угла поворота, отсчитываемого от направления оси источника 8 на центр приемника 6. При углах поворота в диапазоне от 95° до 155° (положение приводов С) величина сигнала практически постоянна и определяется преимущественно рассеянием назад. Усреднением регистрируемого сигнала в указанной области углов получаем $N_C = N_{scback}$ и рассчитываем величину $K_{1mes} = N_A/N_C$. Далее для модельной индикатрисы с определенными выше значениями s и параметров оптической схемы прибора рассчитывается K_{1cal}

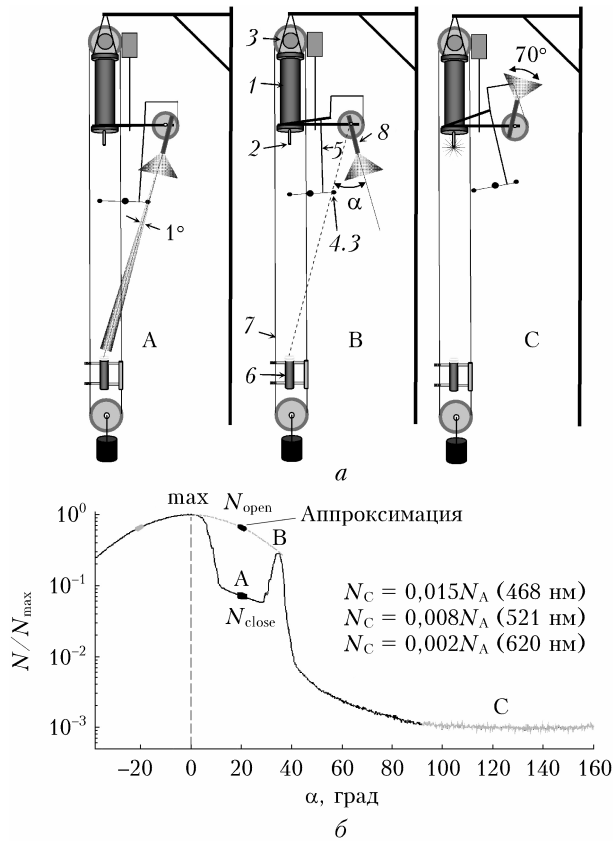


Рис. 3. Конструкция прибора (обозначения элементов совпадают с обозначениями на рис. 1) для реализации алгоритма оценки отношения рассеяния вперед к рассеянию назад: *a* – прямой свет затенен экраном (положение приводов А), освещает приемник (В) и заднюю полусферу (С); *b* – зависимость сигнала приемника от угла поворота источника (приведено отношение регистрируемых сигналов при положении приводов А и С для трех светодиодов с максимумом излучения на указанной длине волны)

для ряда значений коэффициента асимметрии индикатрисы K . Значение K определяется по наилучшему совпадению численно рассчитанных и экспериментально измеренных величин K_{1cal} и K_{1mes} .

Определение поправочных коэффициентов для измеренных значений ПГХ

Допустим, условия применения метода однократного рассеяния выполнены и справедлива зависимость (1). Тогда изотропный приемник от изотропного источника регистрирует сигнал $N_{total} = N_{dir} + N_{sc} = N_0 \exp(-aR)/R^2$, равный сумме прямого $N_{dir} = N_0 \exp(-cR)/R^2$ и рассеянного света $N_{sc} = N_{total} - N_{dir} = N_{total}(1 - \exp(-bR))$ [14]. В оптической схеме прибора БАИКАЛ-5D полностью регистрируется прямой свет, а рассеянный – частично: только из облучаемого конуса (полный угол конуса 140°) и ослабленный за счет дополнительного поглощения рассеянных фотонов на удлиненной траектории. Пусть при измерениях теряется постоянная (не зависящая от R) часть рассеянного

света $1/l$. Тогда регистрируется $N(R) = N_{total}(R) - N_{sc}(R)/l$. Считая $N_{total} \gg N_{sc}/l$ и используя разложение $1 - \exp(-bR) \approx bR - (bR)^2/2$, получим для регистрируемого сигнала

$$\ln(N(R)R^2) = \ln(N_{total}R^2) - bR/l + b^2R^2/2l = -[a + b/l]R + b^2R^2/2l + \text{const.} \quad (7)$$

Оценка сверху величины $bR < 0,2$ (глубинная байкальская вода, $R = 7,5$ м) позволяет пренебречь в формуле (7) слагаемым $\sim R^2$, что подтверждается хорошей линейностью экспериментально измеряемой зависимости $\ln(NR^2)$ (коэффициент корреляции более 0,998). Здесь важно отметить, что невозможность учесть при измерении $N(R)$ небольшую постоянную часть $1/l$ рассеянного излучения (в том числе рассеяние назад) не приводит к нарушению линейности $\ln(N(R)R^2)$, а лишь увеличивает на графике угол наклона прямой, соответствующей этой зависимости. Учитывая (2) и (7), поправка на показатель поглощения a имеет вид

$$a = a_{mes} - b/l. \quad (8)$$

Численное моделирование для приборов БАИКАЛ-5D показывает, что в глубинной зоне (700–1200 м) основные потери регистрируемого рассеянного излучения связаны с невозможностью зарегистрировать обратнорассеянный свет, и с приемлемой точностью поправку для спектрального диапазона $\lambda = 400\text{--}600$ нм можно определить как

$$a = a_{mes} - 1,4b/(K + 1). \quad (9)$$

Абсолютное значение поправки в глубинной байкальской воде максимально в ближней УФ-области (например, $\lambda = 405$ нм, $b \approx 0,03$ м⁻¹, $K = 5$) и составляет до $\Delta a = 0,005$ м⁻¹, но за счет большого поглощения в этой области поправка не вносит значительный вклад в относительную погрешность ($\sim 3\%$). Относительное значение поправки достигает максимума в окне прозрачности 480–490 нм (до 7%), а в красной области пренебрежимо мало из-за большого поглощения, а также растущих с длиной волны коэффициента асимметрии и длины рассеяния [15, 20, 26].

Численный расчет позволяет определить поправочный коэффициент $X(\lambda)$ в формуле (4). Для $\lambda = 470$ нм, углового размера экрана 1° и модельной индикатрисы рассеяния с $K = 9$, $a = 0,055$ м⁻¹, $b = 0,022$ м⁻¹ поправка составляет $b = 1,65b_{mes}$, для $\lambda = 520$ нм ($K = 12$, $a = 0,059$ м⁻¹, $b = 0,019$ м⁻¹) $b = 1,6b_{mes}$, а для $\lambda = 405$ нм ($K = 7$, $a = 0,13$ м⁻¹, $b = 0,028$ м⁻¹) $b = 1,72b_{mes}$.

Результаты и обсуждение

В 2020–2024 гг. было изготовлено четыре прибора БАИКАЛ-5D, три из которых в настоящее время установлены на гидрооптической гирлянде и еженедельно измеряют ПГХ. В настоящей статье

мы приводим некоторые экспериментальные результаты с целью продемонстрировать корректность работы приборов.

Численная оценка выполнения условий (3) метода однократного рассеяния проведена для глубинной байкальской воды в зимней экспедиции 2024 г. Для этого вначале проводилось штатное измерение поглощения на $\lambda = 468$ нм по схеме рис. 1, $a-v$ и была получена зависимость сигнала $N_1(R) = n_1 \exp(-R/L_1)/R^2$. Затем прибор был поднят и приемник света перевернут входным окном в противоположную от источника сторону (вниз). При перемещении приемника в таком положении получена зависимость сигнала $N_2(R) = n_2 \exp(-R/L_2)/R$, где $n_1 \approx 120n_2$, $L_1 = 17$ м, $L_2 = 8,7$ м. Тогда в пределах базы прибора 1,0–7,5 м имеем монотонно убывающие с R зависимости в диапазонах

$$240 \geq |d[N_1(R)]/dR|/|d[N_2(R)]/dR| \geq 32, \\ 120 \geq N_1(R)/N_2(R) \geq 20. \quad (10)$$

По результатам измерений рассчитаны значения K (район развертывания BAIKAL-GVD, 26–29.03.2024 г., диапазон глубин 700–1250 м). Достоверно удалось провести измерения для синего и зеленого светодиодов с максимумом интенсивности излучения на длинах волн 468 и 521 нм соответственно. Обработанные результаты (таблица) показывают относительно небольшое изменение b и K в диапазоне глубин 700–1250 м. Прослеживаются следующие закономерности, установленные в [26] для поверхностной зоны Байкала и других природных вод: с увеличением длины волны видимого света увеличивается длина рассеяния и K , который при $\lambda = \text{const}$ возрастает с увеличением рассеяния. Полученные для глубинных вод оз. Байкал значения K (таблица) близки к минимально измеренным в океане [21, 27] и в 2–10 раз меньше полученных для глубин 0–150 м [9, 26, 28] в оз. Байкал.

Результаты измерений (26–29.03.2024 г.) и расчета характеристик рассеяния

Глубина, м	$1/b(468 \text{ нм}),$ м	K (468 нм)	$1/b(521 \text{ нм}),$ м	K (521 нм)
700	$39,2 \pm 2,1$	$8,9 \pm 0,5$	$43,3 \pm 2,5$	$13,1 \pm 0,9$
800	$37,0 \pm 1,9$	$9,5 \pm 0,6$	$44,6 \pm 2,2$	$13,0 \pm 0,7$
900	$38,8 \pm 1,8$	$9,5 \pm 0,5$	$45,2 \pm 2,1$	$12,9 \pm 0,8$
1000	$42,4 \pm 1,8$	$8,7 \pm 0,4$	$47,3 \pm 2,2$	$12,4 \pm 0,9$
1100	$43,4 \pm 1,7$	$8,5 \pm 0,5$	$47,7 \pm 2,4$	$12,5 \pm 1,0$
1175	$44,6 \pm 1,9$	$8,3 \pm 0,7$	$50,8 \pm 2,5$	$11,6 \pm 0,9$
1250	$39,8 \pm 1,7$	$9,2 \pm 0,6$	$44,6 \pm 2,1$	$13,0 \pm 1,1$
$\langle \cos(\gamma) \rangle$	$0,8 \pm 0,03$		$0,85 \pm 0,03$	

Измеренные спектры поглощения (рис. 4) имеют минимум на $\lambda = 480$ –500 нм и характерный изгиб в районе 600 нм, определяемый поглощением чистой воды [29]. Спектры поглощения (рис. 4) получены 11.05.2023 г. двумя изготовленными в НИИПФ ИГУ приборами BAIKAL-5D, установленными на глубинах 1180 и 1100 м. Как правило,

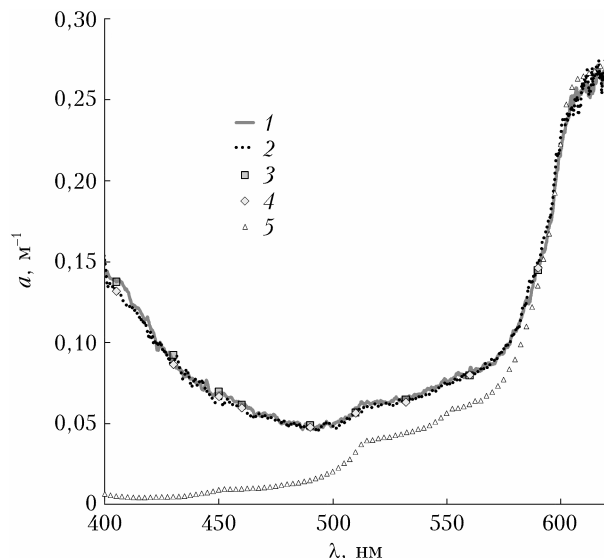


Рис. 4. Спектры поглощения (11.05.2023 г.): 1 и 2 – алгоритм A2, глубина 1100 и 1180 м соответственно; 3 и 4 – алгоритм A1, глубина 1100 и 1180 м; 5 – спектр поглощения чистой воды по [29]

в это время года ПГХ на указанных глубинах одинаковы, и совпадение полученных спектров указывает на хорошую повторяемость результатов измерений для таких приборов. Спектры, полученные по алгоритму A2 (погрешность ~10%), хорошо согласуются со значениями показателя поглощения в дискретных точках, измеренных по алгоритму A1 (погрешность не более 5%).

Для полученных за период наблюдений спектров рассеяния $b(\lambda)$ (рис. 5) характерно убывание с ростом длины волны примерно как $\lambda^{-\mu}$. Для спектра $b(\lambda)$ 5.04.2023 г. параметр $\mu = 1,44$, а для спектра 16.11.2023 г. $\mu = 1,29$. Разброс точек спектра,

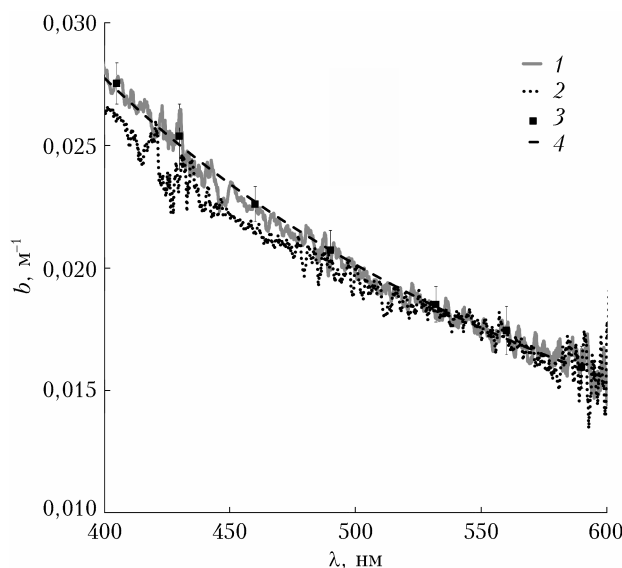


Рис. 5. Спектры рассеяния (глубина 1100 м): 1 – алгоритм S2 (5.04.2023 г.); 2 – алгоритм S2 (16.11.2023 г.); 3 – алгоритм S1 (5.04.2023 г.); 4 – аппроксимация $b(\lambda) = B\lambda^{-\mu}$ спектра (5.04.2023 г.)

по-видимому, связан с погрешностью измерения $b(\lambda)$ по алгоритму S2 (~20%). Спектр, измеренный по алгоритму S2, хорошо согласуется с $b(\lambda)$, полученным по алгоритму S1 (погрешность менее 10%).

Заключение

Опыт эксплуатации четырех приборов типа БАИКАЛ-5D в течение 2020–2024 гг. подтвердил их высокую надежность и стабильную повторяемость результатов измерения первичных гидрооптических характеристик, а также возможность работы длительное время без обслуживания и настроек. Примененные методы измерения поглощения и рассеяния являются абсолютными, а возникающие систематические погрешности измерения ПГХ в глубинных водах оз. Байкал могут быть принципиально минимизированы поправками, рассчитанными на основе измеряемых прибором БАИКАЛ-5D величин. Результаты измерений ПГХ за период 2021–2024 гг. хорошо согласуются с полученными ранее данными других исследователей. В дальнейшем целесообразно изучить возможность применения приборов БАИКАЛ-5D для измерения ПГХ в приповерхностной зоне Байкала.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука» (грант № 075-15-2024-541).

Список литературы

1. Aynutdinov V.M., Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V., Bardachova Z., Belolaptikov I.A., Bondarev E.A., Borina I.V., Budnev N.M., Chadymov V.A., Chepurnov A.S., Dik V.Y., Domogatsky G.V., Doroshenko A.A., Dornický R., Dyachok A.N., Dzhilkibaev Zh.A.M., Eckerová E., Elzhov T.V., Fajt L., Fomin N., Gafarov A.R., Golubkov K.V., Gorshkov N.S., Gress T.I., Kebkal K.G., Kharuk I.V., Khramov E.V., Kolbin M.M., Koligaeв S.O., Konischev K.V., Korobchenko A.V., Koshechkin A.P., Kozhin V.A., Kruglov M.V., Kulepov V.F., Lemeshev Y.E., Milenin M.B., Mirgazov R.R., Naumov D.V., Nikolaev A.S., Petukhov D.P., Pliskovsky E.N., Rozanov M.I., Ryabov E.V., Safronov G.B., Seitova D., Shaybonov B.A., Shelepov M.D., Shilkin S.D., Shirokov E.V., Šimkovic F., Sirenko A.E., Skurikhin A.V., Solovjev A.G., Sorokovikov M.N., Štekl I., Stromakov A.P., Suvorova O.V., Tabolenko V.A., Ulzutuev B.B., Yablokova Y.V., Zaborov D.N., Zavyalov S.I., Zvezdov D.Y. The BAIKAL-GVD neutrino telescope: Current status and development prospect // *Phys. Atom. Nucl.* 2023. V. 86, N 6. P. 989–994. DOI: 10.1134/s1063778824010101.
2. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.
3. Riccobene G., Capone A. Deep seawater inherent optical properties in the Southern Ionian Sea // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27, N 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2006.08.006.
4. Bailly N., Bedard J., Böhmer M., Bosma J., Brunsow D., Cheng J., Clark K., Croteau B., Danninger M., De Leo F., Deis N., Ens M., Fox R., Fruck C., Gärtner A., Gernhäuser R., Ghuman D., Grant D., He H., Henningsen F., Holzapfel K., Hotte R., Jenkins R., Johnson H., Katil A., Kopper C., Krauss C.B., Kulin I., Leismüller K., Leys S., Lin T., Macoun P., Man M., McElroy T., Meighen-Berger S., Michel J., Moore R., Morley M., Papp L., Pirenne B., Qiu T., Rankin M., Rea I.C., Resconi E., Round A., Ruskey A., Rutley R., Spannfellner C., Stacho J., Timmerman R., Tomlin M., Tradewell M., Traxler M., Uganecz M., Wagner S., Yañez J.P., Zheng Y. Two-year optical site characterization for the Pacific Ocean Neutrino Experiment (P-ONE) in the Cascadia Basin // *Eur. Phys. J. C* 2021. V. 81, N 12. P. 1071. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09872-5.
5. Anassontzis E.G., Ball A.E., Belias A., Fotiou A., Grammatikakis G., Kontogiannis H., Koske P., Koutsoukos S., Lykoussis V., Markopoulos E., Psallidas A., Resvanis L.K., Siotis I., Stavrakakis S., Stavropoulos G., Zhukov V.A. Water transparency measurements in the deep Ionian Sea // *Astropart. Phys.* 2010. V. 34, N 4. P. 187–197. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2010.06.008.
6. Лу М.Е., Федоров С.В. Спектральный измеритель прозрачности морской воды на основе многоцветного светодиода // *Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. СПб., 2019. С. 292–297.
7. Moore C., Zaneveld J.R.V., Kitchen J.C. Preliminary results from an *in situ* spectral absorption meter // *Proc. SPIE*. 1992. P. 330–337.
8. Маньковский В.И. Спектральный лабораторный прозраномер с переменной базой // *Системы контроля окружающей среды*. 2012. Вып. 17. С. 56–60.
9. Маньковский В.И. Характеристики индикатрис рассеяния света в водах оз. Байкал // *Автоматизация лимнологических исследований и световой режим водоемов*. Новосибирск: Наука, 1984. С. 125–137.
10. Seabird. Ac-s Spectral Absorption and Attenuation Sensor: Ac-s In-Situ Spectrophotometer Datasheet. URL: www.seabird.com (last access: 20.09.2024).
11. Hobilabs. Gamma-4 Spectral Transmissometer: Gamma-4 Spectral Transmissometer Manual. URL: www.hobilabs.com (last access: 20.09.2024).
12. Hobilabs. A-Sphere In-Situ Spectrophotometer: A-Sphere In-Situ Spectrophotometer Manual. URL: www.hobilabs.com (last access: 20.09.2024).
13. Balkanov V., Belolaptikov I., Bezrukov L., Budnev N., Capone A., Chensky A., Danilchenko I., Domogatsky G., Dzhilkibaev Zh.-A., Fialkovsky S., Gaponenko O., Gress O., Gress T., Il'yasov R., Klabukov A., Klimov A., Klimushin S., Konischev K., Koshechkin A., Kuznetsova Vy., Kuzmichev L., Kulepov V., Lubsandorzhiev B., Masullo R., Migneco E., Mikhayev S., Milenin M., Mirgazov R., Moseiko N., Osipova E., Panfilov A., Pan'kov L., Parfenov Yu., Pavlov A., Petrucci M., Pliskovsky E., Pokhil P., Poleschuk V., Popova E., Prosin V., Riccobene G., Rozanov M., Rubtsov V., Semenov Yu., Spiering Ch., Streicher O., Tarashansky B., Vasiljev R., Wischniewski R., Yashin I., Zhukov V. Simultaneous measurements of water optical properties by AC-9 transmissometer and ASP-15 inherent optical properties in Lake Baikal // *Nucl. Instrum. Meth.* 2003. V. A298. P. 231–239. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01789-8.
14. Avrorin A., Aynutdinov V., Belolaptikov I., Bogorodskiy D., Budnev N., Danilchenko I., Domogatsky G., Doroshenko A., Dyachok A., Dzhilkibaev Z., Fialkovsky S., Gaponenko O., Golubkov K., Gress O., Gress T., Grishin O., Karnaukhov V., Klabukov A., Ko-

- nishev K., Koshechkin A., Koshel' F., Korobchenko A., Kulepov V., Kuleshov D., Kuzmichev L., Lyashuk V., Milenin M., Mirgazov R., Osipova É., Pan'kov A., Pankov L., Panfilov A., Perevalov A., Petukhov D., Pliskovsky E., Poleschuk V., Rastegin A., Rozanov M., Rubtsov V., Ryabov E., Sheifler A., Shoibonov B., Spiering C., Suvorova O., Tarashansky B., Wischniewski R., Yagunov A.S., Zagorodnikov A., Zhukov V.* ASP-15 – A stationary device for the measurement of the optical water properties at the NT200 neutrino telescope site // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2012. V. 693. P. 186–194. DOI: 10.1016/j.nima.2012.06.035.
15. Таращанский Б.А., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р., Рябов Е.В., Ягунов А.С. Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15 // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 793–802.
 16. 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.
 17. Буренков В.И., Васильков А.П., Шифрин К.С. и др. *Оптика океана: в 2 т. Т. 1. Физическая оптика океана.* М.: Наука, 1983. 371 с.
 18. Пелевин В.Н., Прокудина Т.М. Определение величины показателя поглощения света морской водой по параметрам поля изотропного источника // *Оптика океана и атмосферы.* Л.: Наука, 1972. С. 148–157.
 19. 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 атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 4. С. 351–359.
 20. Ryabov E., Tarashansky B. Monitoring of optical properties of deep lake water // *J. Instrum.* 2021. V. 16. P. 09001. DOI: 10.1088/1748-0221/16/09/C09001.
 21. Маньковский В.И. Спектральная изменчивость индикатрис рассеяния света морской водой // *Океанология.* 1984. Т. 24, вып. 1. С. 63–69.
 22. Chami M., Shybanov E.B., Khomenko G.A., Lee M.E.-G., Martynov O.V., Korotaev G.K. Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment // *Appl. Opt.* 2006. V. 45, N 15. P. 3605–3619. DOI: 10.1364/AO.45.003605.
 23. *Байкаловедение* / под ред. О.Т. Русинек, В.В. Тахте-ев, Д.П. Гладкочуб и др. В 2 кн.: Новосибирск, 2012. Кн. 1. 237 с.
 24. Таращанский Б.А. Методы мониторинга и результаты измерений оптических свойств водной среды в районе байкальского нейтринного телескопа НТ-200: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ РАН, 1999. 131 с.
 25. Petzold T.J. Volume scattering function for selected ocean waters. San Diego, 1972. P. 79.
 26. Маньковский В.И. О спектральной изменчивости коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 10. С. 868–870. DOI: 10.15372/AOO20221010.
 27. Копелевич О.В. Экспериментальные данные об оптических свойствах морской воды // *Физическая оптика океана.* Л.: Наука, 1983. С. 168.
 28. Маньковский В.И. Изменение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света природных вод, содержащих органические частицы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2016. Т. 52, № 3. С. 373–378. DOI: 10.7868/S0002351516030081.
 29. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water // *Appl. Opt.* 1997. V. 36, N 33. P. 8710–8722. DOI: 10.1364/AO.36.008710.

A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, V.A. Allakhverdyan, Z. Bardachova, I.A. Belolaptikov, E.A. Bondarev, I.V. Borina, N.M. Budnev, V.A. Chadymov, A.S. Chepurinov, V. Dik, A.A. Doroshenko, G.V. Domogatsky, R. Dvornicky, A.N. Dyachok, Zh.-A.M. Dzhlkibaev, E. Eckerova, T.V. Elzhov, V.N. Fomin, A.R. Gafarov, K.V. Golubkov, N.S. Gorshkov, T.I. Gress, K.G. Kebkal, V.K. Kebkal, I.V. Kharuk, E.V. Khramov, M.I. Kleimenov, M.M. Kolbin, S.O. Koligaev, K.V. Konischev, A.V. Korobchenko, A.P. Koshechkin, V.A. Kozhin, M.V. Kruglov, V.F. Kulepov, A.A. Kulikov, Y.E. Lemeshev, R.R. Mirgazov, D.V. Naumov, A.S. Nikolaev, I.A. Perevalova, D.P. Petukhov, E.N. Pliskovsky, M.I. Rozanov, E.V. Ryabov, G.B. Safronov, B.A. Shaybonov, V.Yu. Shishkin, E.V. Shirokov, F. Simkovic, A.E. Sirenko, A.V. Skurikhin, A.G. Solovjev, M.N. Sorokovikov, I. Stekl, A.P. Stromakov, O.V. Suvorova, V.A. Tabolenko, V.I. Tre- tiak, Y.V. Yablokova, D.N. Zaborov, S.I. Zavyalov, D.Y. Zvezdov. **Instruments and methods for long-term monitoring of optical properties of deep waters of Lake Baikal.**

The development of the deep underwater neutrino telescope BAIKAL-GVD involves the creation of equipment for regular long-term monitoring of inherent optical properties (IOP) of the aquatic environment within the effective volume of the telescope. Regular monitoring of IOP not only allows increasing the accuracy of retrieving neutrino energy and direction, but also provides unique data for limnological studies. The article describes the design of the BAIKAL–5D devices developed to solve this problem and considers the methods and algorithms for in situ monitoring of IOP used in these devices. The sources of instrumental error in measuring the absorption and scattering of light in water are investigated and the necessary corrections are determined. Some results of measuring IOP of the deep waters of Lake Baikal using BAIKAL–5D devices are presented.