

УДК 621.383.2+539.1.074.4+539.1.075

СВЕТОДИОДНАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ СИСТЕМА ВНЕШНИХ ГИРЛЯНД ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА НТ-200+ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2011 г. Р. В. Васильев, Е. Э. Вятчин, Б. К. Лубсандоржиев, Р. В. Полещук, Б. А. М. Шайбонов

Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

Поступила в редакцию 11.01.2011 г.

Описана система, разработанная для калибровки внешних гирлянд глубоководного нейтринного телескопа НТ-200+ на озере Байкал, разнесенных на расстояния ~100 м от основного ядра установки. Калибровочная система основана на наносекундных источниках света на основе ультраярких синих светоизлучающих диодов. Показано, что при использовании такой калибровочной системы достигается точность синхронизации во времени внешних гирлянд с центральной частью телескопа не хуже 1 нс.

Открытие космических лучей произошло почти сто лет назад. Тем не менее, происхождение космических лучей и механизмы их ускорения продолжают оставаться одними из самых интригующих загадок современной физики. Неопровержимым доказательством так называемых адронных механизмов ускорения было бы детектирование высокоэнергичных космических нейтрино — продуктов распадов адронов, образовавшихся в результате взаимодействий еще более высокоэнергичных адронов с веществом. Детектирование таких нейтрино представляет не простую экспериментальную задачу. Это связано, в первую очередь, с малой вероятностью взаимодействия нейтрино с веществом, с их очень малыми потоками и высоким уровнем фона, обусловленного нейтрино, порожденными в атмосфере Земли. В силу этого приходится создавать детекторы огромных объемов глубоко под землей или под водой для подавления фона от атмосферных нейтрино. В отличие от подземных детекторов, глубоко под водой возможно создание нейтринных детекторов гигантских размеров.

Глубоководные нейтринные эксперименты имеют более чем тридцатилетнюю историю. Первый в мире глубоководный нейтринный телескоп НТ-200 [1], расположенный на озере Байкал, функционирует с апреля 1998 года. Одной из основных задач глубоководных нейтринных телескопов является детектирование высокоэнергичных адронных и электромагнитных ливней от продуктов взаимодействия нейтрино высокой энергии с веществом. Из-за большой энергии ливней становится возможным их детектирование на больших расстояниях от точки образования ливней. Это приводит к существенному увеличению чувствительного объема детекторов.

Именно для увеличения эффективного объема телескопа для нейтрино высоких энергий предпринята попытка расширения телескопа до масштаба 10^7 т. Модернизация осуществлена за счет добавления к существующему телескопу НТ-200 трех внешних гирлянд. Модернизированный телескоп получил название НТ-200+ [2], его общая схема приведена на рис. 1. Каждая внешняя гирлянда НТ-200+ расположена в ~100 м от центральной части телескопа НТ-200, конструкция которого остается неизменной. Для синхронизации во времени внешних гирлянд с телескопом НТ-200 была создана калибровочная система, основанная на использовании наносекундных источников света повышенной мощности, разработанных для этой системы на основе ультраярких светодиодов.

Калибровочная система НТ-200+ состоит из существующей лазерной системы НТ-200 [3] и системы на основе светодиодов [4], специально разработанной для телескопа НТ-200+. Лазерная система содержит два лазерных модуля на основе азотных лазеров и лазеров на красителях, закрепленных в верхней и нижней частях центральной гирлянды телескопа. Нижний лазерный модуль излучает световые импульсы прямо в воду, верхний лазер через систему оптоволоконных кабелей засвечивает каждый оптический канал телескопа НТ-200.

Из-за технической сложности, малого срока службы и неудобства применения лазеров все более перспективными становятся источники на основе ультраярких светодиодов, у которых число фотонов в одном импульсе может достигать величины $\sim 10^{10} - 10^{12}$ при наносекундной длительности [5, 6].

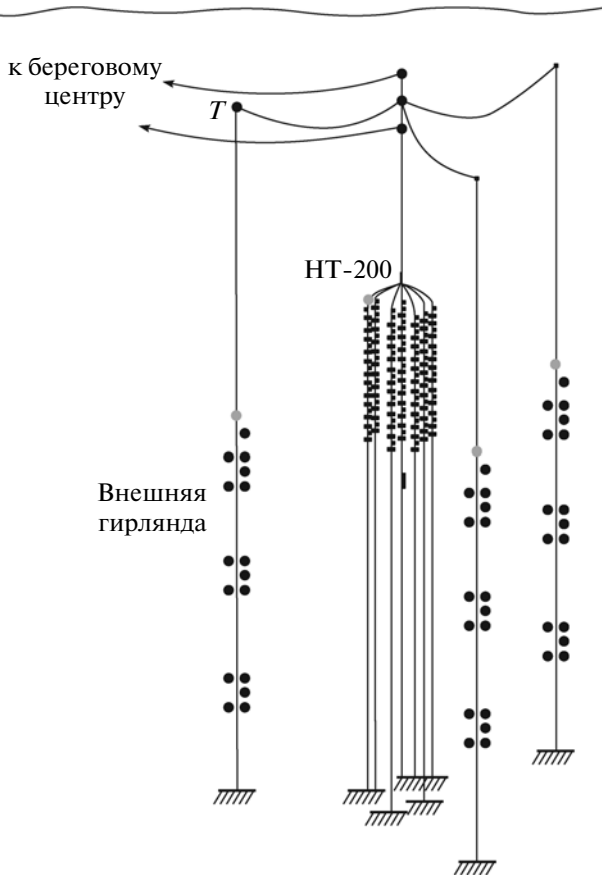


Рис. 1. Глубоководный нейтринный телескоп HT-200+. ● — оптические и электронные модули; ● — модули наносекундных световых импульсов светодиодной калибровочной системы; T — триггерный модуль светодиодной калибровочной системы.

Основная идея новой калибровочной системы заключается в использовании светодиодных источников света на каждой внешней гирлянде и на одной из периферийных гирлянд телескопа

HT-200 (рис. 2). Все источники света запускаются из одного триггерного модуля, расположенного на кабель-тресе одной из внешних гирлянд HT-200+. Триггерный импульс из этого модуля посылается по коаксиальным кабелям одинаковой длины к источникам света внешних гирлянд по команде с берегового центра. В связи с конструктивными особенностями телескопа HT-200 длины коаксиальных кабелей должны быть равными ~ 1200 м.

На первый взгляд, возможность синхронизации работы внешних гирлянд и телескопа HT-200 с точностью < 1 нс не выглядит столь уж очевидной. Дело в том, что время нарастания запускающего импульса при прохождении данного коаксиального кабеля (РК-50-2-11) увеличивается со скоростью 0.12 нс/м и после 1200 м кабеля время нарастания импульса составляет ~ 145 нс. Временной разброс между выходными (запускающими) импульсами триггерного модуля не превышает 50 пс [7].

На рис. 3а приведена схема измерений разброса времен прихода импульсов относительно сигналов генератора после прохождения коаксиального кабеля РК-50-2-11 длиной 1200 м. Сигнал с генератора G (DG535, Stanford Research System) разветвляется и, пройдя через дискриминатор D_1 (LeCroy 621AL) и блок цифровой задержки ЦЗ (БЗЦ-4А), подается на вход “Старт” времяцифрового преобразователя ВЦП (БПТ-12А1) с шириной канала 75 пс и максимальным диапазоном измеряемых интервалов времени 5 мкс.

Этот же сигнал с разветвителя, пройдя через коаксиальный кабель длиной 1200 м, поступает на дискриминатор D_2 (LeCroy 621AL), выходной сигнал которого подается на вход “Стоп” ВЦП. Блок цифровой задержки введен для того, чтобы интервалы времени между сигналами *Старт* и *Стоп* попадали в рабочий диапазон ВЦП.

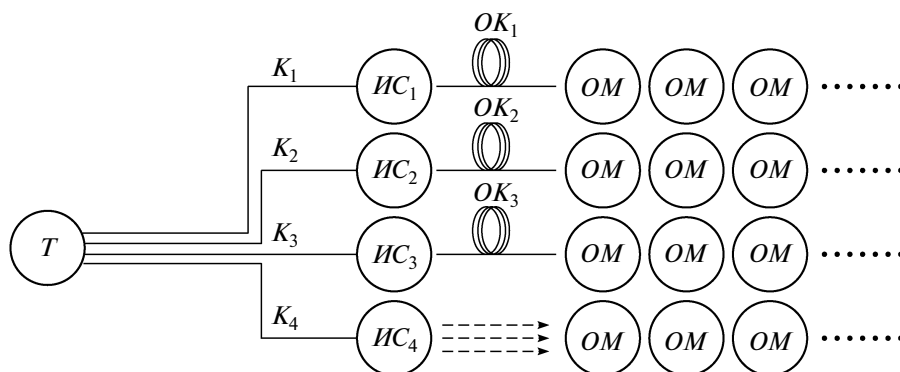


Рис. 2. Функциональная схема калибровочной системы глубоководного нейтринного телескопа HT-200+. T — триггерный модуль; K_1 – K_4 — коаксиальные кабели РК-50-2-11 длиной 1200 м каждый; $ИС_1$ – $ИС_3$ — источники световых импульсов на внешних гирляндах, $ИС_4$ — на одной из периферийных гирлянд телескопа HT-200; $ОК_1$ – $ОК_3$ — системы оптоволоконных кабелей внешних гирлянд; $ОМ$ — оптические модули глубоководных гирлянд.

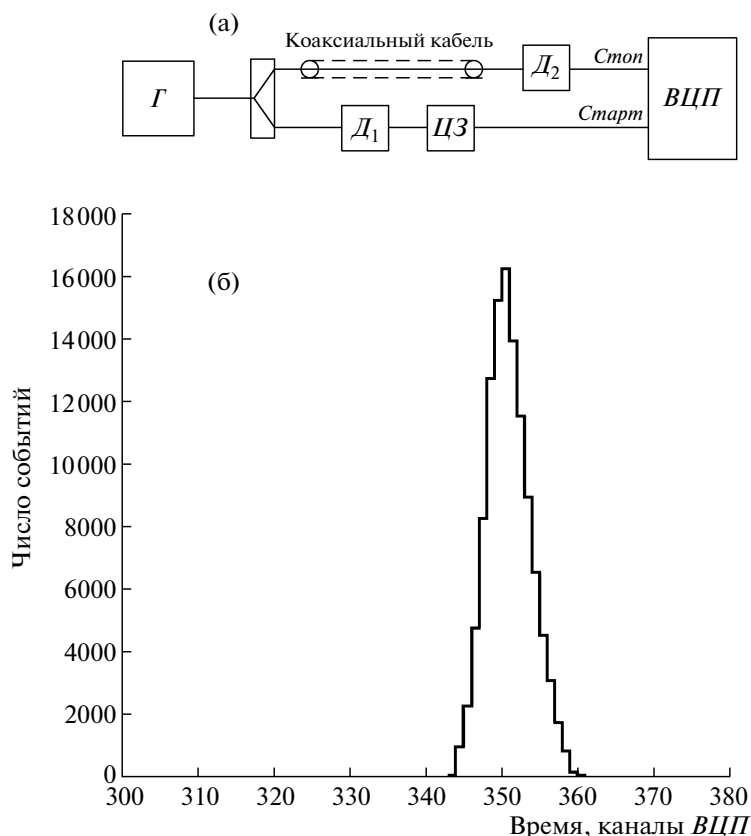


Рис. 3. а – схема измерений разброса времен прихода импульсов генератора после прохождения коаксиального кабеля РК-50-2-11 длиной 1200 м относительно импульсов генератора (Γ – генератор; D_1 , D_2 – дискриминаторы; ВЦП – времяцифровой преобразователь; ЦЗ – блок цифровой задержки); **б** – распределение времен прихода импульсов генератора после прохождения этого кабеля относительно сигналов генератора, задержанных блоком цифровой задержки.

На рис. 3б показано измеренное распределение времен прихода импульсов после прохождения коаксиального кабеля длиной 1200 м относительно сигнала генератора, задержанного блоком цифровой задержки. Полная ширина на половине высоты (п.ш.в.п.) этого распределения составляет ~ 350 пс, причем основной вклад в эту величину вносит блок цифровой задержки, у которого разброс времени задержки выходных сигналов (внутренний “джиттер”) составляет ~ 330 пс (п.ш.в.п.). Следовательно, истинный разброс времен прихода импульсов после прохождения кабеля не превышает 120 пс (п.ш.в.п.).

Измерение временного разброса между выходными импульсами триггерного модуля после прохождения коаксиальных кабелей РК-50-2-11 длиной 1200 м проводилось на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 4а. В измерениях используются сигналы любых двух выходов триггерного модуля из четырех. Эти сигналы через коаксиальные кабели длиной 1200 м поступают на входы дискриминаторов D_1 и D_2 , с помощью которых формируются сигналы *Старт* и *Стоп* ВЦП. Выходной сигнал дискриминатора D_2 предвари-

тельно задерживается с помощью небольшой (~ 40 нс) кабельной линии задержки ЛЗ. Результаты измерений приведены на рис. 4б. Разброс времен прихода импульсов друг относительно друга не превышает 150 пс (п.ш.в.п.). Этот результат одинаков для сигналов от всех комбинаций выходов триггерного модуля.

Для использования в калибровочных системах разнесенных гирлянд нами были разработаны глубоководные модули наносекундных источников света. Наносекундный источник света состоит из 5 ультраярких светодиодов NSPB500S производства Nichia Chemical, собранных в единую матрицу. Светодиоды NSPB500S являются одними из первых коммерчески доступных ультраярких синих светодиодов на основе соединений InGaN/GaN.

К сожалению, было обнаружено, что светодиоды NSPB500S весьма сильно различаются по кинетике свечения в зависимости от времени их производства [8]. Так, светодиоды этой марки, приобретенные нами до 2000 г., отличаются очень быстрой кинетикой свечения без медленных компонент. К обозначениям этих светодиодов мы добавили расширение old – NSPB500S(old). Все

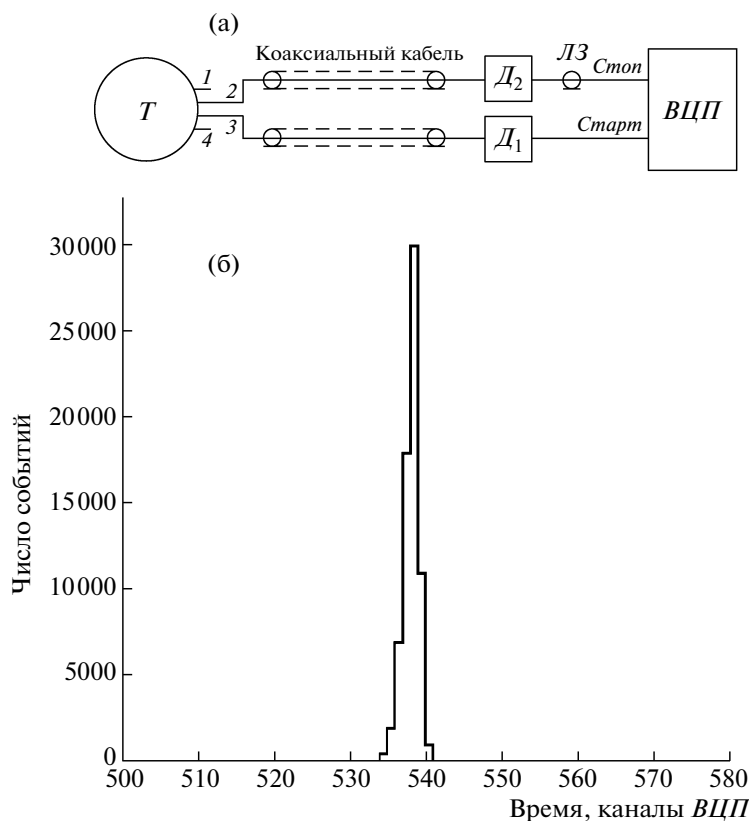


Рис. 4. а – функциональная схема измерений временного разброса между выходными импульсами триггерного модуля после прохождения коаксиальных кабелей РК-50-2-11 длиной 1200 м ($1-4$ – выходы триггерного модуля, $LЗ$ – линия задержки); **б** – распределение времен прихода импульсов друг относительно друга после прохождения коаксиальных кабелей РК-50-2-11 длиной 1200 м каждый.

светодиоды этой марки, приобретенные после 2000 года, имеют уже существенно медленную кинетику свечения, практически исключающую возможность их использования во временных калибровочных системах. Эти светодиоды обозначаются NSPB500S(new).

Каждый светодиод матрицы имеет свой собственный формирователь импульсов запуска. Все светодиоды матрицы тщательно подобраны и имеют одинаковые световыходы и кинетики свечения. Формирователи импульсов запуска светодиодов отрегулированы таким образом, чтобы обеспечить одинаковые формы световых импульсов.

Принципиальная схема формирователя представлена на рис. 5. Каждый формирователь основан на лавинном транзисторе ZTX415. Входной триггерный сигнал вызывает лавинные пробой транзисторов, которые приводят к быстрым разрядам конденсаторов ($C_3, C_6, C_9, C_{12}, C_{15}$), первоначально заряженных до напряжения питания $U \approx 340-350$ В, через лавинные транзисторы T_1-T_5 и светодиоды D_1-D_5 . Для укорочения импульсов тока, протекающих через светодиоды, параллельно светодиодам включаются RL -цепочки ($R_4, R_8,$

$R_{12}, R_{16}, R_{20}, L_1-L_5$). Значения сопротивлений и индуктивностей подбираются индивидуально для каждого светодиода.

На рис. 6 показаны кинетики свечения отдельных светодиодов матрицы и всей матрицы в целом. Измерения кинетики свечения проводятся методом счета коррелированных во времени фотонов [9] с использованием быстродействующего фотоумножителя XP2020. Для обеспечения необходимого для этого метода однофотозлектронного уровня засветки фотокатода фотоумножителя применялись оптические аттенюаторы и коллиматор. При измерении кинетики свечения отдельных светодиодов остальные светодиоды матрицы маскировались.

Как видно из рис. 6, удается достичь высокой степени идентичности кинетики свечения и высокой степени одновременности срабатывания всех светодиодов матрицы. Разброс времени срабатывания светодиодов в матрице не превышает 50 пс. В результате кинетика свечения всей матрицы светодиодов в целом практически полностью повторяет кинетику свечения индивидуальных светодиодов матрицы.

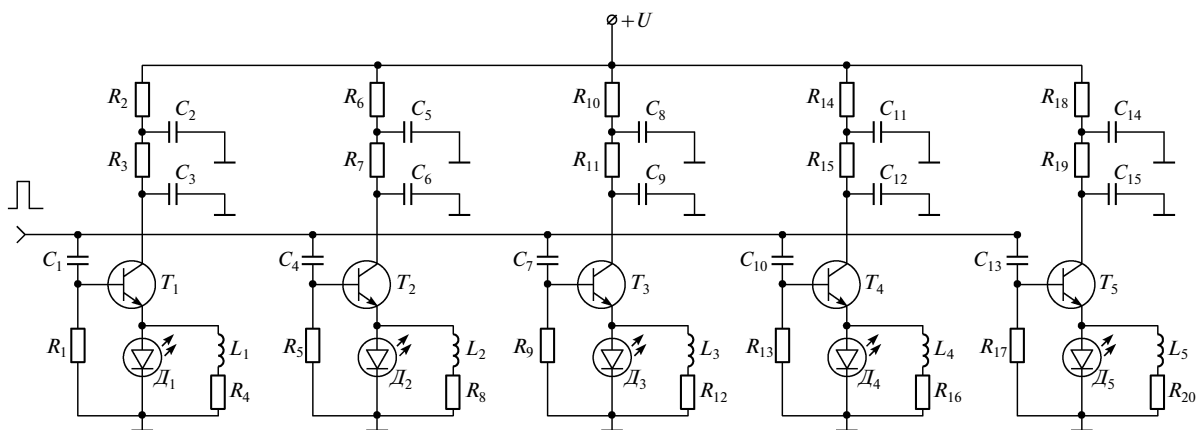


Рис. 5. Принципиальная схема наносекундного источника света. T_1-T_5 – ZTX415; D_1-D_5 – NSPB500S(old); $L_1-L_5 = 70-100$ нГн; $C_1, C_2, C_4, C_5, C_7, C_8, C_{10}, C_{11}, C_{13}, C_{14} = 100$ нФ, $C_3, C_6, C_9, C_{12}, C_{15} = 10$ пФ; $R_1, R_5, R_9, R_{13}, R_{17} = 50$ Ом, $R_2, R_6, R_{10}, R_{14}, R_{18} = 10$ кОм, $R_3, R_7, R_{11}, R_{15}, R_{19} = 70$ кОм, $R_4, R_8, R_{12}, R_{16}, R_{20} = 10-30$ Ом.

Длительность световых импульсов источников света составляет ~ 1.8 нс (п.ш.п.в.). В распределениях на рис. 6 пики в области 22 нс и 48 нс обусловлены предимпульсами и задержанными импульсами [10, 11] фотоумножителя XP2020 и не имеют отношения к кинетике свечения светодиодов. Световой выход источника, измеренный с использованием интегрирующей сферы и калиброванного фотодиода, достигает $\sim 10^{10}$ фотонов в импульсе.

Вообще говоря, для таких целей могут быть использованы ультраяркие светодиоды с быстрой кинетикой свечения и максимумом спектра излучения на длинах волн $\lambda_{\max} = 470-510$ нм, т.е. светодиоды, излучающие прямо в окне прозрачности глубинных вод озера Байкал – в области спектра, где поглощение света минимально [12]. Зелено-голубые ($\lambda_{\max} = 490-505$ нм) ультраяркие светодиоды практически идеально соответствуют по спектру излучения и интенсивности, однако их кинетика свечения значительно уступает голубым светодиодам с $\lambda_{\max} = 470$ нм [4].

Светодиоды NSPB500S(old) выбраны из большого числа исследованных типов светодиодов. В таблице приведены сравнительные характеристики некоторых из них. Матрица светодиодов с формирователями импульсов запуска помещается в металлический корпус для подавления электромагнитных наводок.

В качестве защитного корпуса источника света используется стеклянная глубоководная защитная сфера оптических модулей Байкальского нейтринного эксперимента [13], состоящая из двух полусфер. Эти полусферы изготовлены из боросиликатного стекла С1-49 толщиной ~ 10 мм, которое обладает достаточно хорошей оптической прозрачностью в сине-голубой области спектра (рис. 7).

Источник света закрепляется в полюсе одной из полусфер с помощью кремнийорганического герметика. Непосредственно над источником света фиксируется механический кожух (крейт) стандарта Eugocard, в котором устанавливается электронный блок управления источником света. Этот блок состоит из дискриминатора входных импульсов и формирователя импульса для запуска источника света. В этом же крейте помещается блок питания источника света.

Возможны два режима работы источника света: автономный режим и режим внешнего запуска. В автономном режиме управление источником света осуществляется из берегового центра

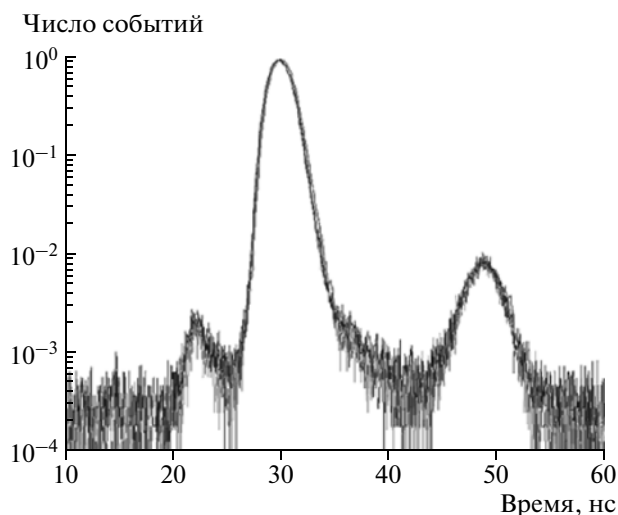


Рис. 6. Кинетика свечения отдельных светодиодов и наносекундного источника света в целом. Кинетики свечения индивидуальных светодиодов источника и всего источника в целом изображены линиями разных тонов. Черная линия соответствует кинетике свечения всего источника.

Тип светодиода	λ_{\max} , нм	Длительность светового импульса, нс	Световыход, отн. ед.
NSPB500S(old)	470	1.8	1
L7113NBC	470	2.0	0.5
NSPB500S(new)	470	4.5	2
L7113PBC	470	4.5	1.4
BLBB43V1	470	2.1	1.3
LDBK13633L6	470	2.1	1.5
YM-BV5S15N	470	2.0	2.1
LBN3000	470	2.4	2.2
NSPE590S	505	13	4

через контроллер крейта, который задает частоту запуска источника света. В режиме внешнего запуска триггерный сигнал для всех глубоководных модулей источников света поступает одновременно по команде из берегового центра из одного триггерного модуля запуска через коаксиальные кабели длиной 1200 м. Триггерный сигнал для формирователя импульсов запуска светодиода образуется при поступлении сигнала от удаленного электронного модуля на вход дискриминатора, выполненного на быстродействующем компараторе КР597СА1. Внешний вид глубоководного модуля наносекундного источника света

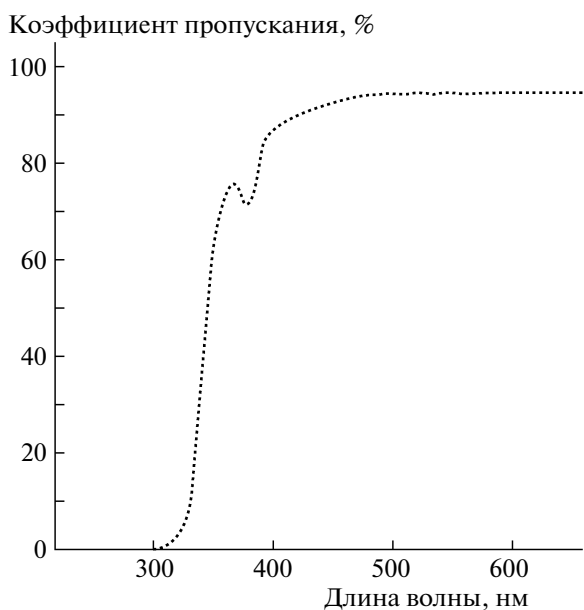


Рис. 7. Спектр пропускания стекла глубоководного модуля наносекундного источника света.

нейтринного телескопа НТ-200+ в процессе его сборки показан на рис. 8.

Глубоководные модули источников света устанавливаются в верхней части каждой внешней гирлянды и над одной из периферийных гирлянд телескопа НТ-200. Источники света засвечивают оптические модули внешних гирлянд через систему пластиковых оптоволоконных кабелей одинаковой длины (~140 м).

Используются пластиковые оптоволоконные кабели Sercos-Cupoflex-LWL CL11Y-1V2Y1P 980/1000 200А производства фирмы Siemens с сердцевиной из полиметилметакрилата (ПММА) \varnothing 960 мкм и внешней оболочкой из фторированного ПММА толщиной ~20 мкм. Внешняя защитная оболочка выполнена из ПВХ. Для устойчивости к механическим рывкам и напряжениям защитная оболочка закрыта еще дополнительным слоем волокон из кевлара. На слой кевларовых волокон надета еще одна внешняя ПВХ-оболочка.

Все кабели объединены с одного конца в единую планшайбу, при этом торцы кабелей в планшайбе тщательно отполированы. Эта планшайба закрепляется в полюсе глубоководного модуля наносекундного источника света. Другие концы с установленными на них рассеивателями из ПММА закрепляются на металлических держателях на расстоянии ~50 см от оптических модулей гирлянды.

Из-за модовой и хроматической дисперсий длительность световых импульсов после прохождения оптоволоконных кабелей системы увеличивается до ~11.5 нс (п.ш.п.в.). Длина поглощения световых импульсов на длине волны 470 нм составляет ~26 м [14]. Амплитуда сигналов в оптических модулях гирлянд от световых импульсов источников света равна в среднем ~300–400 фотоэлектронов.

Модуль, закрепленный на центральной гирлянде, засвечивает оптические каналы НТ-200 через воду. Амплитуда сигналов от этой засветки в верхних оптических модулях телескопа, ориентированных фотокатодами вверх, превышает ~1000 фотоэлектронов. Точность временной привязки оптических модулей при таких амплитудах сигнала становится существенно лучше 1 нс [15]. Необходимо также учитывать то, что из-за постоянно изменяющегося гидростатического давления время задержки светового сигнала в пластиковом оптоволоконном кабеле, натянутом в воде на ~100 м в вертикальном направлении, увеличивается на ~0.7–0.8 нс [16].

Как уже упоминалось выше, все модули источников света запускаются из одного триггерного модуля, установленного на одной из внешних гирлянд. Запускающие импульсы от триггерного модуля направляются к модулям источников света по коаксиальным кабелям РК-50-2-11 с волно-

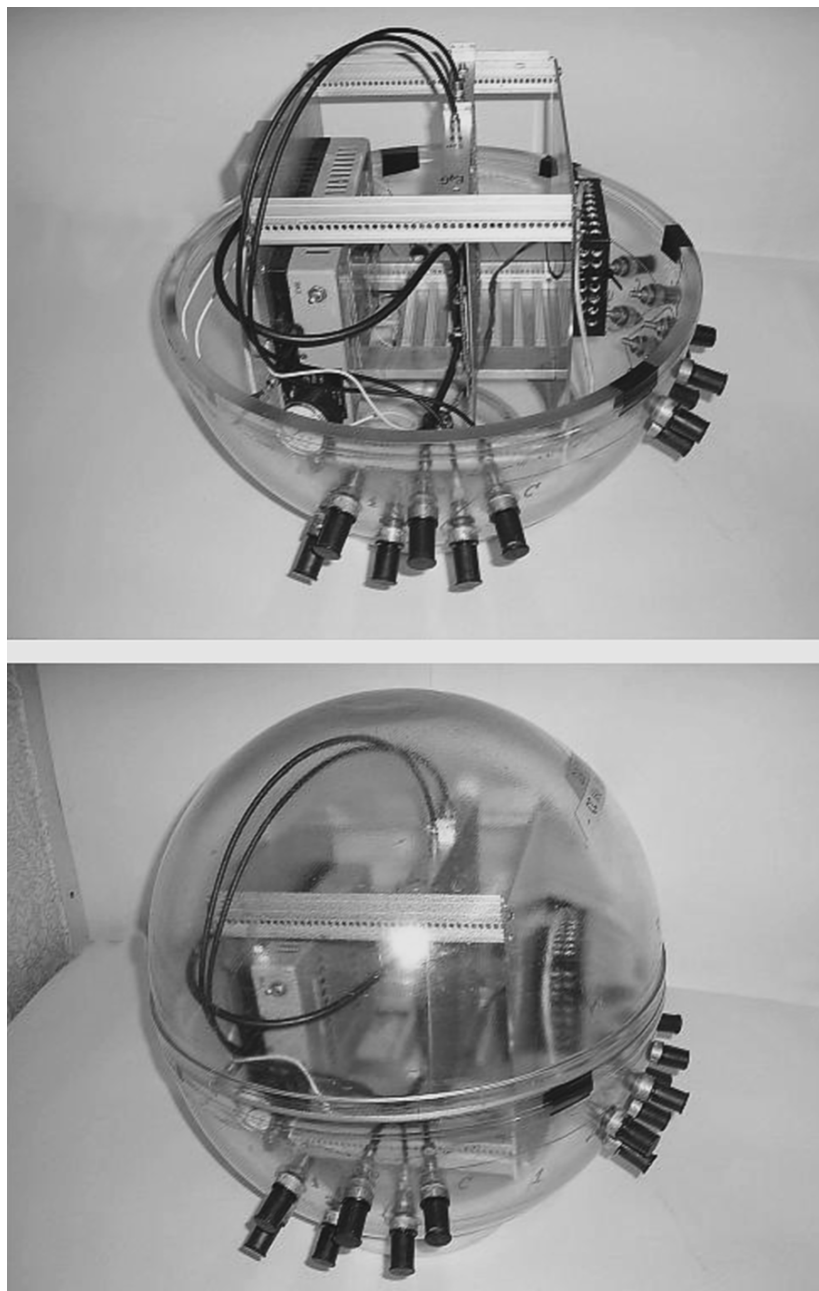


Рис. 8. Внешний вид глубоководного модуля наносекундного источника света нейтринного телескопа НТ-200+ в процессе его сборки.

вым сопротивлением 50 Ом и длиной 1200 м каждый. Управление триггерным модулем осуществляется из берегового центра.

Вид одного из глубоководных модулей наносекундных источников света, смонтированного на кабель-тросе одной из внешних гирлянд и полностью готового к окончательному погружению, показан на рис. 9. Основные части описанной калибровочной системы были тщательно протестированы в составе глубоководной экспериментальной гирлянды [17].

Таким образом, учет вкладов всех элементов системы в “размывание” точности синхронизации во времени позволяет сделать вывод о том, что разработанная светодиодная калибровочная система позволяет синхронизовать по времени работу внешних гирлянд с центральной частью глубоководного нейтринного телескопа НТ-200+ с точностью, по крайней мере, не хуже 1 нс. Следует отметить, что разработанный метод калибровки разнесенных гирлянд может быть использован не только в глубоководных нейтринных телескопах,



Рис. 9. Вид одного из глубоководных модулей наносекундных источников света, смонтированного на кабель-тросе одной из внешних гирлянд и полностью готового к окончательному погружению.

но и для калибровки оптических модулей в черенковских детекторах широких атмосферных ливней, таких как ТУНКА-133 [18, 19].

Авторы считают своим приятным долгом выразить свою искреннюю признательность В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи и многочисленные ценные обсуждения и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al.* // *Astroparticle Phys.* 1997. V. 7. P. 263.
2. *Balkanov V.A., Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B. et al.* // *Ядерная физика.* 2003. Т. 66. № 3. С. 530.
3. *Mikolajski T.* PhD Thesis. Humbolt University, Berlin. 1995.

4. *Вятчин Е.Э.* Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., ИЯИ РАН. 2006. 167 с.
5. *Lubsandorzhev B.K., Poleshuk R.V., Shaibonov B.A.M., Vyatchin Ye.E.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 602. P. 220.
6. *Lubsandorzhev B.K., Poleshuk R.V., Shaibonov B.A.M. et al.* // Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf. Merida Mexico, July 2007. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico City, Mexico, 2008. V. 5. P. 1581.
7. *Lubsandorzhev B.K., Pokhil P.G., Vasiliev R.V., P'yasov R.V.* // Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf. Hamburg, Germany, August 2001. V. 3. P. 1291.
8. *Lubsandorzhev B., Vyatchin Y.* // arXiv:0403018 [physics]. 2004.
9. *Becker W.* Advanced Time-Correlated Photon Counting Techniques. Dortmund: Springer, 2006.
10. *Lubsandorzhev B.K., Pokhil P.G., Vasiljev R.V., Wright A.G.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2000. V. 442. P. 452.
11. *Lubsandorzhev B.K., Vasiliev R.V., Vyatchin Y.E., Poleshuk R.V., Shaibonov B.A.M.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2006. V. 567. P. 12.
12. *Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гальперин М.Д. и др.* // Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 6. С. 1022.
13. *Похил П.Г.* Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., ИЯИ РАН. 2003. 167 с.
14. *Васильев Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Лубсандоржиев Н.Б. и др.* // ПТЭ. 2011. № 1. С. 118.
15. *Лубсандоржиев Б.К., Кузьмичев Л.А., Васильев Р.В.* // ПТЭ. 2003. № 2. С. 42.
16. *Васильев Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Streicher O.* // ПТЭ. 2003. № 1. С. 77.
17. *Васильев Р.В., Вятчин Е.Э., Лубсандоржиев Б.К. и др.* // ПТЭ. 2008. № 2. С. 21.
18. *Lubsandorzhev B.K.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2008. V. 595. P. 73.
19. *Antokhonov B.A., Besson D., Beregnev S.F. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2010. Doi:10.1016/j.nima.2010.09.142.