ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 80–86

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.123

ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ И ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА BAIKAL-GVD

© 2025 г. А. В. Аврорин[a], А. Д. Аврорин[a], В. М. Айнутдинов[a], В. А. Аллахвердян[b], З. Бардачова[c, k], И. А. Белолаптиков[b], Е. А. Бондарев[a], И. В. Борина[b], Н. М. Буднев[d], А. Р. Гафаров[d], К. В. Голубков[a], Н. С. Горшков[b], Т. И. Гресь[d], Р. Дворницки[c, k], Ж.-А. М. Джилкибаев[a], В. Я. Дик[b, e], Г. В. Домогацкий[a], А. А. Дорошенко[a], А. Н. Дячок[d], Т. В. Елжов[b], Д. Н. Заборов[a], С. И. Завьялов[b], Д. Ю. Звездов[b], В. К. Кебкал[f], К. Г. Кебкал[f], В. А. Кожин[g], М. М. Колбин[b], С. О. Колигаев[l], К. В. Конищев[b], А. В. Коробченко[b], А. П. Кошечкин[a], М. В. Круглов[b], В. Ф. Кулепов[h], А. А. Куликов[d], Ю. Е. Лемешев[d], Р. Р. Миргазов[d], Д. В. Наумов[b], А. С. Николаев[g], Д. П. Петухов[a,*], И. А. Перевалова[d], Е. Н. Плисковский[b], М. И. Розанов[i], Е. В. Рябов[d], Г. Б. Сафронов[a], А. Э. Сиренко[b], А. В. Скурихин[g], А. Г. Соловьев[b], М. Н. Сороковиков[b], А. П. Стромаков[a], О. В. Суворова[a], В. А. Таболенко[d], В. И. Третьяк[b], Б. Б. Ульзутуев[b], В. Н. Фомин[m], И. Харук[a], Е. В. Храмов[b], В. А. Чадымов, А. С.Чепурнов[g], Б. А. Шайбонов[b], Ф. Шимковиц[c, k], Е. В. Широков[g], В. Ю. Шишкин[g], И. Штекл[k], Э. Эцкерова[c,k], Ю.В. Яблокова[b]

[a] Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

[b] Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

[c] Университет им. Я.А. Коменского в Братиславе
Словакия, 81499, Братислава-1, Шафарикова пл., 6

[d] Иркутский государственный университет
Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

[e] Институт ядерной физики
Казахстан, 050032, Алма-Ата, ул. Ибрагимова, 1

[f] Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации (ЛАТЕНА)
Россия, 199106, Санкт-Петербург, ул. Детская, 5

[g] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

[h] Нижегородский государственный технический университет
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

[i] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3

[k] Чешский технический университет в Праге
Чешская Республика, 16000, Прага 6 – Дейвице, ул. Югославских партизан, 1580/3

[l] Лаборатория прикладных информационных технологий “Инфрад”
Россия, 141983, Дубна, Московская обл., ул. Программистов, 4

** e-mail: kurpas@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2024 г.
После доработки 26.01.2025 г.
Принята к публикации 13.02.2025 г.

Нейтринный телескоп нового поколения BAICAL-GVD находится в стадии развертывания в озере Байкал. Телескоп регистрирует черенковское излучение, возникающее в результате взаимодействия нейтрино с водной средой озера, с помощью пространственной структуры оптических модулей – фотодетекторов. Чтобы определить направление на источник нейтрино, необходимо знать координаты каждого модуля в момент регистрации события. В статье описывается конструкция, принцип работы инерциальной системы позиционирования, служащей для определения пространственного положения модулей в водной среде, представлены первые результаты ее функционирования.

DOI: 10.31857/S0032816225030129

1. ВВЕДЕНИЕ

BAICAL-GVD – это нейтринный телескоп нового поколения, который в настоящее время строится в озере Байкал. На данный момент это крупнейший детектор нейтрино в Северном полушарии, а его объем приближается к кубическому километру [1, 2]. Телескоп предназначен для измерения направления и энергии астрофизических нейтрино путем регистрации черенковского излучения вторичных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с водой Байкала.

BAIKAL-GVD состоит из отдельных светочувствительных элементов, называемых оптическими модулями (ОМ), которые располагаются в толще воды в виде упорядоченной пространственной решетки. Оптический модуль BAIKAL-GVD представляет собой фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с диаметром фотокатода 10 дюймов, размещенный (вместе с необходимой электроникой) в прозрачном сферическом корпусе. ОМ установлены на гибких кабель-тросах, натянутых между якорем и подповерхностными буями. На каждом кабеле установлено 3 секции по 12 ОМ – всего 36 ОМ с интервалом 15 м на глубинах от 1275 м до 750 м, которые составляют гирлянду. Восемь гирлянд (всего 288 ОМ) объединяются в кластер, состоящий из центральной гирлянды и семи периферийных гирлянд, размещенных в вершинах правильного семиугольника с радиусом 60 м (рис. 1).

Во время зимней экспедиции 2024 года начат монтаж 14-го кластера, сейчас общее число установленных оптических модулей составляет более 4000 (рис. 2).

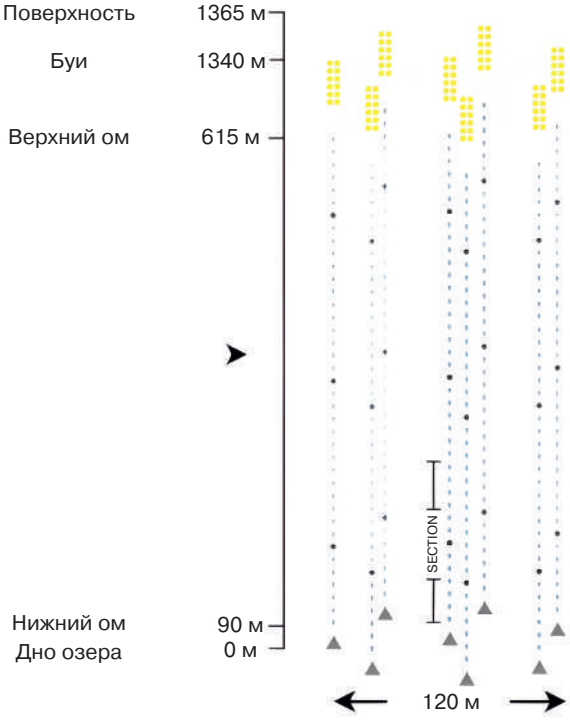

Рис. 1. Конфигурация кластера.

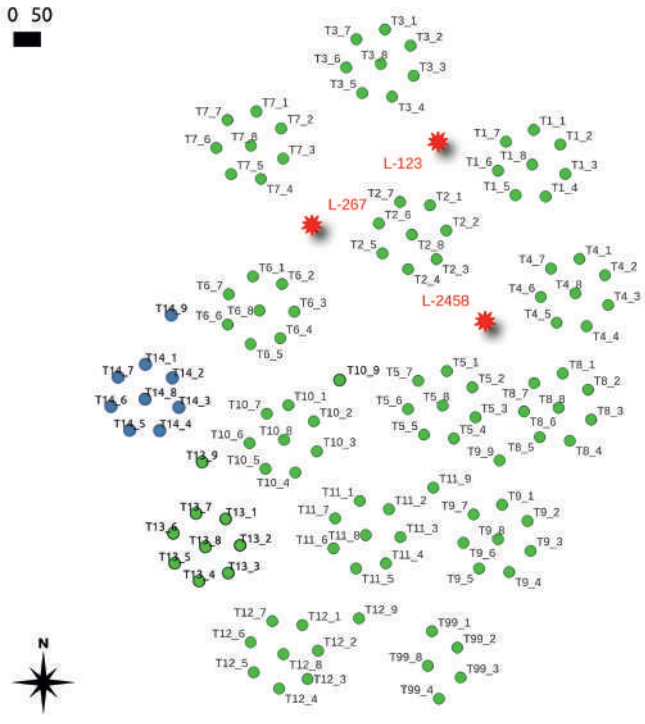

Рис. 2. Расположение кластеров.

2. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Знание местоположения ОМ имеет важнейшее значение для реконструкции параметров событий (взаимодействий нейтрино), так как реконструкция направления прихода нейтрино прямо зависит от координат ОМ, а значит, ошибки в координатах ОМ ведут к ухудшению точности реконструкции направления на источник нейтрино. Из-за течений в озере Байкал геометрия гирлянд меняется со временем, и отдельные ОМ могут отклоняться от своих первоначальных положений на десятки метров. Дополнительную погрешность вносит изменение пространственной ориентации ОМ относительно несущего кабеля. Для решения этих проблем были разработаны две системы пространственного позиционирования: гидроакустическая система позиционирования и инерциальная система позиционирования.

3. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Гидроакустическая система позиционирования (Acoustic Positioning System, APS) представляет собой массив акустических модемов (АМ), установленных вдоль гирлянд согласно разметке, как показано на рис. 3. На каждой гирлянде может быть установлено до четырех модемов. Модемы, установленные около оптических модулей, называются маяками, их приемо-излучатели направлены вниз. Некоторые гирлянды имеют модемы, установленные рядом с якорем – это “донные маяки”, их приемо-излучатели направлены вверх, а координаты предполагаются постоянными и определяются с поверхности вскоре после установки всех гирлянд кластера.

Модемы обмениваются друг с другом сообщениями с помощью специального протокола D-MAC, позволяющего определить акустические дальности между маяками (времена распространения сигнала) с разрешением 1 мкс.

Во время работы телескопа и сбора данных APS функционирует автономно. Маяки гирлянды последовательно опрашиваются с берега для определения акустических расстояний до “донных маяков”. Эти данные и координаты “донных маяков” используются для трилатерации – восстановления координат маяков с точностью до нескольких сантиметров. Затем координаты ОМ интерполируются из положений маяков в предположении кусочно-линейной модели гирлянды.

После установки каждого нового кластера в APS добавляется не менее 32 АМ, включая четыре “донных маяка”. Это приводит к увеличению интервала опроса всей установки, что, в свою очередь, повышает неопределенность позиционирования.

При средней скорости маяка 0.5 см/с он может сместиться более чем на 3 м от предыдущего измерения, прежде чем будет завершено новое измерение.

Акустическая система позиционирования позволяет оценить координаты маяков с достаточно высокой точностью [3–5], однако при восстановлении координат оптических модулей используется упрощенная модель и никак не учитывается их ориентация относительно несущего кабель-троса.

4. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Инерциальная система позиционирования (Inertial Positioning System, IPS) разработана для обеспечения возможности оценки пространственной ориентации и координат оптических модулей нейтринного телескопа по показаниям датчиков пространственной ориентации (ДПО), установленных на плате контроллера ОМ. В состав ДПО входит трехосевой акселерометр и трехосевой датчик магнитного поля.

5. КАЛИБРОВКА IPS

Все датчики проходят процедуру калибровки. Для этого используется специальный стенд в виде сферы большего радиуса (d = 810 мм, рис. 4), изготовленной из немагнитного матери-

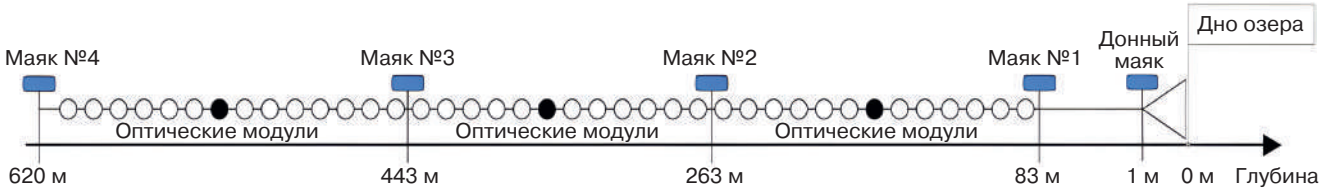

Рис. 3. Расположение акустических маяков на гирлянде.

Рис. 4. Стенд калибровки в сборе (слева), полусфера стенда с ОМ (справа).

ала и состоящей из двух половинок для возможности установки в нее полностью собранного ОМ. Большая сфера вращается во всех плоскостях с помощью всенаправленных колес, установленных на базовой платформе. Такой метод вращения в естественных геофизических полях позволяет совместить процесс калибровки сразу двух датчиков после окончательной сборки оптического модуля.

Для повышения точности и избавления от отдельных выбросов в значениях для каждой оси датчика ускорений и для каждой оси датчика магнитного поля проводится фильтрация данных на заранее заданном интервале времени и учет калибровочных коэффициентов.

При дальнейших расчетах осуществляется переход к угловой системе координат. Для определения углов ориентации оптического модуля относительно нормальной системы координат используются три угла: курс, крен, дифферент (рис. 5). Ориентация отдельной секции гирлянды в угловой системе задается двумя величинами – азимут и угол отклонения от вертикали (рис. 6).

6. ПРИВЯЗКА IPS

Для привязки показаний ДПО к показаниям акустической системы позиционирования используется математическая модель, в которой дополнительно заданы три неизвестных угла (крен, дифферент, курс) – это углы ориентации ДПО относительно точки крепления оптического модуля на тросе гирлянды. Наличие измерений по трем взаимосвязанным углам (соответствующим двум независимым угловым параметрам) позволяет компенсировать погрешности установки платы контроллера и платы

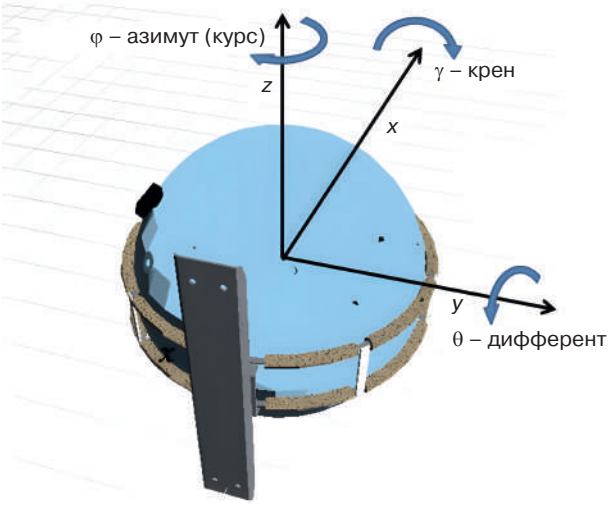

Рис. 5. Определение углов ориентации ОМ.

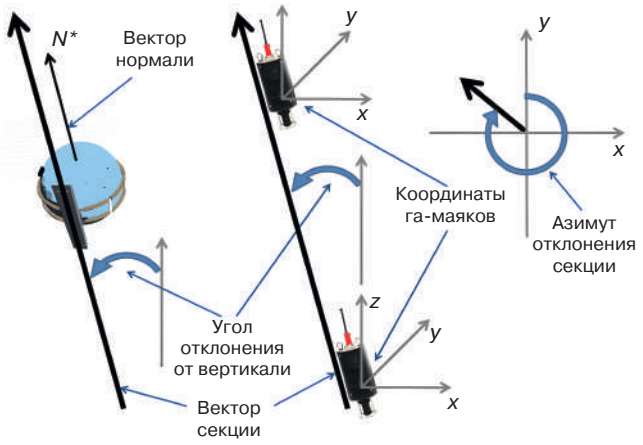

Рис. 6. Углы ориентации секции гирлянды.

ДПО внутри ОМ, погрешности установки ОМ в крепежной раме, погрешности установки рамы на кабеле гирлянды. Результат сравнения углов ориентации отдельной секции, полученных по APS и IPS после привязки, приведен на рис. 7. Результаты акустических измерений отображаются темным оттенком, тонкой линией с малым разбросом, но большим интервалом обновления. Данные инерциальной системы имеют больший статистический разброс, но меньший интервал обновления и отображаются более светлым графиком.

7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ

После привязки показаний ДПО оптических модулей к показаниям акустической системы инерциальная система может работать авто-

Рис. 7. Углы ориентации (отклонение от вертикали и азимут) секции по APS и IPS.

номно. Вектор нормали ОМ по ДПО принимается за вектор ориентации участка кабеля, длина вектора равна расстоянию между оптическими модулями на гирлянде (измеряется при постановке и составляет 15 м). Геометрия гирлянды и координата каждого ОМ рассчитывается от фиксированной координаты якоря последовательным суммированием векторов. Результат восстановления геометрии гирлянды инерциальной системой представлен на рис. 8. Геометрия отображена в плоскости наклона, отклонение гирлянды от вертикального положения в районе расположения верхнего оптического модуля достигает 40 м.

На рис. 9 схематично представлена “гидродинамическая модель” всей гирлянды в момент

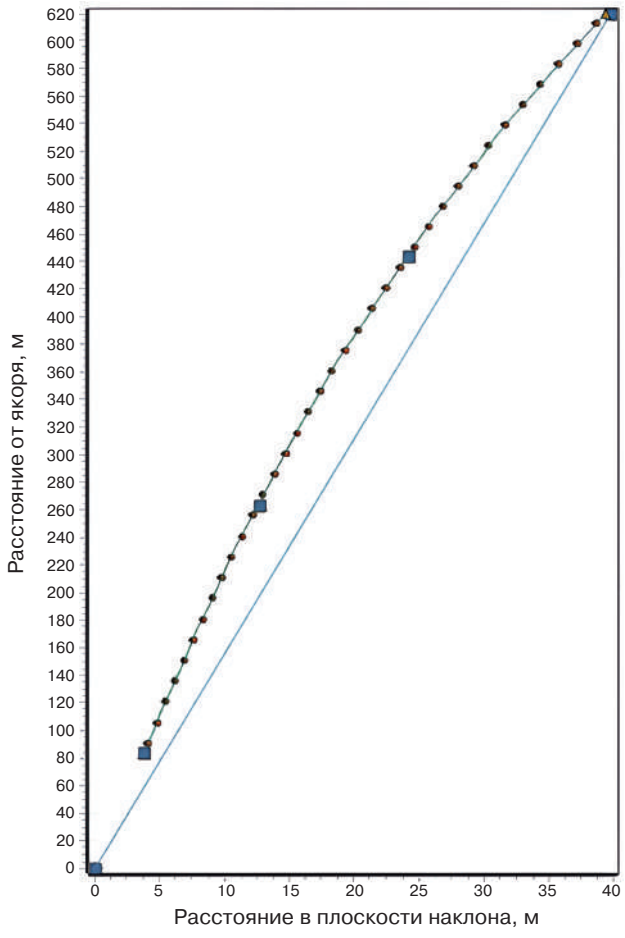

Рис. 8. Геометрия гирлянды, восстановленная по ДПО.

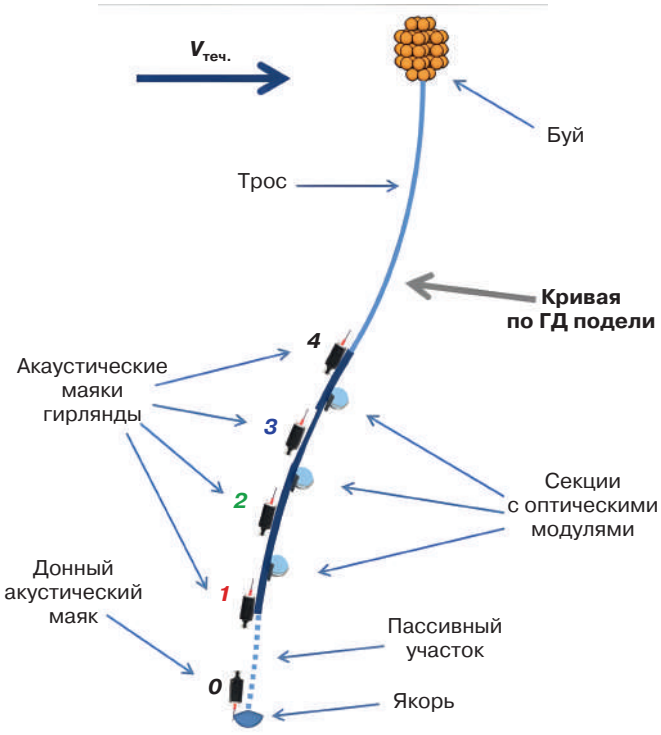

Рис. 9. Геометрия гирлянды в момент наклона, полученная по модели.

наклона. Модель учитывает массогабаритные характеристики всех элементов. На схеме присутствует участок с изгибом “вверх”, обусловленный положительной плавучестью, которой обладают оптические модули. В верхней части гирлянды изгиб “вниз” обусловлен отрицательной плавучестью троса.

8. АППРОКСИМАЦИЯ

Полученные в результате восстановления кусочно-линейным методом геометрии на примере данных 2017 года характеризуются тем, что отклонение оптических модулей от плоскости наклона мало́, это дает возможность провести

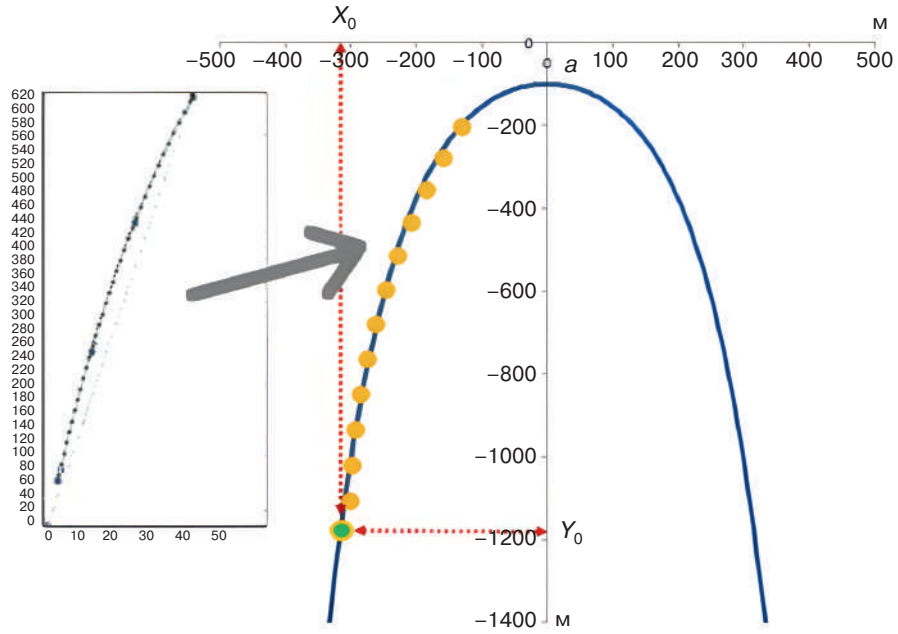

Рис. 10. Аппроксимация геометрии перевернутой цепной линией. Участок геометрии восстановленной по ДПО (слева), участок графика цепной линии (справа); X_0, Y_0 – начальные координаты для аппроксимации на кривой.

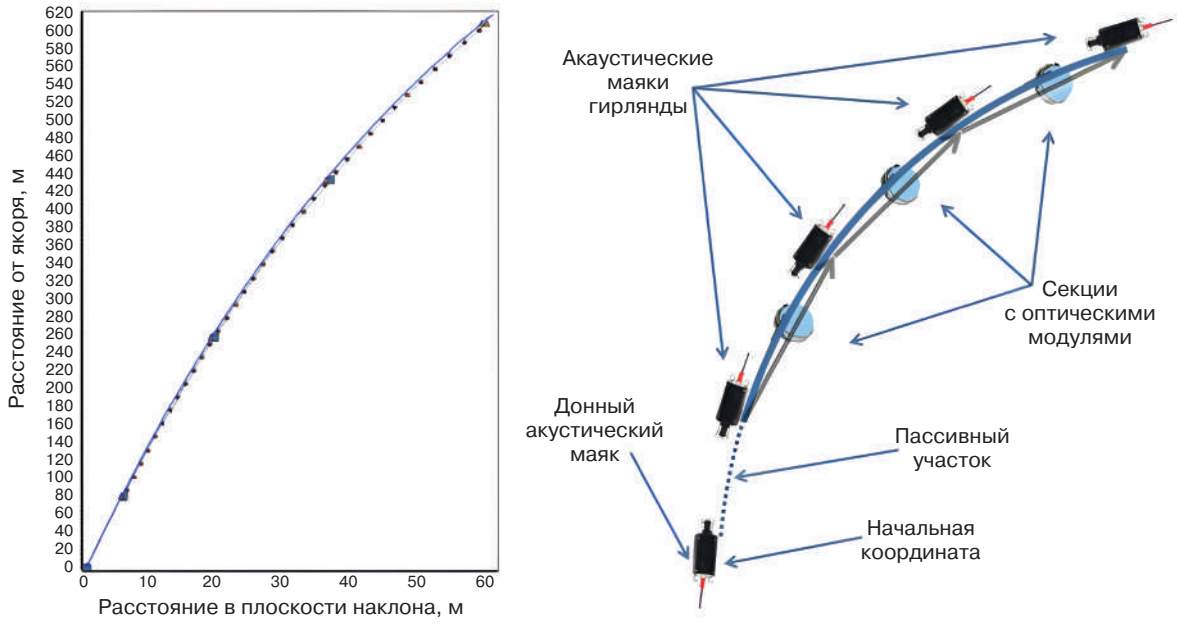

Рис. 11. Геометрия по ДПО и модельная кривая – синий график (слева), восстановление положения АМ и ОМ по модели (схема справа).

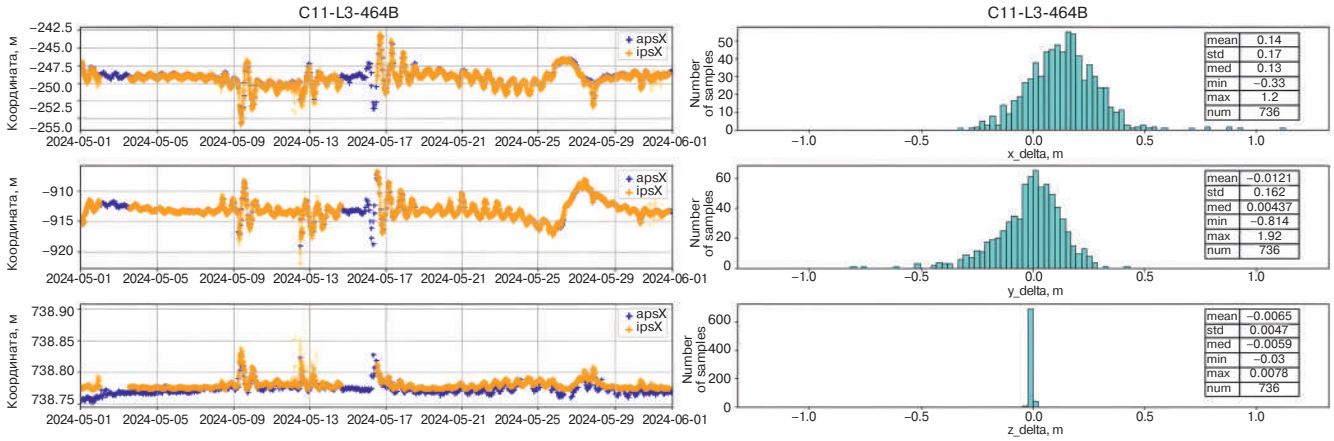

Рис. 12. Сравнение результата оценки координат по APS и IPS.

аппроксимацию координат гирлянды плоской кривой.

Анализ геометрий гирлянд подтвердил возможность аппроксимации геометрии различными математическими функциями (линейными, степенными, логарифмическими, полиномиальными), однако наиболее эффективной является аппроксимация уравнением цепной линии вида (рис. 10)

$$y = \frac{a}{2}\left(e^{\frac{x}{a}} + e^{\frac{-x}{a}}\right) = \operatorname{ach}\left(\frac{x}{a}\right).$$

Для расчетов был разработан алгоритм оценки параметров цепной линии, основанный на использовании углов наклона касательных в местах крепления оптических модулей к тросу. Координаты акустических маяков, как и других объектов на гирлянде, можно восстановить на модельной кривой, зная данные разметки при постановке (рис. 11).

Преимуществом алгоритма является принципиальная возможность оценки параметров аппроксимирующей функции с достаточной степенью точности по показаниям датчиков ориентации небольшого количества оптических модулей, вплоть до одного.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный алгоритм восстановления геометрии гирлянды и оценки координат и пространственной ориентации оптических модулей по показаниям датчиков пространственной ориентации после их привязки к показаниям акустической системы позиционирования. Результат сравнения по отдельным осям представлен на рис. 12. Слева отображены координаты, полученные от акустической системы (синие графики) и инерциальной системы (оранжевый график). Справа – распределения ошибок по каждой оси. Средняя дисперсия ошибки восстановления координат верхнего маяка гирлянды в плоскости *xy* не превышает 20 см.

Инерциальная система позиционирования показывает высокую точность восстановления геометрии гирлянды при возможности получения результата с интервалом времени 1–2 мин, что существенно меньше аналогичного интервала акустической системы позиционирования.

Работа выполнена при финансовой 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. Baikal-GVD. https://baikalgvd.jinr.ru
2. *Baikal-GVD Collaboration: Allakhverdyan V.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. P. 1600.
3. https://doi.org/10.1134/S1063778821090064
4. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al.* // PoS(ICRC2019)1012. 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.05529
5. *Riccobene G.* // EPJ Web of Conferences, EDP Sciences. 2019. V. 207. P. 07005. http: // doi.org/10.1051/epjconf/201920707005
6. *Колигаев С.О., Колигаев О.А.* // Геоинформатика. 2010. № 4. С. 23.