

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.53.083

### ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ПОДЗЕМНОЙ УСТАНОВКИ ОГРАН

© 2021 г. Ю. М. Гаврилюк<sup>a, b, \*</sup>, А. В. Гусев<sup>a</sup>, Н. Л. Квашнин<sup>c</sup>, А. А. Луговой<sup>c</sup>,  
С. И. Орешкин<sup>a</sup>, С. М. Попов<sup>a</sup>, В. Н. Руденко<sup>a</sup>, В. В. Семенов<sup>a</sup>, И. А. Сыроватский<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Государственный астрономический Институт им. Штернберга, Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Баксанская нейтринная обсерватория, Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

<sup>c</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

\*E-mail: sioresh@yahoo.com

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Исследуется модернизированный вариант комбинированного оптоакустического детектора гравитационных волн ОГРАН в режиме долговременного функционирования. Эта установка, расположенная в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, предназначена для работы по программе детектирования коллапсирующих звезд совместно с нейтринным детектором — Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом (БПСТ), что находится в рамках современной тенденции “многоканальной астрономии”. Режим непрерывных наблюдений предполагает стабильную работу установки при условии сохранения среднего фона окружающих возмущений, среди которых доминирующим фактором являются температурные вариации. В данной работе экспериментально исследованы эффекты тепловой релаксации ОГРАН при пассивной и активной системах термостабилизации в подземной лаборатории БНО ПК-14.

*Ключевые слова:* гравитационное излучение, гравитационные детекторы, многоканальная астрономия

DOI: 10.56304/S2079562921010012

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современный тренд “многоканальная астрономия” (МКА) подразумевает параллельное наблюдение внеземных релятивистских объектов по радиационным каналам различной физической природы: электромагнитному в широком частотном диапазоне, радиационному в виде космических потоков элементарных частиц, включая потоки нейтрино и, наконец, недавно открытому каналу гравитационно-волнового излучения.

Следует подчеркнуть, что за счет слабого рассеяния гравитационных волн (ГВ) и нейтрино МКА позволяет изучать астрофизические явления далекого космоса. Первым источником, от которого было зарегистрировано и гравитационное, и электромагнитное излучение (рентгеновский, гамма, оптический, инфракрасный диапазоны), — оказалось слияние двух нейтронных звезд на расстоянии около 40 Мпк от Земли (событие GW170817). Оно было зафиксировано гравитационными детекторами LIGO и VIRGO и одновременно спутниковыми аппаратами Fermi and Integral, регистрирующими гамма-всплески [1]. Спустя 10 часов в зоне локализации гамма-гравитационного

источника оптическими телескопами (включая сеть телескопов MASTER [2]) была обнаружена вспышка сверхновой в галактике NGC.

На текущий момент все зарегистрированные ГВ всплески были связаны с процессами слияния двойных релятивистских объектов, порождающих так называемые “чирп-сигналы”, форма которых теоретически хорошо известна. ГВ излучение, сопровождающее коллапсы массивных звезд не обладают подобной структурной универсальностью. Это усложняет возможность регистрации ГВ излучения от коллапсаров. В том числе и по этой причине их гравитационные сигналы до сих пор не обнаружены.

Стратегия МКА может увеличить вероятность такой регистрации с учетом того, что процесс коллапса должен сопровождаться нейтринным излучением [3]. В этой связи сформулирована совместная программа МГУ и институтов РАН по детектированию нейтринного и гравитационного излучения от объектов в нашей Галактике Млечный путь с использованием Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) и опто-акустической гравитационной антенной (ОГРАН),

размещенных в подземной лаборатории Баксанской Нейтринной Обсерватории ИЯИ РАН.

Гравитационная антенна ОГРАН использует комбинацию твердотельного и интерферометрического принципов детектирования ГВ [4, 5]. Центральным элементом антенны является массивная цилиндрическая болванка ( $M = 2000$  кг,  $L = 2$  м), выполненная из алюминиевого сплава, с центрально-осевым каналом, образующим полость оптического эталона Фабри–Перо (ФП), зеркала которого крепятся на торцах цилиндра при внешней лазерной накачке. Такая конструкция привносит два новых качественных фактора:

1) воздействие ГВ на две степени свободы, акустическую и оптическую, создает сложную структуру отклика, облегчая его фильтрацию;

2) оптическая система регистрации с малыми шумами позволяет без охлаждения достигнуть чувствительности типичной для криогенных антенн  $\sim 10^{-19}$  при полосе порядка  $\sim 10$  Гц. Чувствительность, однако, остается ограниченной уровнем  $10^{-20}$  теплового акустического шума детектора вне его резонансной области. В 2020 г. была выполнена существенная модернизация антенны ОГРАН, позволившая вывести эту установку в режим долгосрочных непрерывных измерений [6].

Нейтринный скинтилляционный телескоп БПСТ [7] расположен на эффективной глубине 850 м водного эквивалента. Установка состоит из 3184 скинтилляционных счетчиков, полная масса скинтиллятора составляет 330 т. Основной реакцией детектирования нейтрино является реакция обратного бета-распада:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ . При средней энергии антинейтрино  $E_{\nu} \sim 10$  МэВ, пробег позитрона, как правило, заключен в объеме одного счетчика. При этом сигнал регистрации выглядит как серия событий из одиночных срабатываний счетчиков (пороговая энергия счетчика 8 МэВ). За все время наблюдения на БПСТ по программе “поиск коллапсаров” (25 лет) не было зарегистрировано ни одного события превышающего стохастический фон счета. Оценка вероятности гравитационного коллапса в Галактике (на расстоянии 10 Кпс) или “частота события” только по нейтринному каналу” составила 0.074 в год.

С подключением данных гравитационно-волнового канала ожидается дальнейшее уточнение этой оценки вплоть до теоретически ожидаемой величины – частоты появления сверхновых в отдельной галактике  $\sim 0.01$  год $^{-1}$ . Сопутствующей прикладной задачей для планируемого двухканального поиска коллапсаров является построение статистического алгоритма совместной обработки данных БСПТ и ОГРАН [8] на основе данных о временной корреляции ГВ и нейтринных сигналов, полученных сопоставлением моделей коллапса [9–11].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований эффектов тепловой релаксации ОГРАН в режиме пассивной и активной термо-стабилизации установки при долговременном функционировании в условиях подземной лаборатории БНО ПК-14.

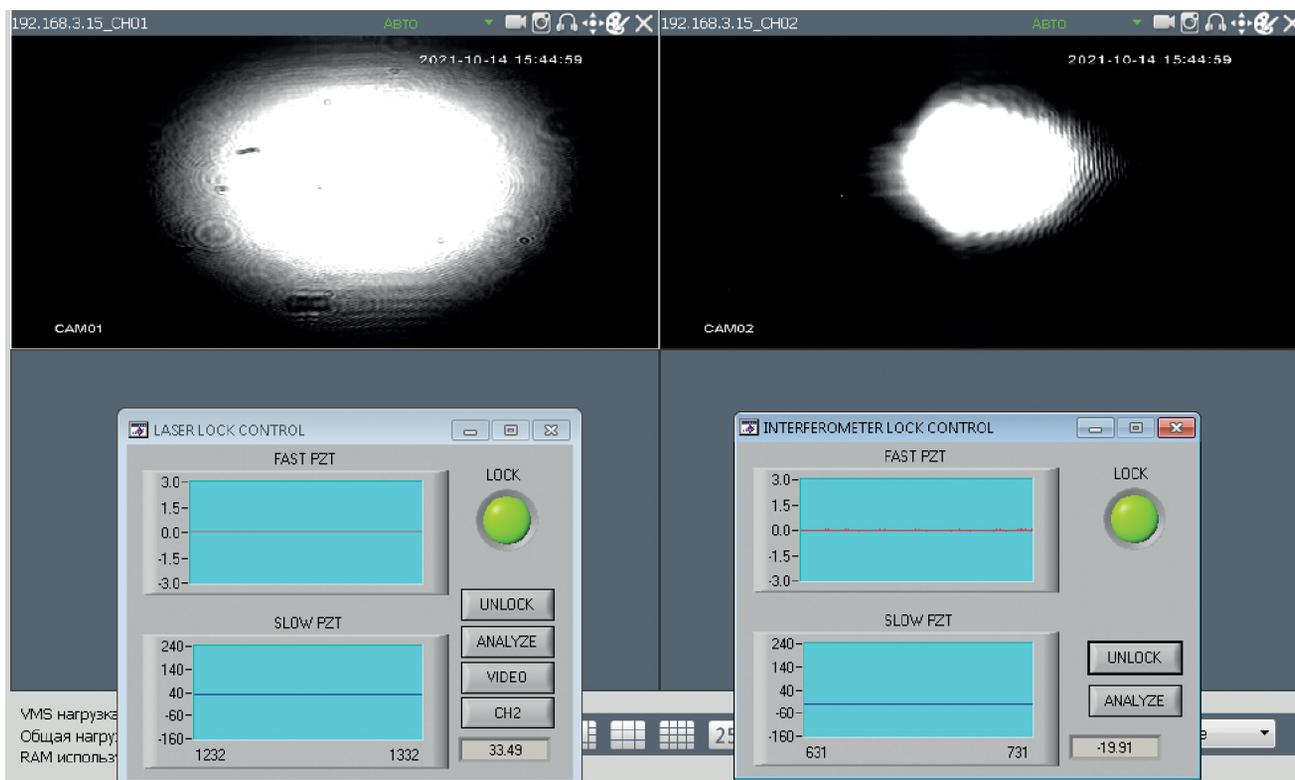
## 2. РЕЖИМ НЕПРЕРЫВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Текущее техническое состояние антенны ОГРАН позволяет обеспечить ее работу в режиме долгосрочных непрерывных наблюдений наземного фона гравитационного градиента в окрестности резонансной частоты 1326 Гц. В этом режиме антенна допускает дистанционное управление с помощью разработанного программного обеспечения, контролирующего исполнительные драйверы установки. Осуществляется активное отслеживание ее основных параметров, поиск оптических мод резонаторов ФП и автоматическое удержание рабочих режимов. Удаленный доступ к центральному компьютеру установки осуществляется посредством сети Интернет с использованием дополнительных локальных сетей БНО.

На текущий момент серьезных ограничений полосы пропускания канала управления не возникло. В полноэкранном режиме с выводом всех сигналов в виде динамически обновляющихся графиков и изображений оптических мод в обоих каналах, хватало пропускной способности 5–10 Мбит/с. Для удаленного оператора эффективность управления установкой зависит от времени распространения коммуникационных сигналов (параметр Round Trip Time (RTT)) по сети Интернет. При расположении центров управления в Москве или в Новосибирске оценка RTT  $\sim 50$ –100 мс, что удовлетворяет условиям комфортного управления (при отсутствии необходимости быстрой смены рабочих режимов установки).

Важной функцией системы автоматического управления является ее способность к восстановлению рабочего режима после его срыва в результате интенсивных внешних возмущений. Программное обеспечение данной функции разработано ранее [8]. Для полноценного автоматического режима требуется внесение изменений в систему съема сигналов фото детектирования ОГРАН. На текущий момент восстановление после срывов осуществляется оператором вручную.

В режим непрерывных наблюдений антенна ОГРАН была введена 1 марта 2021. Как отмечено выше, этому предшествовала модернизация, включающая замену фотодетекторов в обоих каналах, установку в каждом канале на выходе интерферометров ФП комбинированных устройств, состоящих из видеокамер для наблюдения формы оптической моды и фотодетекторов, регистрирующих интенсивность проходящего излучения. Эти эле-



**Рис. 1.** Вид окна контрольной панели, формируемого управляющей программой установки ОГРАН в режиме полного захвата рабочей точки.

менты необходимы для автоматического поиска оптимального положения рабочей точки и перевода установки в режим непрерывной службы.

На рис. 1 приведено изображение части окна (формируемого управляющей программой) с вводом изображения видеокамеры интерферометра ФП в основной канал акустического детектора, окном состояния основного канала и окном анализа поступающих данных второго канала (дискриминатора).

### 3. ПРОБЛЕМЫ РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В ходе наблюдений выявились важные аспекты, влияющие на долговременное стабильное удержание рабочего режима полного захвата в системе. Основным возмущающим фактором являются небольшие изменения температурного фона лабораторного помещения. Его небольшие вариации имеют место, несмотря на установленную систему контролируемого обогрева, включающую в себя устройство ПИД-регулирования (пропорционально интегрально-дифференциальный контроллер) с точностью подстройки 0.05 градуса в трех зонах размещения температурных датчиков (на входе в подземное лабораторное помещение, в самой лаборатории и непосредственно под ка-

мерой гравитационного детектора). Выяснилось, что даже тепловое излучение от тела оператора вблизи установки оказывает существенное влияние на рабочую точку установки. Стабильный температурный фон устанавливался в течение нескольких дней после посещения лаборатории обслуживающим персоналом. Очевидно, что знание характерных времен тепловой релаксации установки в целом и отдельных ее частей важно для обеспечения режима долговременных наблюдений.

Структурно антенна ОГРАН состоит из двух частей: плечо детектора и плечо дискриминатора. Оба содержат ФП интерферометры и объединены общим источником лазерной накачки (см схему в [4, 5]). Тепловые вариации длины твердотельного детектора меняют собственную частоту установленного на нем резонатора ФП. Системы обратной связи отслеживают эти изменения и управляют длиной волны источника излучения так, что частота накачки все время соответствует собственной частоте ФП. Изменение частоты происходит за счет подачи управляющего напряжения на пьезокерамический пакет, на котором закреплено одно из зеркал лазерного резонатора. Таким образом величина этого напряжения пропорциональна длине твердотельного детектора, т.е. дает информацию о его тепловом состоянии. Во втором плече резонатор ФП установлен на ци-

цилиндрической болванке меньшего размера, выполненной из ситалла, — материала с низкими коэффициентами теплопроводности и теплового расширения. Вариации частоты накачки, обусловленные вариациями длины резонатора ФП первого канала, как и сбой оптического ФП резонанса, здесь компенсируется напряжением обратной связи, приложенным к пьезопаке, на котором укреплено одно из ФП зеркал. Таким образом, это напряжение пропорционально эффективной оптической длине дискриминатора.

В обоих плечах для удержания рабочей точки на вершине оптического резонанса используется техника Паунда—Драйвера—Холла [12], для чего вводится дополнительная фазовая модуляция лазерного излучения на радиочастоте 10.7 МГц, для которой технические шумы лазера уже меньше пуассоновских при рабочих мощностях. Измеряя напряжение на пьезокерамике, управляющей частотой лазерного излучения и зная частотный интервал между боковыми компонентами модулированной накачки ( $2 \cdot 10.7 \text{ МГц} = 21.4 \text{ МГц}$ ), можно определить коэффициент преобразования управляющего напряжения в частоту лазерной накачки.

Диапазон перестройки в первом канале определяется диапазоном возможных напряжений на конечном высоковольтном усилителе, управляющим пьезокерамикой лазера и составляет примерно 430 В.

Для резонатора ФП твердотельного детектора длиной 2 метра интервал межмодового расстояния (FSR — Free Spectral Range) составляет  $\text{FSR} = c/2L = 75 \text{ МГц}$ . В диапазоне перестройки насчитывается 22–23 основных моды  $\text{TEM}_{00}$ , в зависимости от расположения начальной частоты, т.е. полный диапазон перестройки составляет 1725 МГц.

Во втором канале цепи обратной связи подстраивает длину опорного резонатора ФП под частоту лазера с помощью пьезокерамики под одним из зеркал резонатора. Для расстояния между зеркалами дискриминатора 45 см расстояние между модами  $\text{FSR} = 167 \text{ МГц}$ . Во всем диапазоне перестройки второго канала (430 В) видны только две основные моды, расстояние между которыми около 200 В. Следовательно, полный диапазон перестройки мод во втором канале составляет 335 МГц.

Для оценки того, как будут вести себя два резонатора Фабри-Перо (один на алюминиевой болванке длиной 2 м, второй на ситалловой длиной 45 см) нужно сравнить коэффициенты температуропроводности для этих двух материалов, от которых зависит распространение тепла внутри резонаторов при одинаковом изменении внешнего температурного фона. Температуропроводностью ( $\text{м}^2 \text{ с}^{-1}$ ) называют физическую величину, характе-

ризующую скорость выравнивания температуры среды в неравновесных тепловых процессах. Численно она равна отношению теплопроводности ( $\text{Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$ ) к удельной теплоемкости при постоянном давлении ( $\text{Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$ ) и плотности материала ( $\text{кг м}^{-3}$ ):

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

Расчеты показывают, что коэффициент температуропроводности для ситалла в 160 раз ниже, чем для алюминия. В таком случае следует ожидать, что при неизменном температурном фоне в окружающем помещении основной акустический детектор стабилизируется по температуре гораздо быстрее ситаллового дискриминатора. На рис. 2 представлен график зависимости напряжений на пьезокерамиках в обоих каналах от времени спустя две недели после запуска установок в режиме непрерывных наблюдений.

Из рис. 2 видно, что при уже стабилизированном на определенном уровне первом канале (нижняя кривая), второй канал продолжает медленно дрейфовать в одном направлении (в данном случае, соответствующем повышению температуры и, следовательно, удлинению резонатора). Всплески на нижней кривой соответствуют помехам от прохода обслуживающего электровоза по тоннелю. Кроме того, по уровню технических шумов хорошо различается дневное и ночное время.

Для качественной проверки времени установления стабильного температурного режима на работающей в полном захвате установке был проведен эксперимент по изучению влияния вариаций общего температурного фона на стабильность удержания захвата в обоих каналах.

Контролируемый обогрев помещения (температурная стабилизация) был выключен, после чего внешняя температура начала медленно падать (на отрезке в несколько дней) с  $25^\circ\text{C}$  до примерно  $22^\circ\text{C}$  — температуры, характерной для помещения ОГРН на расстоянии 1650 м от входа в тоннель в это время года.

Эксперимент показал, что такое изменение (на  $3^\circ\text{C}$ ) температурного фона является фатальным для системы удержания захвата в обоих каналах. Оказалось, что смещение рабочей точки многократно выходит за динамический диапазон регулировки управляющего напряжения. Каждый раз в конце этого диапазона происходит срыв слежения. Режим полного захвата приходится устанавливать заново с помощью оператора. На рис. 3 представлены графики зависимости напряжений на управляющих пьезокерамиках от времени в часах от момента отключения температурной стабилизации.

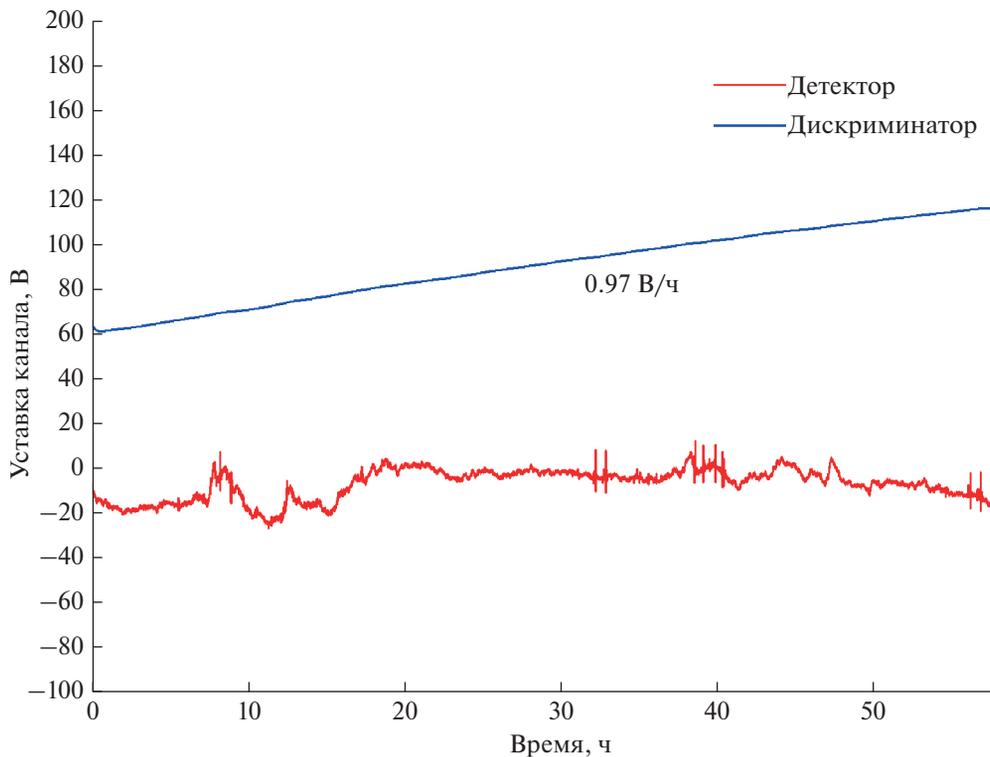


Рис. 2. Зависимость управляющих напряжений в обоих каналах установки ОГРАН от времени спустя две недели после введения режима службы.

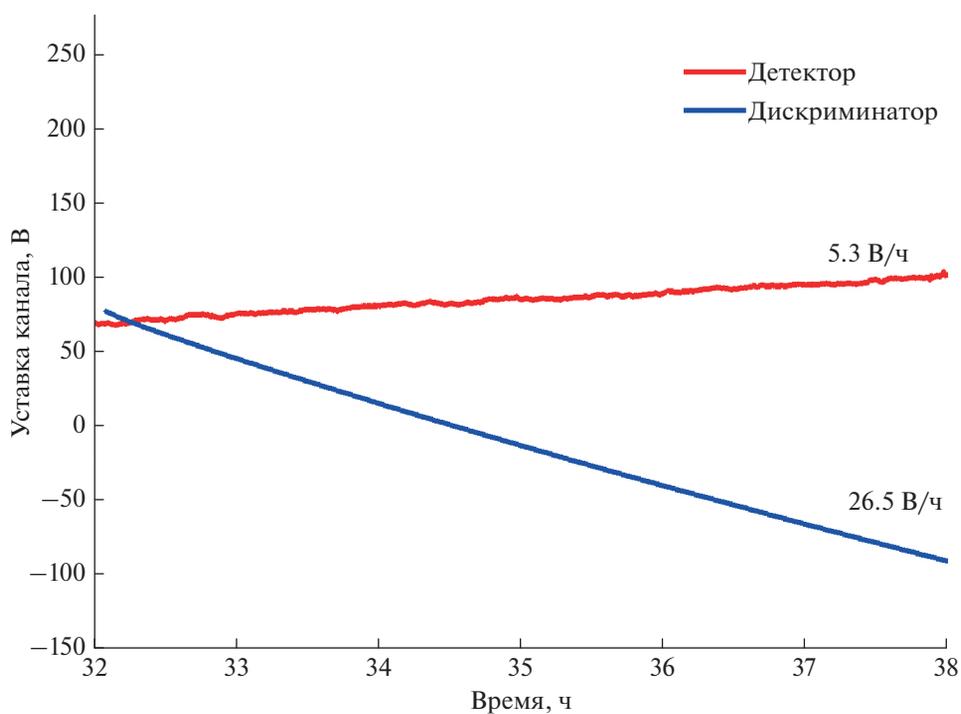


Рис. 3. Зависимость управляющих напряжений в обоих каналах установки ОГРАН от времени на вторые сутки после отключения температурной стабилизации – оба канала обратной связи монотонно меняют свое значение при сохранении состояния захвата.

Решение задачи об установлении температуры в теле обоих детекторов сводится к решению дифференциального уравнения в частных производных

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Здесь  $T$  – температура,  $\alpha$  – температуропроводность. В зависимости от выбора начальных и граничных условий решения различны, см, например, [13], однако, качественно время установления температуры можно оценить по показателю экспоненты в окончательном решении для стержня с изолированной боковой поверхностью и заданным теплообменом на концах. Длину стержня целесообразно принять равной расстоянию от боковой поверхности детектора до поверхности внутреннего канала. Такой выбор граничных условий обусловлен тем, что при достаточно высоком вакууме (когда длина свободного пробега становится больше расстояния от боковой стенки камеры до боковой поверхности детектора) теплообмен тела детектора с окружающей средой в основном определяется излучением от стенок камеры [14]. Характерное время установления температуры в такой модели

$$\tau \cong l^2 / \pi^2 \alpha.$$

Здесь  $l$  – расстояние от боковой поверхности детектора до центрального канала,  $\alpha$  – температуропроводность. Подставив значения для большого детектора  $l = 30$  см,  $\alpha = 8.4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с получим время установления температуры порядка двух минут. Для дискриминатора, выполненного из ситалла,  $l = 10$  см,  $\alpha = 5.3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с время установления температуры более получаса. Следовательно, можно сделать вывод о том, что большие времена установления теплового равновесия (рабочих точек) в обоих каналах (десятки и даже сотни часов) обусловлены, во-первых, очень малым теплообменом обоих детекторов с окружающей средой, а, во-вторых, низким коэффициентом температуропроводности ситалла. Теплообмен осуществляется в основном за счет излучения и теплопроводности остаточных газов. Методы расчета можно найти, например, в [14]. При достаточно высоком вакууме ( $\sim 10^{-5}$  торр), когда длина свободного пробега молекул остаточных газов значительно превышает расстояние от стенки камеры до внешней поверхности детектора, теплообмен остаточными газами становится пренебрежимо мал в сравнении с передачей тепла излучением. Поток излучения между двумя поверхностями, имеющими температуру  $T_2$  и  $T_1$  определяется как

$$\frac{dQ}{dt} = \epsilon_n \sigma A_1 (T_2^4 - T_1^4).$$

Здесь  $dQ = cm dT$  – изменение внутренней энергии при изменении температуры на  $dT$ ,  $c$  –

удельная теплоемкость материала детектора,  $m$  – масса детектора,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $A_1$  – площадь поверхности детектора,  $\epsilon_n$  – приведенная степень черноты. Решая обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка с граничным условием  $T = T_0$  при  $t = 0$ , получим время установления температуры

$$\tau = \frac{cm \left( \frac{1}{T^3} - \frac{1}{T_0^3} \right)}{3\epsilon_n \sigma A_1}.$$

Изменение температуры основного детектора массой  $m = 2000$  кг с площадью боковой поверхности 8.8 м<sup>2</sup> на один градус от 300 до 301 К составляет порядка 13 ч, если принять приведенную степень черноты равной 0.01.

Экспериментально было найдено, что время полной тепловой релаксации установки от включения подогрева помещений до достижения стабильного температурного режима составляет 700 ч (примерно один месяц). Такие времена обусловлены, по-видимому, гораздо более медленной релаксацией в опорном детекторе.

На стабильность удержания рабочей точки в режиме полного захвата может влиять также изменение показателя преломления вследствие ухудшения вакуума.

Для экспериментальной проверки этой гипотезы нами был проведен эксперимент по откачке камеры опорного резонатора с одновременным наблюдением сигналов удержания рабочих точек. Результаты представлены на рис. 4.

Полученные данные показывают, что рабочие точки в каждом канале смещались в одном направлении (в сторону повышения температуры) независимо от того, улучшался или ухудшался вакуум в камере опорного резонатора. Это обусловлено присутствием человека (оператора, производившего откачку) рядом с установкой. Действительно, процесс температурных изменений на рис. 4 начался с появлением в лаборатории ОГАН оператора примерно на 30 мин записи. Ход кривых развернулся вместе с отъездом оператора (на дежурном электропоезде на 220 мин, его всплески видны на красной кривой). Влияние вакуума все же слабо заметно в районе точки “Start rumping” в виде небольшой изрезанности кривой второго канала. Перескоки кривых обоих каналов в точках “open shiber” и “close shiber” связаны со срывом и переустановкой режима полного захвата вследствие механического воздействия на вакуумную камеру при открывании и закрывании задвижки shiber.

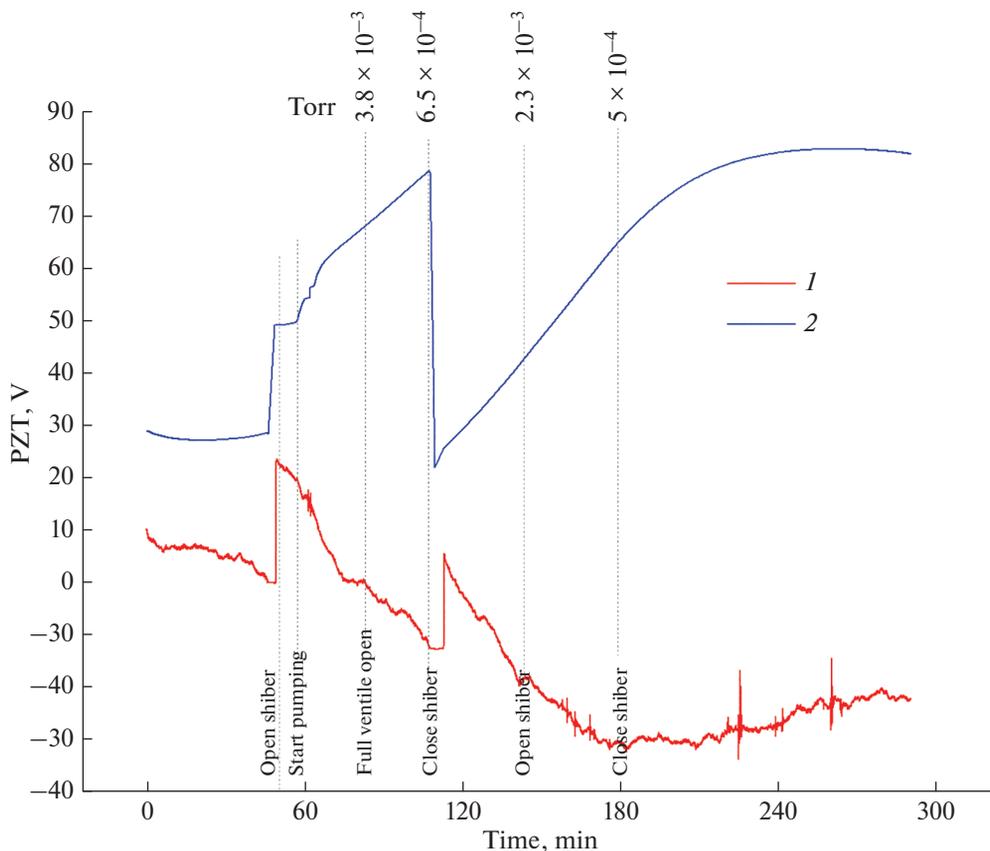


Рис. 4. Зависимость управляющих напряжений в обоих каналах установки ОГРАН от времени при изменении вакуума в камере опорного резонатора.

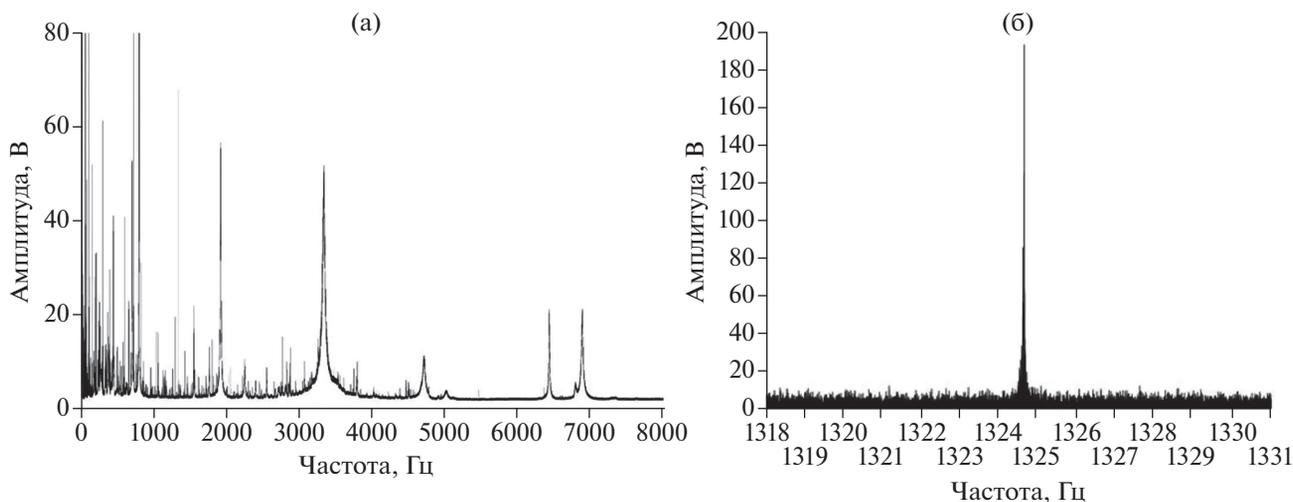
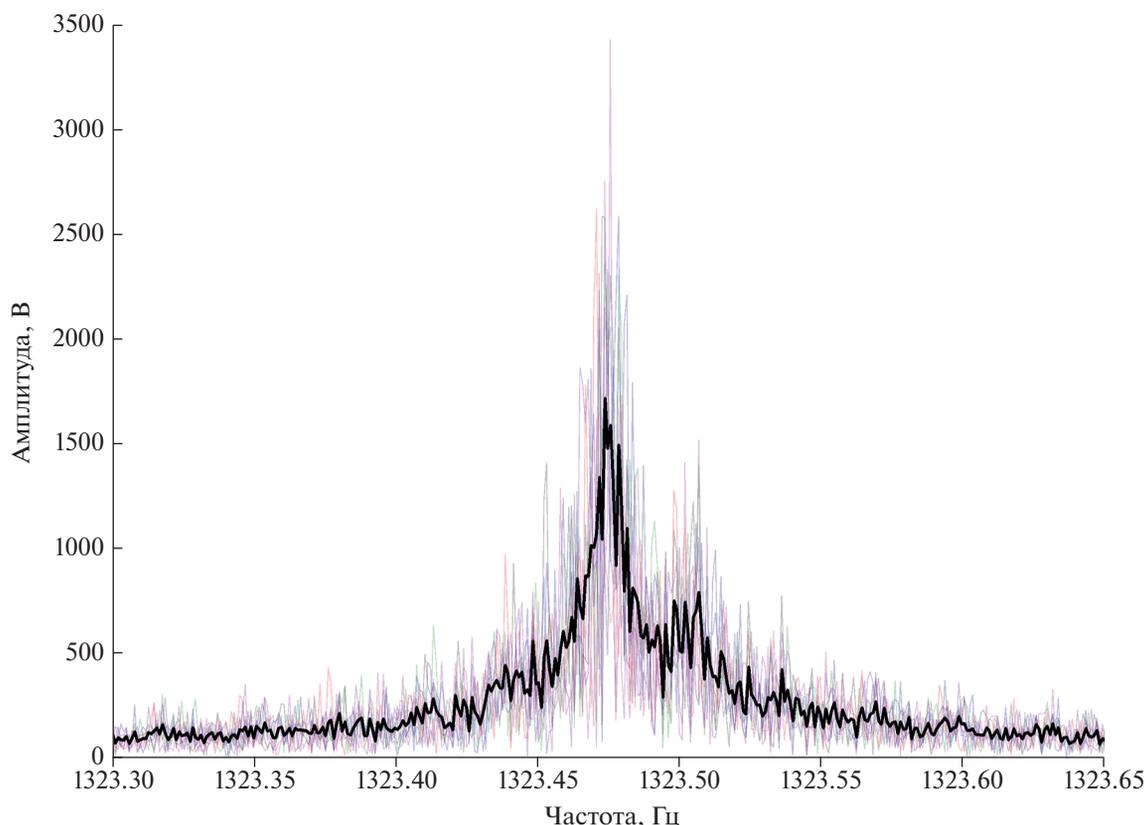


Рис. 5. Частотный спектр сигнала установки ОГРАН (а) и тепловой пик с высоким разрешением (б).

#### 4. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПИКА

Частотный спектр ОГРАН представлен на рис. 5а со спектральным разрешением 0.001 Гц. Резонансный пик ОГРАН на частоте 1324.6 Гц. Самый высокочастотный пик на частоте порядка

800 Гц соответствует колебаниям изгибной моды детектора — алюминиевой болванки, подвешенной горизонтально в стальной петле, охватывающей болванку в ее средней части. Низкочастотные пики в районе 2 и 3 кГц соответствуют частотам среза в петлях обратных связей. Резонансный пик



**Рис. 6.** Частотные спектры окрестностей теплового пика в непрерывных 1024 с интервалах измерений с выделением их суммарного спектра, нормированного на длину выборки.

с высоким разрешением показан на рис. 5б. Отношение сигнала к шуму в данном измерении порядка 30 (при лучшей настройке достигает 60). Ширина резонансного пика составляет 0.002 Гц. Для его качественного спектрального разрешения необходимо накапливать сигнал не менее 1000 с, при этом в спектре в полосу резонансного пика попадут три точки дискретизации.

Резонансный пик установки ОГАН является отражением тепловых (броуновских) флуктуаций акустического детектора (болванки). Спектральную плотность этого процесса можно было бы получить в результате измерений на большом (в идеале бесконечном) интервале времени. На практике каждая измеряемая реализация случайного процесса задана лишь на конечном интервале. Спектры таких усеченных реализаций, называемые периодограммами, являются случайными отражениями спектральной плотности [15]. Истинное значение спектральной плотности получается сложением (усреднением) многих периодограмм (или увеличением времени измерения). На рис. 6 приведены частотные спектры в окрестности теплового пика на последовательных временных интервалах (1024 с). Темным цветом вы-

делен суммарный спектр, усредненный по ансамблю и нормированный на длину выборки.

Положение теплового пика в стабилизированном тепловом режиме меняется от выборки к выборке случайным образом. На рис. 7 представлены результаты измерения центральной частоты теплового пика на последовательных 1024-секундных выборках.

Статистика измерения максимума теплового пика представлена на рис. 8. Гистограмма хорошо аппроксимируется гауссовой кривой.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка ОГАН запущена в режим долговременных непрерывных наблюдений. Первые эксперименты обнаружили первостепенную важность обеспечения стабильного теплового фона в прилегающих помещениях, а также незначительное влияние вариаций вакуума в камерах детектора и дискриминатора. Скорость релаксации температуры внутри обоих ФП резонаторов при изменении внешнего температурного фона составляет порядка 700 ч.

Спектральные измерения теплового пика показали, что для его качественного воспроизведе-

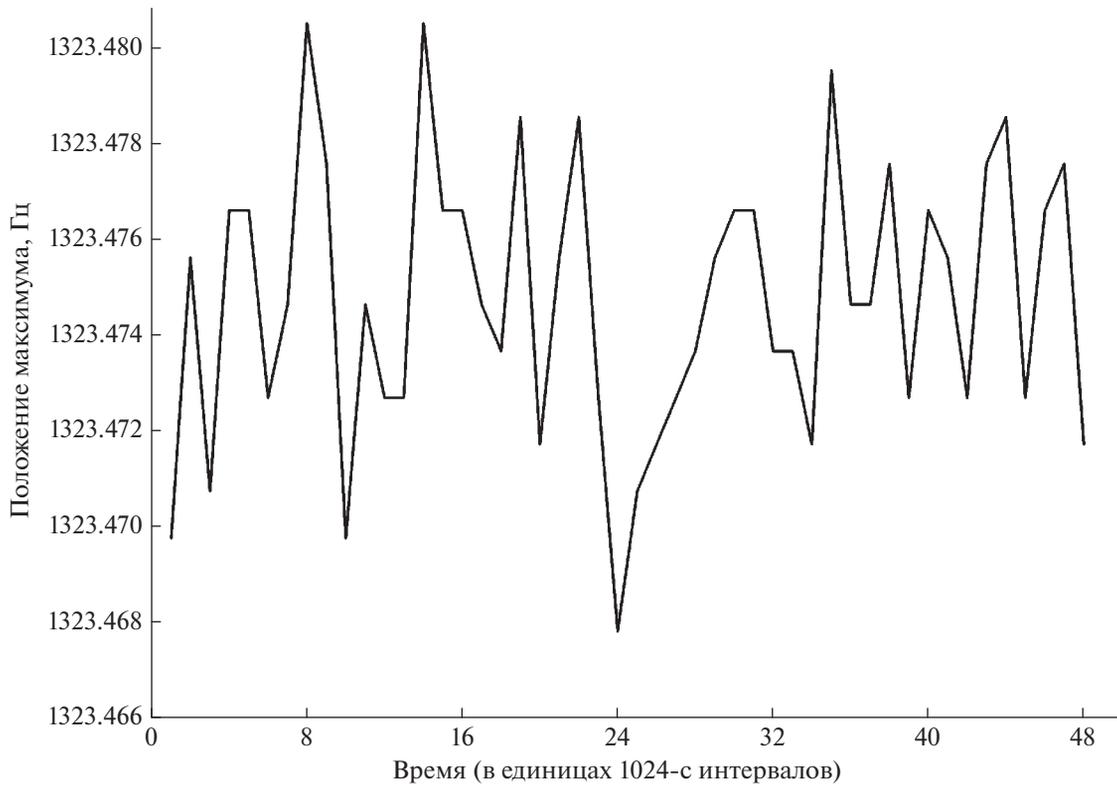


Рис. 7. Временной характер смещения максимума теплового пика на периодограммах в 14-часовом интервале измерений. Временное окно Фурье-спектра – 1024 с.

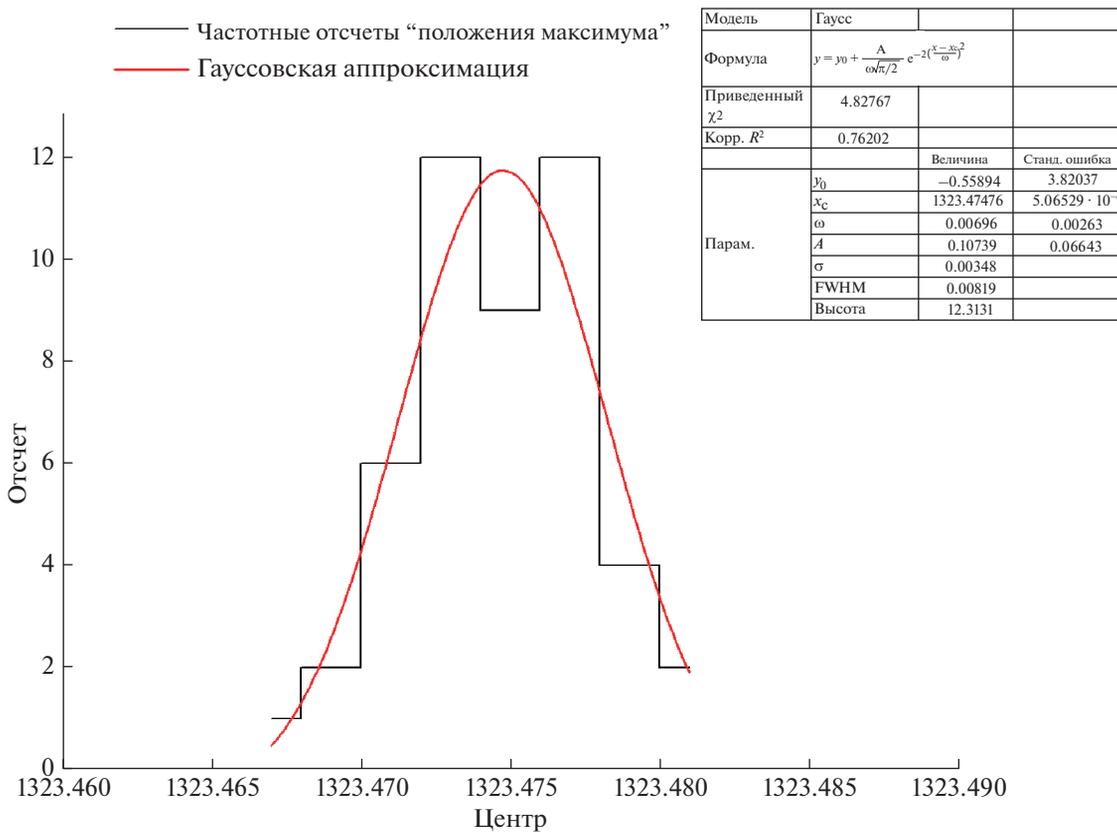


Рис. 8. Статистика смещений максимума теплового пика периодограмм в 14-часовом интервале измерений.

дения необходимо накапливать сигнал не менее 1000 с, чтобы в его полосу 0.002 Гц попало несколько точек оцифрованного спектра. Каждое отдельное измерение спектра подчиняется статистике случайных наблюдаемых. Увеличение длины выборки лишь улучшает качество отдельного спектра, но не влияет на истинное положение максимума теплового пика.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академиков С.Н. Багаева и А.М. Черепашука за внимание к работе.

Работа была поддержана грантом РФФИ 19-29-11010.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 161101.
2. *Lipunov V.M. et al.* // Astrophys. J. 2017. V. 850. P. L1.
3. *Mayle R., Wilson J.R., Schramm D.N.* // Astrophys J. 1987. V. 318. P. 288.
4. *Bagaev S.N., Bezrukov L.B., Kvashnin N.L. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 114.
5. *Rudenko V.N.* // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 830.
6. *Rudenko V.N., Kvashnin N.L., Lugovoi A.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. No. 12. P. 1682–1690.
7. *Novoseltsev Yu.F. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2017. V. 125. P. 73.
8. *Rudenko V.N., Gavrilyuk Yu.M., Gusev A.V. et al.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2020. V. 35. P. 2040007. <https://doi.org/10.1142/S0217751X20400072>
9. *Dimmelmeier H. et al.* // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. P. 064056.
10. *Melson T. et al.* // Astrophys. J. 2015. V. 808. P. L42.
11. *Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko S.G.* // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 843.
12. *Drever R.W.P. et al.* // Appl. Phys. 1983. V. 31. P. 97.
13. *Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н.* Сборник задач по математической физике. 1979. Москва: Наука.
14. *Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б.* Справочник по физико-техническим основам криогеники (под ред. Малкова М.П., 3-е изд., перераб. и доп.). 1985. Москва: Энергоатомиздат.
15. *Шахтарин Б.И., Ковригин В.А.* Методы спектрального оценивания случайных процессов. 2011. Москва: Горячая линия – Телеком.

## Measurements of Thermal Relaxation of the OGRAN Underground Setup

**Y. M. Gavrilyuk<sup>1, 2, \*</sup>, A. V. Gusev<sup>1</sup>, N. L. Kvashnin<sup>3</sup>, A. A. Lugovoy<sup>1</sup>,  
S. I. Oreshkin<sup>1</sup>, S. M. Popov<sup>1</sup>, V. N. Rudenko<sup>1</sup>, V. V. Semenov<sup>1</sup>, and I. A. Syrovatsky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Baksan Neutrino Observatory, Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Laser Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

\**e-mail: sioresh@yahoo.com*

Received November 2, 2021; revised December 23, 2021; accepted January 20, 2022

An upgraded version of the OGRAN—combined optical-acoustic gravitational wave detector has been investigated in a long-term operation mode. This installation, located at the Baksan Neutrino Observatory (BNO), INR RAS, is designed to work under the program for detecting collapsing stars in parallel with the neutrino detector—Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST). Such joint search corresponds to the modern trend for a development of “multichannel astronomy”. In this work the effects of thermal relaxation OGRAN are experimentally investigated using passive and active thermal stabilization systems in the underground laboratory BNO PK-14.

*Keywords:* gravitational wave, gravitational detectors, multi-message astronomy