

---

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

---

---

УДК 539.1.074.3

**МЮОННЫЙ ТЕЛЕСКОП  
НА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКАХ**

© 2021 г. С. К. Герасимова<sup>а,\*</sup>, П. Ю. Гололобов<sup>а,\*\*</sup>, В. Г. Григорьев<sup>а</sup>,  
А. С. Зверев<sup>а</sup>, С. А. Стародубцев<sup>а</sup>, А. Г. Егоров<sup>а</sup>, Н. И. Неустроев<sup>а</sup>, А. А. Михеев<sup>а</sup>,  
Е. Е. Сорокин<sup>а</sup>, А. Я. Кармадонов<sup>а</sup>, А. В. Пахмуллов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
Россия, 677027, Якутск, просп. Ленина, 31*

<sup>\*</sup>*e-mail: s\_k\_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru*

Поступила в редакцию 14.12.2020 г.

После доработки 08.02.2021 г.

Принята к публикации 10.02.2021 г.

Описан комплекс, состоящий из четырех современных сцинтилляционных мюонных телескопов, входящих в состав спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина в Якутске. Детекторы космических лучей этого типа размещены на поверхности Земли, а также в горизонтальных рассечках, специально вырытых в вечномёрзлых грунтах шахты на глубинах 7, 20 и 40 м водного эквивалента, и дополняют ранее созданные мюонные телескопы на газоразрядных счетчиках СГМ-14. Новые мюонные телескопы на сцинтилляционных счетчиках СЦ-301 имеют существенно большие площадь и точность регистрации мюонов атмосферного происхождения и позволяют регистрировать заряженные частицы, приходящие из 13-ти различных направлений. Приведено описание системы регистрации и передачи данных на сервер базы данных, расположенный на удалении от станции космических лучей “Якутск” и функционирующий под управлением системы PostgreSQL10 в режиме реального времени.

**DOI:** 10.31857/S0032816221040042

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Наземные измерения интенсивности космических лучей (к.л.) начались с 30-х годов прошлого столетия, а мировая сеть станций к.л., с помощью которой ведутся постоянные и непрерывные наблюдения, существует уже более 60-ти лет. Основное требование к установленным на них детекторам к.л. – стабильная и непрерывная работа в течение длительного периода времени. К другим требованиям относится статистическая точность измерений, определяемая эффективной площадью регистрации частиц и расположением детектора, а также угловая разрешающая способность детектора.

В настоящее время в мировую сеть входит около 50-ти станций к.л., которые в основном оснащены стандартными нейтронными мониторами типа NM-64. С 2007 г. в рамках международной программы “NMDB: Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements”, в которой на начальном этапе участвовали научные и образовательные организации 12-ти стран, данные регистрации большинства станций в цифровом и графическом виде стали доступны в сети

Интернет по адресу <http://www01.nmdb.eu>. Это позволило использовать их для оперативного анализа работы детекторов космического излучения на отдельных станциях и решения многих фундаментальных и прикладных задач в области астрофизики к.л.

Вместе с тем на некоторых станциях к.л. установлены детекторы другого типа – мюонные годоскопы и мюонные телескопы. Четыре станции, оснащенные мюонными телескопами, расположены в Японии, Австралии, Кувейте и Бразилии и объединены в глобальную сеть мюонных детекторов – Global Muon Detector Network (GMDN). Их данные находятся в свободном доступе в Интернет по адресу <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php>. Общее же число станций, на которых установлены мюонные детекторы, составляет около 10. Причем результаты измерений на некоторых из них до сих пор недоступны для стороннего пользователя.

Между тем мюонные телескопы значительно более информативны, чем нейтронные мониторы, поскольку они регистрируют частицы более высоких энергий, приходящие на детекторы из

большого числа направлений. В соответствие с этим и круг научных задач, решаемых на основе их измерений в области астрофизики к.л., значительно более широк. Поэтому каждый мюонный телескоп, данные которого доступны для научного анализа, имеет весьма большую ценность. Одним из таких приборов является уникальный и единственный в мире наземно-подземный комплекс мюонных телескопов на станции к.л. “Якутск”, входящий в состав спектрографа к.л. им. А.И. Кузьмина ИКФИА СО РАН.

## 2. ЯКУТСКИЙ СПЕКТРОГРАФ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ИМ. А.И. КУЗЬМИНА

Непрерывные наземные наблюдения к.л. в г. Якутске ведутся с конца 40-х годов прошлого столетия. В 1947 г. в Якутске была организована первая в Советском Союзе станция к.л. [1]. Первым прибором, установленным на ней для непрерывного измерения интенсивности мюонов, рожденных в атмосфере Земли при ее взаимодействии с потоком к.л. галактического и солнечного происхождения, являлась изготовленная в НИФИ-2 (ныне НИИЯФ МГУ) ионизационная камера С-2 с небольшим объемом (20 л). Именно этим прибором 19 ноября 1949 г. на станции “Якутск” впервые в Советском Союзе была зарегистрирована вспышка солнечных к.л. [2], известная в настоящее время как GLE4 (GLE – Ground Level Enhancement). Это четвертое из зарегистрированных с 1942 г. по настоящее время 72-х наземных возрастаний солнечных к.л.

Однако уже в 1952 г. на смену этому прибору пришел новый детектор мюонов, разработанный также в НИФИ-2 под руководством Ю.Г. Шафера и Н.Л. Григорова – прецизионный автоматический регистратор к.л., представляющий собой ионизационную камеру АСК-1 большого (950 л) объема [3]. Эта камера непрерывно в течение 54-х лет (с 1953 по 2007 гг.) в автоматическом режиме регистрировала интенсивность к.л. в г. Якутске. В 2020 г. в результате проведенных работ по переводу системы регистрации с фотопленки на цифровой вид с помощью современных ИТ-технологий работоспособность камеры АСК-1 была восстановлена, и она введена в режим непрерывной эксплуатации. Основная трудность восстановления ее работы была связана с весьма большим выходным сопротивлением ( $10^{16}$  Ом), что, в свою очередь, обусловило необходимость измерения и соответствующей калибровки весьма малых значений сигнала на выходе детектора.

В 1954 г. под руководством А.И. Кузьмина были разработаны мюонные телескопы (м.т.) на газоразрядных счетчиках СИ-5Г, которые в 70-х годах заменили на пропорциональные газоразрядные счетчики СГМ-14. Телескопы были установлены на

поверхности Земли и в специально вырытой шахте на уровнях 7, 20 и 60 м водного эквивалента (в.э.) и составили спектрограф к.л., способный регистрировать частицы с энергиями от 2 до 300 ГэВ, поступающие из пяти направлений: вертикаль, а также  $30^\circ$  и  $60^\circ$  к северу и югу от нее [1, 4].

В 1957 г. на станции к.л. “Якутск” установлен ламповый нейтронный монитор типа IGY, который в 1971 г. был заменен прибором на полупроводниках – нейтронным монитором типа 6-NM-64 на шести счетчиках СНМ-15, который работает и поныне, но уже на 24-х счетчиках.

В 2004 г. спектрограф к.л. в силу различных причин был перенесен на другое место, и теперь эти мюонные телескопы установлены на уровнях 0, 7, 20 и 40 м в.э. [4]. В настоящее время станция к.л. “Якутск” имеет следующие характеристики: географические координаты  $61.59^\circ$  с.ш.,  $129.41^\circ$  в.д., высота над уровнем моря 95 м, геомагнитный порог обрезания 1.3 ГВ, стандартное давление 1003 мбар.

В течение многолетней эксплуатации м.т. часто возникали технические проблемы, связанные с физическим устареванием счетчиков, электронных схем и комплектующих, а также с большими статическими помехами в условиях сухого климата центральной Якутии и зоны вечной мерзлоты. Также важно отметить высокую чувствительность приборов к изменениям влажности и температуры окружающей среды, особенно счетчиков, которые эксплуатируются в шахте в условиях вечномерзлых грунтов, где сохраняется стабильная отрицательная температура около  $-4^\circ\text{C}$  независимо от сезона года.

Специально проведенные в ИКФИА СО РАН исследования [5] показали, что указанный в паспорте пропорциональных газоразрядных счетчиков СГМ-14 температурный диапазон работы от  $-30$  до  $+40^\circ\text{C}$  не соответствует действительности, поскольку эксплуатация мюонных телескопов в режиме отрицательных температур в шахте приводит к значительному падению эффективности регистрации частиц. Это связано с фазовыми изменениями паров циклогексана, наполняющих счетчики СГМ-14, что приводит к смещению рабочего плато счетчиков на  $50 \text{ В}/^\circ\text{C}$  в область низких напряжений и их переходу в режим генерации большого числа ложных импульсов. А при температурах окружающей среды ниже  $-5^\circ\text{C}$  использование газоразрядных счетчиков СГМ-14 становится вообще невозможным.

Все эти факторы объективно привели к необходимости модернизации мюонных телескопов, которая заключалась в разработке и создании современных сцинтилляционных мюонных телескопов (с.м.т.) и в дополнении ими всего комплекса детекторов. Весьма существенным является то обстоятельство, что значительно упрощается техни-

ческое обслуживание нового оборудования, повышается информативность и стабильность работы телескопов. Важным фактором является также независимость работы сцинтилляционных телескопов от колебаний температуры (согласно паспорту, рабочий диапазон температур сцинтилляционного счетчика составляет от  $-20$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ) и влажности окружающей среды, что является определяющим обстоятельством для размещения телескопов в шахте в условиях вечной мерзлоты.

### 3. КОНСТРУКЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МЮОННОГО ТЕЛЕСКОПА

Входящий в состав якутского спектрографа к.л. им. А.И. Кузмина с.м.т. состоит из двух слоев литевых полистирольных сцинтилляторов СЦ-301 толщиной 30 мм и эффективной площадью регистрации  $1 \text{ м}^2$ , разделенных зазором в 1 мм (рис. 1). Линейные размеры конструкции телескопа составляют  $4740 \times 2440 \times 2150$  мм, общая масса – около 1000 кг. Выбор таких линейных размеров конструкции обусловлен ограниченными размерами штреков шахты и необходимостью сохранить старые телескопы м.т. В результате удалось в открытом пространстве под нижним слоем счетчиков с.м.т. на уровнях 7, 20 и 40 м в.э. разместить старые телескопы. При этом новый наземный с.м.т. (уровень регистрации 0 м в.э.), для удобства обслуживания, имеет меньшую высоту и размещен отдельно от старого м.т.

Каждый слой с.м.т. состоит из восьми сцинтилляционных счетчиков СЦ-301 со встроенными малогабаритными фотоумножителями ФЭУ-115М. Эффективная площадь регистрации одного слоя с.м.т. составляет  $8 \text{ м}^2$ . В табл. 1 приведены основные параметры и характеристики сцинтилляционного счетчика СЦ-301. Необходимо отметить, что в конструкции с.м.т. используются счетчики производства ФГБУ “Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова” Национального исследовательского центра “Курчатowski институт” (г. Протвино, Московская область) [6].

Светосбор с пластин сцинтилляторов осуществляется переизлучающими волокнами. Повышение в этом случае светосбора по сравнению с традиционным методом (непосредственно на

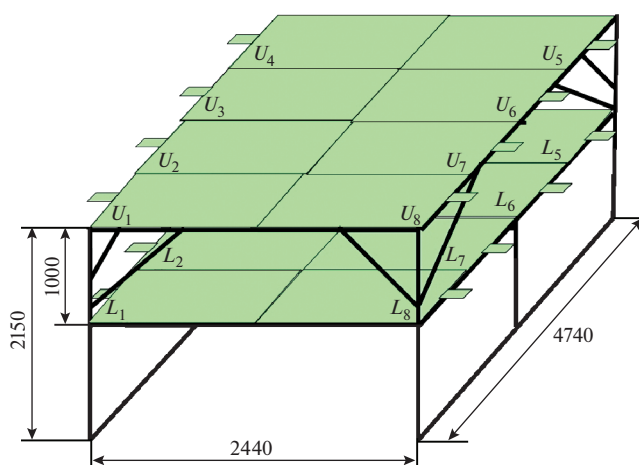


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции с.м.т.  $U_1-U_8$  – счетчики верхнего слоя;  $L_1-L_8$  – счетчики нижнего слоя.

фотоприемник) [6] позволяет использовать усилители с меньшим коэффициентом усиления и иметь более стабильный детектор. В счетчиках СЦ-301 для съема информации с литевых полистирольных сцинтилляторов используются спектросмещающие волокна марки VCF-91A с двойной оболочкой диаметром 1 мм и малогабаритный ФЭУ-115М. Свободные концы спектросмещающих волокон собраны в жгут (сборку) и вклеены в специальную втулку, закрепленную на общем с пластинами основании. Каждый счетчик состоит из регистрирующей части, фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.), умножителя напряжения для питания ф.э.у. и электроники. Сам ф.э.у., умножитель напряжения для него и необходимая электроника объединены в один оптоэлектронный блок. Характеристики ФЭУ-115М представлены в табл. 2.

Для минимизации уровня различных помех, особенно статического электричества, обусловленного сухим (особенно в зимний период) климатом центральной Якутии, специально для всего комплекса детекторов, помимо защитного, построено предусмотренное конструкцией инструментальное заземление. Для этого до ближайшего небольшого озера глубиной до 1.5 м, расположенного на расстоянии около 50 м от станции к.л., проложе-

Таблица 1. Параметры и характеристики сцинтилляционного счетчика СЦ-301

Размер (длина × ширина × толщина), мм	1240 × 1060 × 44
Чувствительная область (длина × ширина × толщина), мм	1000 × 1000 × 30
Световыход к антрацену, %	60
Максимум люминесценции, нм	420
Время высвечивания, нс	2.3
Масса, кг	60

**Таблица 2.** Технические характеристики ФЭУ-115М

Рабочий диаметр фотокатода, мм	25
Площадь фотокатода, см <sup>2</sup>	4.7
Длительность сигнала на уровне 0.1 амплитуды, нс	18
Длительность нарастания импульса на аноде, нс	9
Отклонения сигнала от линейности при амплитуде 0.5 В, %	1.5
Чувствительность фотокатода при длине волны света 500 нм, мА/Вт	50–65
Неравномерность чувствительности фотокатода, %	8
Коэффициент усиления	$3.5 \cdot 10^5$
Рабочее напряжение, В	1700–1900
Диаметр стеклянной колбы, мм	31
Рабочая область фотокатода, мм	25
Длина ф.э.у., мм	105

на шина сечением  $40 \times 4$  мм<sup>2</sup>, прочно приваренная к металлическому листу из высокоуглеродистой стали толщиной 5 мм и площадью 4 м<sup>2</sup>.

Неоднократно проведенные в октябре месяце (период наибольшей оттайки вечномерзлого грунта) в окрестности станции независимые измерения показали, что сопротивление инструментального заземления не превышает 4 Ом. Примечательно, что качественное инструментальное заземление сохраняется даже зимой при температуре наружного воздуха ниже  $-50^\circ\text{C}$ , когда озеро промерзает до дна. Контрольное бурение льда показало, что на дне озера, даже в самый холодный период времени (январь), грунт не замерзает, что позволяет растечься току в стороны от металлического листа шины заземления.

Кроме того, на станции к.л. весь пол покрыт специальным антистатическим линолеумом с тонкой медной сеткой на обратной стороне, который также заземлен на описанную выше шину. Таким образом, на станции к.л. удалось полностью избавиться от сбоев данных при регистрации их спектрографом к.л., обусловленных высоким статическим напряжением в здании, которые часто наблюдались ранее.

#### 4. ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СОВПАДЕНИЙ

При заданной конструкции с.м.т. с электронной схемой, основанной на двойных совпадениях, телескоп способен регистрировать частицы, приходящие на него из 13-ти направлений. При этом логическая схема совпадений, согласно конструкции, представленной на рис. 1, выглядит следующим образом:

$$V = (U_1 \times L_1) + (U_2 \times L_2) + (U_3 \times L_3) + (U_4 \times L_4) + (U_8 \times L_8) + (U_7 \times L_7) + (U_6 \times L_6) + (U_5 \times L_5);$$

$$N50 = (U_1 \times L_2) + (U_2 \times L_3) + (U_3 \times L_4) + (U_8 \times L_7) + (U_7 \times L_6) + (U_6 \times L_5);$$

$$S50 = (U_2 \times L_1) + (U_3 \times L_2) + (U_4 \times L_3) + (U_7 \times L_8) + (U_6 \times L_7) + (U_5 \times L_6);$$

$$E50 = (U_1 \times L_8) + (U_2 \times L_7) + (U_3 \times L_6) + (U_4 \times L_5);$$

$$W50 = (U_8 \times L_1) + (U_7 \times L_2) + (U_6 \times L_3) + (U_5 \times L_4);$$

$$N67 = (U_1 \times L_3) + (U_2 \times L_4) + (U_8 \times L_6) + (U_7 \times L_5);$$

$$S67 = (U_3 \times L_1) + (U_4 \times L_2) + (U_6 \times L_8) + (U_5 \times L_7);$$

$$N74 = (U_1 \times L_4) + (U_8 \times L_5);$$

$$S74 = (U_4 \times L_1) + (U_5 \times L_8);$$

$$NE59 = (U_7 \times L_1) + (U_6 \times L_2) + (U_5 \times L_3);$$

$$NW59 = (U_8 \times L_2) + (U_7 \times L_3) + (U_6 \times L_4);$$

$$SE59 = (U_2 \times L_8) + (U_3 \times L_7) + (U_4 \times L_6);$$

$$SW59 = (U_5 \times L_3) + (U_6 \times L_2) + (U_7 \times L_1).$$

Здесь знаком “ $\times$ ” обозначено логическое умножение, а знаком “+” — логическое сложение; символом  $L$  обозначены счетчики нижнего слоя, а символом  $U$  — верхнего;  $V$  — направление вертикаль (зенит);  $N$ ,  $S$ ,  $E$  и  $W$  — общепринятые обозначения сторон света; цифры рядом — углы в градусах, отчитываемые от направления вертикаль.

#### 5. ПРИЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА

Для использования данных регистрации с.м.т. необходимо знание приемных характеристик — так называемых приемных векторов [7], которые определяют связь между наблюдаемой детектором интенсивностью к.л. и первичным излучением в межпланетной среде. Без знания этих характеристик невозможно корректно проводить научный анализ данных измерений к.л.

Регистрируемые с.м.т. мюоны появляются в результате взаимодействия к.л. с атмосферой Земли и служат косвенным источником информации о первичных частицах. Поэтому расчет приемных векторов ведется на основе общих представлений о взаимодействии к.л. с атмосферой Земли и их распространении в геомагнитном поле с учетом геометрии прибора. Ниже представлена методика расчета приемных векторов прибора на основе определения диаграмм направленности, коэффициентов связи и асимптотических углов попадания регистрируемых прибором частиц к.л. в геомагнитное поле. Также необходим выбор спектра исследуемых вариаций к.л. Знание приемных векторов прибора позволяет корректно определить угловое распределение к.л. в межпланетном пространстве.

Диаграммы направленности, коэффициенты связи, траектории к.л. и приемные вектора для всех четырех с.м.т. приведены на сайте <https://ysn.ru/smt/characteristics>.

### 5.1. Диаграммы направленности мюонного телескопа

Угловая зависимость распределения регистрируемой интенсивности к.л. определяется выражением [7]

$$I(\theta) = I_0 \cos^\gamma \theta,$$

где  $I_0$  – абсолютная интенсивность к.л. по вертикали,  $\gamma$  – показатель зенитного углового распределения к.л. [8, 9].

В этом случае темп счета  $J$  с.м.т. определяется как [7]

$$J = I_0 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} N(\theta, \varphi) d\theta d\varphi.$$

Здесь  $N(\theta, \varphi) = S(\theta, \varphi) \cos^{\gamma+1} \theta \sin \theta$  – диаграмма направленности телескопа, где  $S(\theta, \varphi)$  – площадь совпадений потока регистрируемых частиц в выбранном направлении в зависимости от азимутального ( $\varphi$ ) и зенитного ( $\theta$ ) углов их попадания на счетчики. При этом зависимость величины  $N(\theta, \varphi)$  от угла  $\varphi$  или  $\theta$  называется соответственно азимутальной либо зенитной диаграммой направленности телескопа.

На основе представленной выше логической схемы совпадений с.м.т. и с учетом ее геометрии рассчитаны зенитные и азимутальные диаграммы направленности (рис. 2). Для сопоставления расчетных и наблюдаемых данных необходимо задать параметры  $I_0$  и  $\gamma$ , которые на уровне моря составляют в среднем соответственно  $0.5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  [9, 10] и 2 [9].

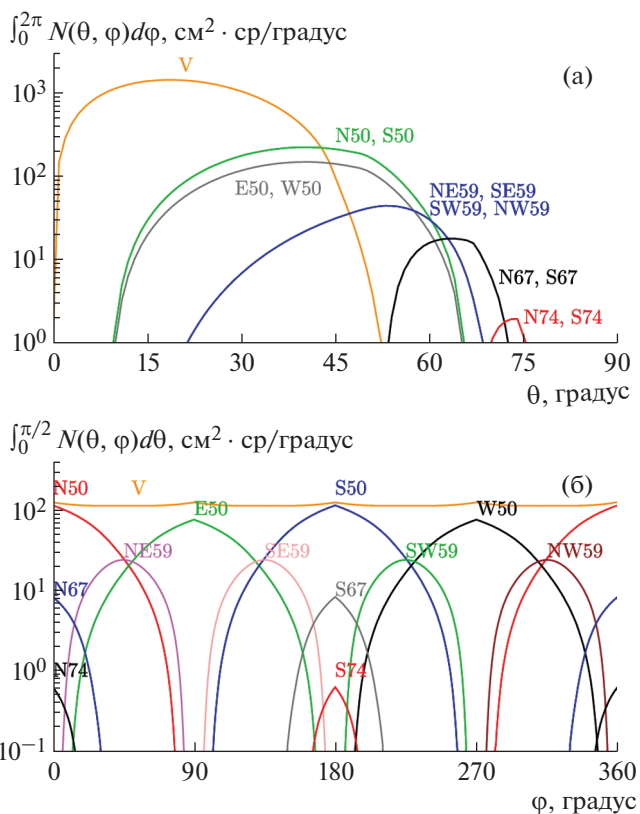
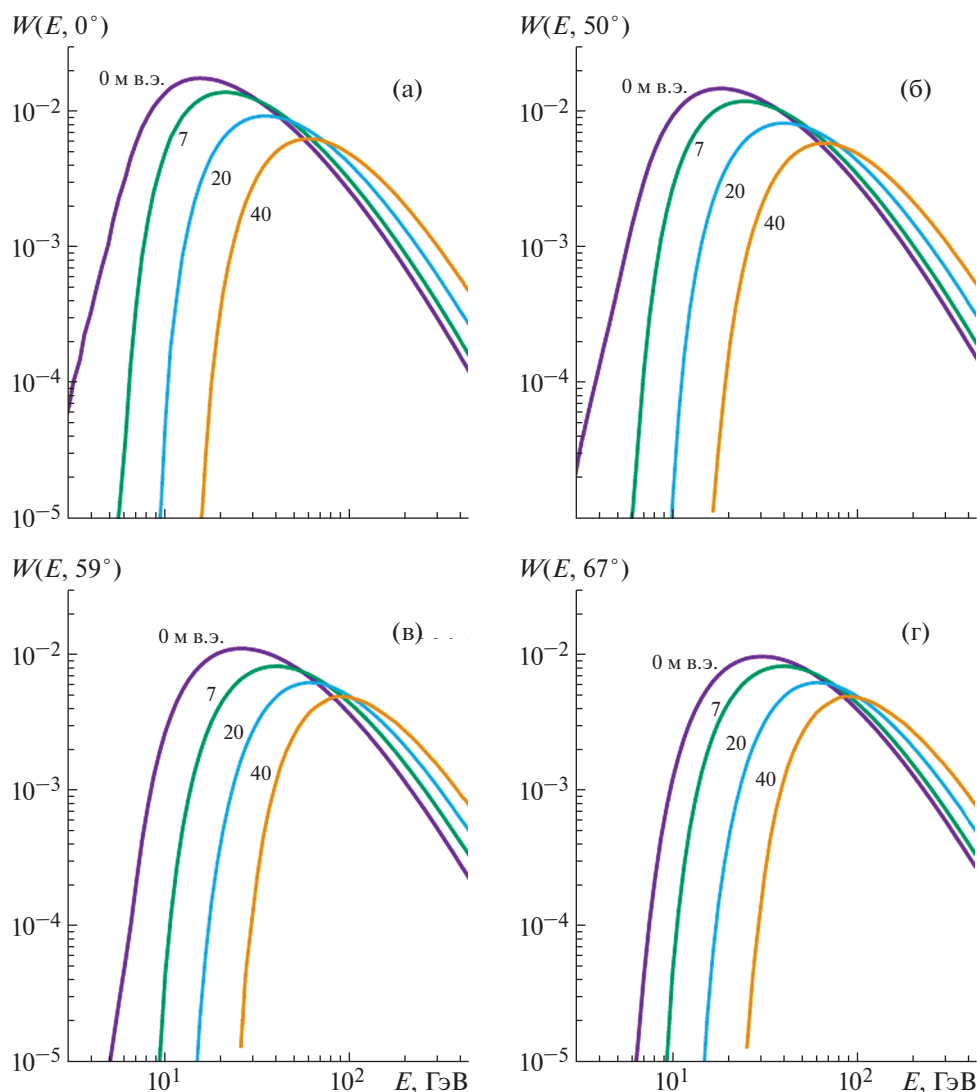


Рис. 2. Интегральные зенитные (а) и азимутальные (б) диаграммы направленности для регистрации интенсивности мюонов с.м.т. по вертикали и под углами 50°, 59°, 67° и 74° из различных направлений прихода мюонов.

### 5.2. Коэффициенты связи

Коэффициенты связи  $W(E, \theta)$ , предложенные в 1957 г. проф. Л.И. Дорманом [11], характеризуют относительную чувствительность детектора к протонам первичного космического излучения различных энергий. Теоретические расчеты такой зависимости были выполнены в работе [7], где для комплекса м.т. якутского спектрографа к.л. были рассчитаны дифференциальные кратности мюонов, отражающие отклик детектора на энергии частицы [7, 12–15]. Такой же метод расчета коэффициентов связи применен и к с.м.т. На рис. 3 представлены коэффициенты связи для с.м.т., нормированные согласно выражению  $\int W(E, \theta) dE = 1$ .

Хотя с.м.т. является интегральным прибором, регистрирующим первичный поток к.л. без ограничения по энергии, для каждого его направления можно определить основную энергию первичного излучения. Такая оценка важна для интерпретации результатов, так как позволяет, не прибегая к сложным расчетам, оценить энергии первичных частиц, наиболее ответственных за



**Рис. 3.** Коэффициенты связи с.м.т., установленных на различных уровнях регистрации, для вертикального направления (а) и под зенитными углами 50° (б), 59° (в) и 67° (г).

наблюдаемые детектором вариации интенсивности к.л. Известной и широко применимой в этом плане является так называемая медианная энергия  $E_{\text{мед}}$ , определяемая выражением

$$\int_{R_c}^{E_{\text{мед}}} W(E, \theta) = \frac{1}{2} \int_{R_c}^{\infty} W(E, \theta),$$

где  $R_c$  — жесткость геомагнитного обрезания частиц.

### 5.3. Энергетический спектр вариаций к.л.

При исследовании вариаций к.л., возникающих вследствие модуляции галактических к.л. в гелиосфере, необходимо задавать их энергетический спектр. Выбор спектра вариаций к.л. необходим для правильной оценки энергий к.л., непо-

средственно регистрируемых детектором. Как известно, амплитуды вариаций к.л. с увеличением числа исследуемых гармоник резко падают, и наиболее значимыми являются лишь суточные и полусуточные вариации. Ниже представлены энергетические спектры именно для этих вариаций. Так как спектры могут меняться в зависимости от уровня солнечной активности, они заданы для нескольких положений.

В частности, для определения исследуемых компонент первой гармоники выбран спектр  $f_1(E)$  вида:  $f_1(E) = \text{const}$ , если  $E \leq E_0$ , и  $f_1(E) = 0$ , если  $E > E_0$ , где  $E_0 = 40, 60, 80, 100$  ГэВ. Спектр для второй сферической гармоники  $f_2(E)$  [7] представлен как:  $f_2(E) = E/E_0$ , если  $E \leq E_0$ , и  $f_2(E) = (E/E_0)^{-2}$ , если  $E > E_0$ , где  $E_0 = 50, 70, 100, 150$  ГэВ.

5.4. Расчет траекторий частиц в геомагнитном поле

Являясь заряженными частицами, к.л. подвергаются влиянию геомагнитного поля. Это учитывается путем расчета траекторий к.л. по методике, представленной в работе [15]. При этом магнитное поле Земли рассчитывалось на основе модели международного геомагнитного аналитического поля IGRF-12 (<https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vm-od/igrf.html>). Такой подход позволяет с удовлетворительной точностью определять траектории частиц в геомагнитном поле. В данной работе асимптотические углы  $\Psi(E, \theta, \varphi), \Phi(E, \theta, \varphi)$  рас-

считывались с разрешением  $3^\circ$  по зениту (от  $0^\circ$  до  $66^\circ$ ) и азимуту (от  $0^\circ$  до  $357^\circ$ ).

5.5. Расчеты компонент приемных векторов

Угловое распределение к.л. обычно представляется в виде разложения в ряд по сферическим гармоникам. Такой подход несколько усложняет расчеты, однако позволяет с использованием минимального числа параметров описывать наблюдаемое распределение. В соответствии с этим приемные вектора представлены для первых двух сферических гармоник.

Для расчета компонент приемных векторов [7] использовалась формула

$$Z_n^m = \frac{\int_{E_{\min}}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) \sin(\theta) e^{im\Psi(E, \theta, \varphi)} P_n^m[\sin\Phi(E, \theta, \varphi)] dE d\theta d\varphi}{\int_{E_{\min}}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) \sin(\theta) dE d\theta d\varphi},$$

где  $Z_n^m = X_n^m + iY_n^m$ , а произведение  $e^{im\Psi(E, \theta, \varphi)} P_n^m[\sin\Phi(E, \theta, \varphi)]$  содержит компоненты:  $X_1^0 = \sin\Phi, X_1^1 = \cos\Phi\cos\Psi, Y_1^1 = \cos\Phi\sin\Psi, X_2^0 = (3/2)\sin^2\Phi - 1/2, X_2^1 = \sin2\Phi\cos\Psi, Y_2^1 = \sin2\Phi\sin\Psi, X_2^2 = \cos^2\Phi\cos2\Psi, Y_2^2 = \cos^2\Phi\sin2\Psi$ .

6. ТЕМП СЧЕТА С.М.Т.

Учитывая специфику научных исследований, проводимых с помощью с.м.т., в частности изучение эффектов анизотропии к.л. с весьма малыми амплитудами, точность регистрации прибора имеет большое практическое значение. Среднеквадратичная дисперсия с.м.т.  $\sigma = \sqrt{J}$ , где  $J$  – темп счета детектора в определенном направлении. Измеренные темпы счета с.м.т. представлены в табл. 3. Соответственно для вертикального направления регистрации с.м.т. на уровне 0 м в.э. среднеквадратичная дисперсия  $\sigma$  часовых измерений составляет 0.082%, а на уровне 40 м в.э. – 0.276%.

Для сравнения ниже представлен темп счета по вертикали для старого м.т. якутского спектрографа к.л. (по состоянию на январь 2018 г.):

Уровень регистрации, м в.э.	0	7	20	40
Темп счета, $10^3$ импульсов/ч	1124.2	540.9	261.8	115.0

Анализ показывает, что ввиду бóльшей эффективной площади с.м.т. измеряемый им темп счета превышает темп счета соответствующих телескопов м.т. на: 31% (для приборов на уровне 0 м в.э.), 26% (7 м в.э.), 25% (20 м в.э.), 8% (40 м в.э.).

7. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ, СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В настоящее время новые современные с.м.т. установлены на поверхности Земли, а также на глубинах 7, 20 и 40 м в.э. С 2010 г. в ИКФИА СО РАН проведен большой объем работ по их наладке и настройке, а также по созданию системы сбора информации для мюонного телескопа данного типа. В настоящее время осуществляется непрерывная поминутная и почасовая регистрация на всех детекторах к.л. Система регистрации и передачи данных по оптической линии в режиме реального времени от станции к.л. на сервер базы данных в главном здании разработана в производственном отделе и Центре информационных технологий института. Вся регистрация и передача данных осуществляются под управлением операционной системы Linux. Сама база данных функционирует под управлением системы PostgreSQL10. Данные регистрации находятся в открытом доступе для всех заинтересованных пользователей в Интернет, посредством интерактивных запросов их можно найти на сервере базы данных, расположенном в главном здании института по адресу <https://ysn.ru/ipm/> и <https://ysn.ru/smt>. Отметим, что база данных с.м.т. зарегистрирована как результат интеллектуальной деятельности ИКФИА СО РАН под номером регистрации (свидетельства) № 2019620103 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности ([https://new.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=DB&DocNumber=2019620103&TypeFile=html](https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2019620103&TypeFile=html)).

**Таблица 3.** Наблюдаемый темп счета с.м.т. на разных уровнях регистрации (по состоянию на январь 2018 г.)

Направление регистрации	Наблюдаемый темп счета, $10^3$ импульсов/ч, при регистрации на уровне			
	0 м в.э.	7 м в.э.	20 м в.э.	40 м в.э.
Вертикаль	1474.5	684.0	328.1	123.8
N50	268.9	132.8	66.6	28.1
S50	261.5	127.8	69.3	25.9
E50	178.4	84.3	42.8	16.0
W50	174.2	85.5	39.0	16.5
N67	16.4	5.9	3.1	1.3
S67	16.3	5.5	3.2	1.3
N74	0.4	0.5	0.2	0.1
S74	0.4	0.4	0.2	0.1
NE59	45.5	20.1	11.2	4.1
NW59	44.9	20.7	10.5	4.4
SE59	44.8	20.6	10.3	4.6
SW59	44.2	20.8	9.8	4.3

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен прибор, который позволяет с высокой эффективностью регистрировать мюонную компоненту вторичных к.л., приходящих с 13-ти направлений, как на поверхности Земли, так и на уровнях 7, 20 и 40 м в.э. под землей. Прибор обладает улучшенными счетными характеристиками и угловым разрешением по сравнению с установленными ранее и устаревающими мюонными телескопами на газоразрядных счетчиках СГМ-14. В качестве примера общий вид с.м.т., установленного на поверхности Земли, показан на рис. 4. С помощью этого прибора впервые в Якутске реализована возможность регистрации частиц с направлений E–W, а также



**Рис. 4.** Общий вид с.м.т., установленного на поверхности Земли на станции к.л. “Якутск”.

NE–SW, SW–NE, NW–SE и SE–NW. Это существенно расширяет круг решаемых задач, например, позволяет исследовать восточно-западную асимметрию в распределении к.л. в магнитосфере Земли, а также тонкие эффекты в анизотропии солнечных к.л.

Описанный прибор является частью уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей” (<http://ckp-rf.ru/usu/433536>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы базового финансирования проекта 16.2.2. “Происхождение космических лучей в различных астрофизических объектах и динамика их распределения в межпланетном пространстве” (регистрационный номер НИОКТР АААА-А17-117021450058-6) и при поддержке гранта РФФИ № 18-42-140002-р\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космофизические исследования в Якутии. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2001.
2. Красильников Д.Д., Кузьмин А.И., Шафер Ю.Г. // В кн.: Вариации интенсивности космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 42.
3. Шафер Г.В., Шафер Ю.Г. Прецизионные наблюдения космических лучей в Якутске. Новосибирск: Наука, 1984.
4. Стародубцев С.А. Дис. ... доктора физ.-мат. наук. Иркутск: Ин-т солн.-зем. физики СО РАН, 2014.
5. Мигунов В.М., Стародубцев А.М., Транский И.А., Упольников А.А. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32. №1. С. 171.



6. Бритвич Г.И., Бреховских В.В., Семенов В.К., Холоденко С.А. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 47.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816215020159>
7. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981.
8. Grieder P.K.F. Cosmic Rays at Earth. Researcher's Reference Manual and Data Book. Elsevier, 2001.
9. Pethuraj S., Datar V.M., Majumder G., Mondal N.K., Ravindran K.C., Satyanarayana B. // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2017. V. 2017. № 9. P. 021.  
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/09/021>
10. Добротин Н.А. Космические лучи: Учебное пособие. М.: Гостехиздат, 1954.
11. Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гостехиздат, 1957.
12. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Григорьев В.Г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 5. С. 716.
13. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Скрипин Г.В., Кривошапкин П.А., Алтухов А.М. Исследования по геомагнетизму и аэрономии. М.: Наука, 1966.
14. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Григорьев В.Г. // Известия РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. С. 911.
15. Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.