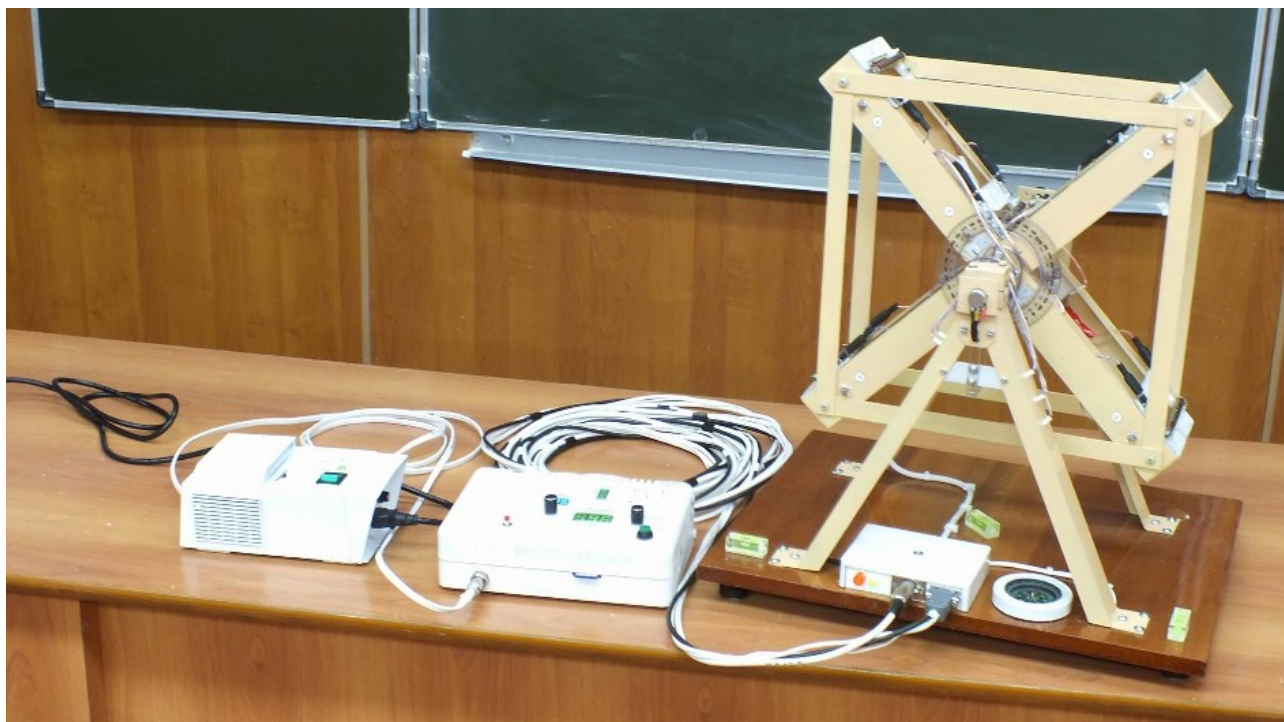


МБОУ «Лицей физики, математики, информатики №40» при УлГУ

Исследовательская Творческая Группа «Солярис»



# Сканирующий меридианный телескоп космических лучей

**Автор:**

**Серюбин Серафим Сергеевич**, 8«Б» класс.

**Руководитель:**

**Иванов Илья Петрович**,

руководитель ИТГ «Солярис»,

научный сотрудник НИТИ им.С.П.Капицы

Ульяновского государственного университета,

педагог дополнительного образования высшей категории.

**E-mail:** SolarisGroup@mail.ru

Ульяновск, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Аннотация, abstract, благодарности	2
1. Введение	5
1.1. Космические лучи	5
1.2. Основные методы, эксперименты, приборы для исследования углового распределения космических лучей	6
1.3. Цели и задачи нашего проекта	10
2. Принципы работы и конструкция СМТКЛ	11
2.1. Основные идеи, заложенные нами в конструкцию СМТКЛ	11
2.2. Недостатки нашей конкретной конструкции в настоящее время	13
2.3. Состав СМТКЛ	15
2.4. Геометрия СМТКЛ	19
2.5. Механическая подсистема СМТКЛ	21
2.6. Электронная подсистема СМТКЛ	26
2.7. Информационная подсистема СМТКЛ	29
3. Заключение	33
Библиографический список	34

## АННОТАЦИЯ

В работе представлена действующая модель компактного и относительно дешёвого прибора для регистрации углового распределения космических лучей с градусным разрешением.

В приборе реализованы следующие идеи: 1. сканирование вместо сплошного заполнения счётчиками (матрицами), 2. сканирование сразу по 12-ти направлениям, 3. меридианное сканирование (в плоскости небесного меридиана), 4. выявление совпадений срабатывания регистрирующих приборов

для определения направления прилёта частицы, 5. двухуровневая система обработки данных с телескопа.

Совокупность этих идей (технических решений) и определяет новизну данного прибора.

Перспективой данной работы является создание более совершенной аппаратуры космического базирования малых габаритов с высоким угловым разрешением (до  $0.09^\circ$ ), использующей опробованные нами в данной работе идеи. Это откроет возможности для создания карты углового распределения космических лучей для исследования их пространственной анизотропии, выявления других, неизвестных закономерностей в их угловом и энергетическом распределениях.

Решение этой задачи возможно только при заинтересованности в этом соответствующих крупных космических организаций.

### **ABSTRACT**

The paper presents a working model of a compact and relatively inexpensive device for recording the angular distribution of cosmic rays with the one-degree resolution.

The device has the following ideas: 1. scanning instead of a solid filling by counters (matrices), 2. scanning from 12 directions, 3. meridian scanning (in the plane of the celestial meridian), 4. detection for coincidences determining the direction of arrival of the particle, 5. two-level data processing system.

The combination of these ideas (technical solutions) and determines the novelty of the instrument.

The perspective of this work is the development of improved space-based equipment of small dimensions with high angular resolution (up to  $0.09^\circ$ ), using our ideas, tested in this work. It will open up opportunities to create maps of the angular distribution of cosmic rays to study their spatial anisotropy and identify other unknown regularities in their spatial and energy distributions.

The solution of this problem is possible only when it will interest the relevant major space organizations.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Выражаем благодарность Управлению научных исследований Ульяновского государственного университета и администрации лицея физики, математики, информатики №40 при Ульяновском государственном университете за финансовую помощь, оказанную нам в реализации данного проекта. Мы также благодарны соляристам Игорю Решетову и Михаилу Романову за помощь в реализации проекта.

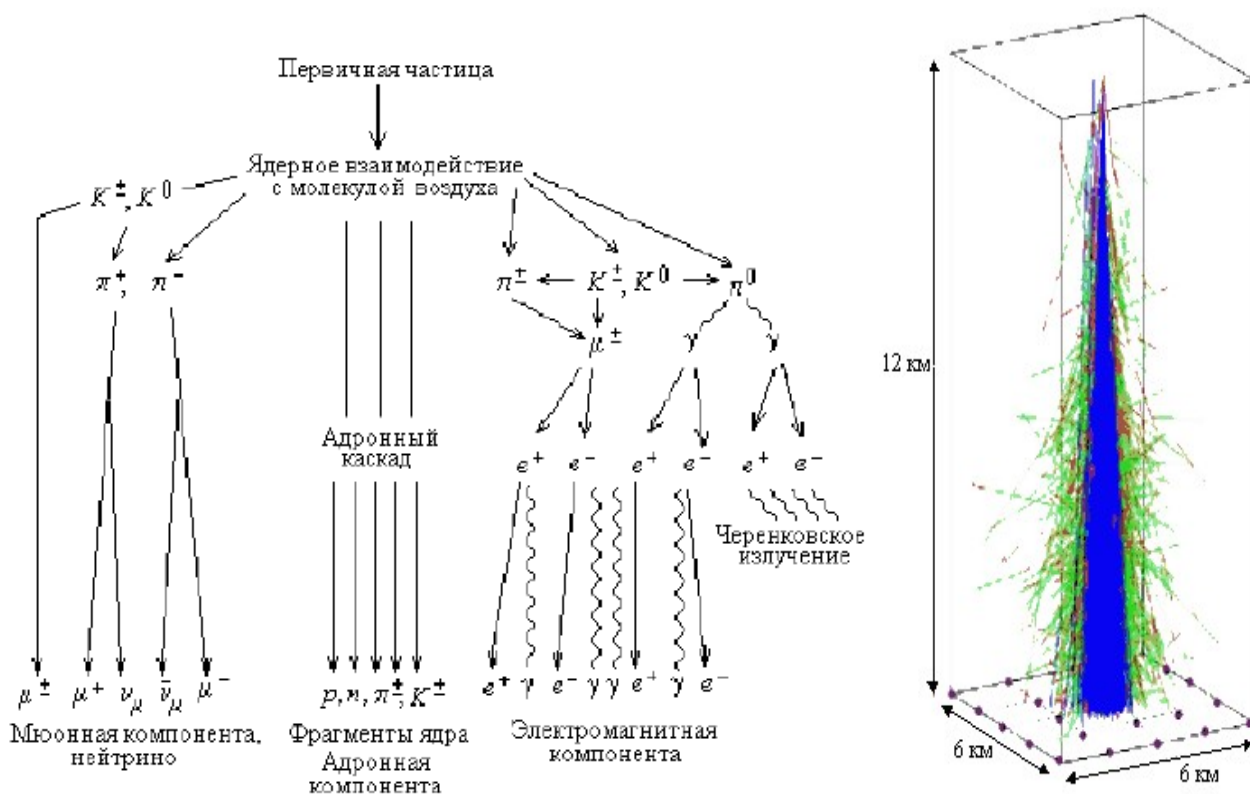
34 страницы, 21 рисунок, 2 таблицы, 7 литературных источников.

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## 1.1. Космические лучи

**Космические лучи (КЛ)** – это поток высокоэнергетичных частиц, движущихся в космическом пространстве. По происхождению КЛ разделяются на **внегалактические**, рождающиеся вне пределов нашей Галактики - в сталкивающихся галактиках, в аккреционных дисках квазаров (состоят из адронов ультравысоких энергий), **галактические** – результаты взрывов сверхновых звёзд (состоят из ядер различных химических элементов, а также электронов и позитронов с энергией  $E > 10^7$  эВ), **солнечные** - электроны, протоны и ядра с энергией от  $10^3$  до  $10^6$  эВ, инжектированные Солнцем в межпланетное пространство и **пришедшие из межпланетного пространства** – энергичные заряженные частицы радиационных поясов планет (электроны, адроны, ионы).

КЛ также разделяются на **первичные** - пришедшие из космического пространства и не претерпевшие взаимодействия с атмосферой и **вторичные** - потоки частиц, порождённые первичными КЛ в атмосфере Земли (см.рис.1).



**Рис.1.** Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой – рождение вторичной компоненты космических лучей

Образующийся конус из вторичных частиц называют **широким атмосферным ливнем (ШАЛ)**. Ширина ливня у поверхности земли может достигать сотен и тысяч метров, площадь - десятков квадратных километров.

**Энергетический спектр космических лучей** имеет некоторые особенности. Это – «колени» в области энергий  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ и «лодыжка» в области энергий  $\sim 10^{19}$  эВ.

Интересным является вопрос об **угловом распределении первичных космических лучей**. Основным положением здесь является утверждение об **изотропности** галактических космических лучей – в пределах 0,1% вплоть до энергий  $10^{14}$  эВ и, предположительно, **нескольких десятков процентов** при энергиях  $>10^{19}$  эВ [1].

**Вопрос об изотропности распределения космических лучей, особенно в области высоких энергий, на настоящий момент является недостаточно исследованным.** Исследованию данного вопроса и должен послужить прибор, прототип которого представлен в данной работе.

Рассмотрим основные методы, применяющиеся для исследования углового распределения космических лучей, основные эксперименты в этой области и использовавшиеся в них приборы.

## **1.2. Основные методы, эксперименты, приборы**

### **для исследования углового распределения космических лучей**

В современных экспериментах по исследованию углового распределения КЛ можно выделить следующие **методы**.

- 1) Регистрация ШАЛ на наземных установках.
- 2) Регистрация ливней на подземных (подводных) детекторах.
- 3) Регистрация черенковского свечения и флуоресценций атмосферы в местах прохождения частиц ШАЛ.
- 4) Эксперименты в космосе.

Основные, наиболее серьезные экспериментальные установки для таких исследований следующие.

### 1.2.1. Исследования обсерватории Пьера Оже (Pierre Auger Observatory)

Обсерватория занимает площадь 3500 м<sup>2</sup> в Пампе Амарилло около горной цепи Анды. Обсерватория специально предназначена для исследования космических лучей сверхвысоких энергий ( $E \sim 10^{21}$  эВ). Она располагает несколькими десятками оригинальных черенковских детекторов и тремя большими телескопами типа «глаз мухи» (см. рис.2).

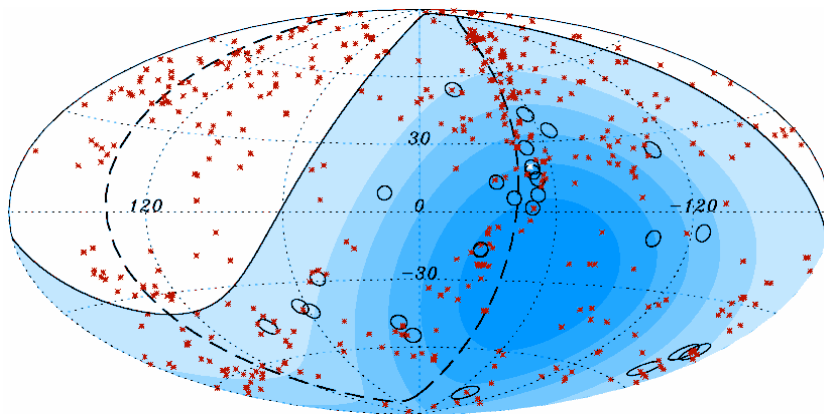
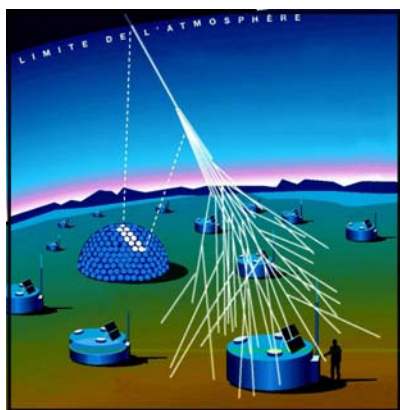


Рис.2. Слева - общая схема обсерватории «Пьер Оже», справа - карта распределения КЛ, полученная обсерваторией

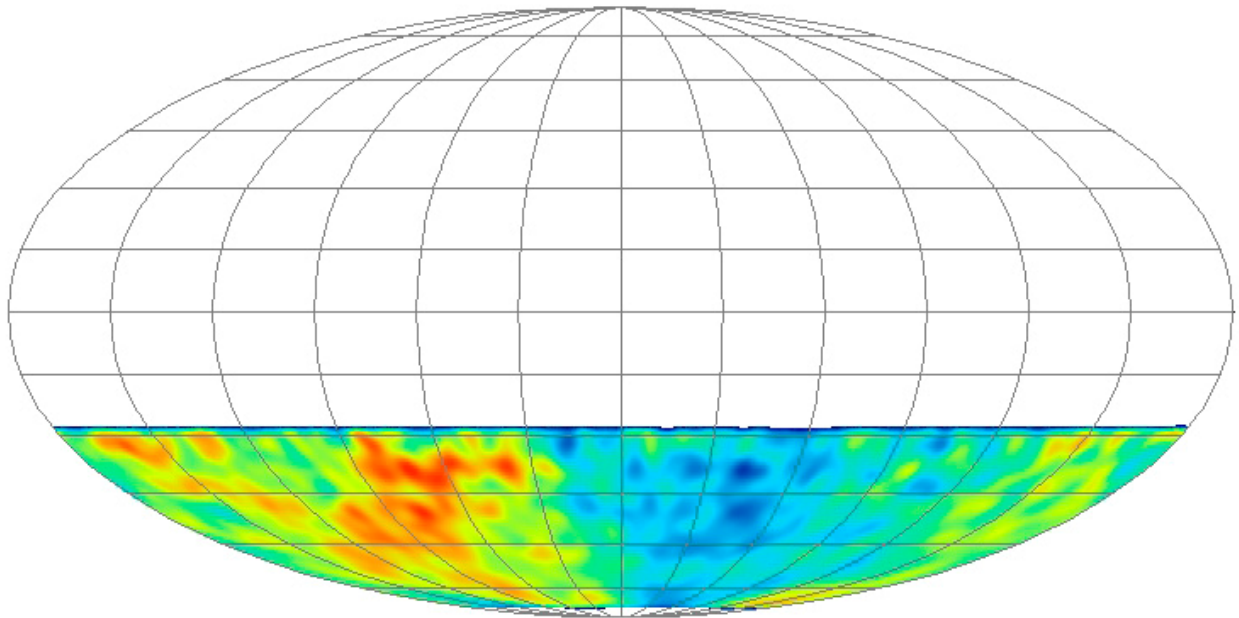
Официально обсерватория закрыта в 2008 году.

**Недостатки проекта:** огромный размер; высокая стоимость; ограниченность диапазона исследований ультравысокими энергиями ( $10^{19}$  -  $10^{21}$  эВ); низкая угловая точность (т.к. детекторы разделены между собой на  $\sim 2$  км., то приходится с определенной вероятностью восстанавливать ШАЛ на площади между ними).

### 1.2.2. Исследования коллаборации Ice Cube

Ice Cube - нейтринная обсерватория, построенная на антарктической станции Амундсен-Скотт. IceCube расположена глубоко под антарктическим льдом. Основная цель обсерватории - обнаружение и изучение

высокоэнергетических нейтрино, которые попадают на Землю, предоставляя информацию о далеких космических явлениях, таких как: взрывы сверхновых, активность черных дыр и т.д. Однако, обсерватория выполнила также картирование КЛ (см. рис.3).



**Рис.3.** Карта распределения КЛ, направленных на Южное полушарие Земли, полученная Ice Cube. Синим цветом обозначены направления с большим количеством КЛ, красным – с малым.

**Недостатки проекта:** большие размеры; высокая стоимость проекта.

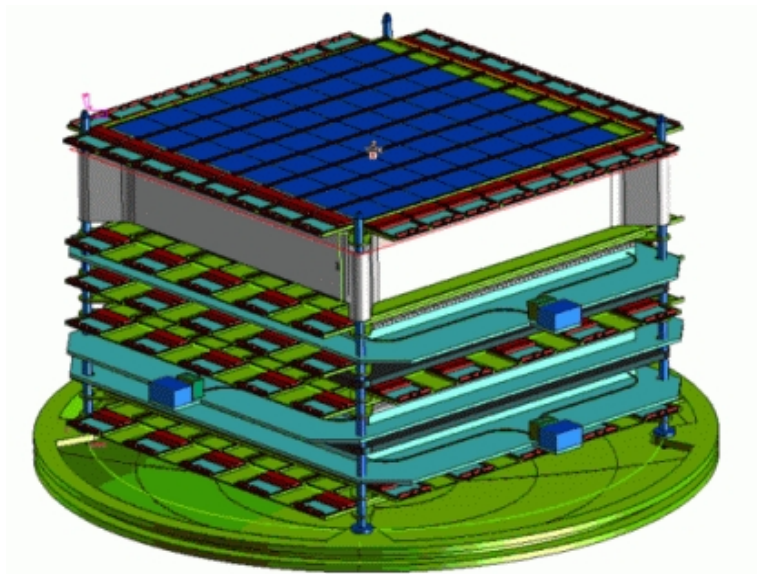
Вышеуказанные установки («Пьер Оже» и «Ice Cube») работают (работали) в диапазоне **сверхвысоких и ультравысоких энергий** ( $10^{15}$  -  $10^{21}$  эВ). Следующий прибор предназначен для работы в пределах **высоких** ( $10^{12}$  -  $10^{13}$  эВ) энергий.

### 1.2.3. Эксперимент «НУКЛОН»

Это – проект кафедры физики космоса МГУ. Аппарат предназначен для непосредственной («прямой») регистрации первичных КЛ. Главной целью эксперимента является решение проблемы происхождения КЛ в области, предваряющей «колесо» в спектре первичных космических лучей:  $10^{11}$  -  $10^{15}$



эВ. Также предполагается измерение пространственной анизотропии отдельных групп ядер в области  $10^{12}$  -  $10^{13}$  эВ. Измерения планируется проводить с помощью лёгкой установки на серийном спутнике в течение нескольких лет [2]. В целом научная аппаратура НУКЛОН представляет собой «слоистую» структуру с габаритными размерами активной части спектрометра  $\sim 500 \times 500 \times 250$  мм. В состав научной аппаратуры входит: 4 слоя падовых (размер пада  $\sim 2.5$  см<sup>2</sup>) кремниевых детекторов, предназначенных для прецизионного измерения заряда первичной частицы; 6 слоев микростриповых кремниевых детекторов (шаг стрипа  $\sim 450$  мкм), предназначенных для определения: энергии первичной частицы, локализации места первого неупругого взаимодействия, траектории прихода в установку первичной частицы; 6 слоёв позиционно чувствительных сцинтилляционных детекторов, предназначенных для выработки триггерного сигнала (см. рис.4).



**Рис.4.** Аппарат эксперимента «НУКЛОН»

Слои координатно-чувствительных детекторов, способны фиксировать как число, так и распределение пространственной плотности заряженных частиц около трека первичной частицы. Они позволяют с достаточной точностью восстанавливать направление трека первичной частицы.

**Недостатки проекта:** проект не реализован.

Таким образом, мы видим, что основные эксперименты по исследованию

углового распределения КЛ характеризуются, в основном, **высокой энергетикой** исследуемых КЛ, **высокой стоимостью** и **большими размерами** экспериментальных установок. Поэтому, имеется желание создать прибор, который не будет обладать отрицательными свойствами указанных приборов, но у которого будут некие неоспоримые достоинства. В качестве прототипа такого прибора мы хотим предложить нашу разработку - **сканирующий меридианный телескоп космических лучей (СМТКЛ)**.

### **1.3. Цели и задачи нашего проекта**

**Целью нашего проекта** является создание карты распределения КЛ на небесной сфере с целью изучения анизотропии их распределения и выявления других, неизвестных закономерностей в их угловом и энергетическом распределениях.

Эта цель может быть достигнута только при участии серьёзных космических организаций с соответствующим финансированием. В данной работе мы лишь предлагаем и апробируем на модели некоторые идеи и принципы устройства необходимых приборов.

#### **Основные задачи данного проекта:**

1. Апробация идеи компактного и дешёвого телескопа космических лучей с градусным разрешением.
2. Создание действующей модели подобного устройства.
3. Отработка двухуровневой системы обработки «сырых» данных с телескопа на предмет поиска совпадений и других интересных событий.

## 2. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ СМТКЛ

### 2.1. Основные идеи, заложенные нами в конструкцию СМТКЛ

#### а) Сканирование вместо сплошного заполнения счётчиками (матрицами)

Идея состоит в том, чтобы вместо организации нескольких матриц из большого количества (дорогостоящих) регистрирующих элементов (как это делается обычно), использовать небольшое количество этих элементов, но перемещающихся по нужной области (см. рис.5).

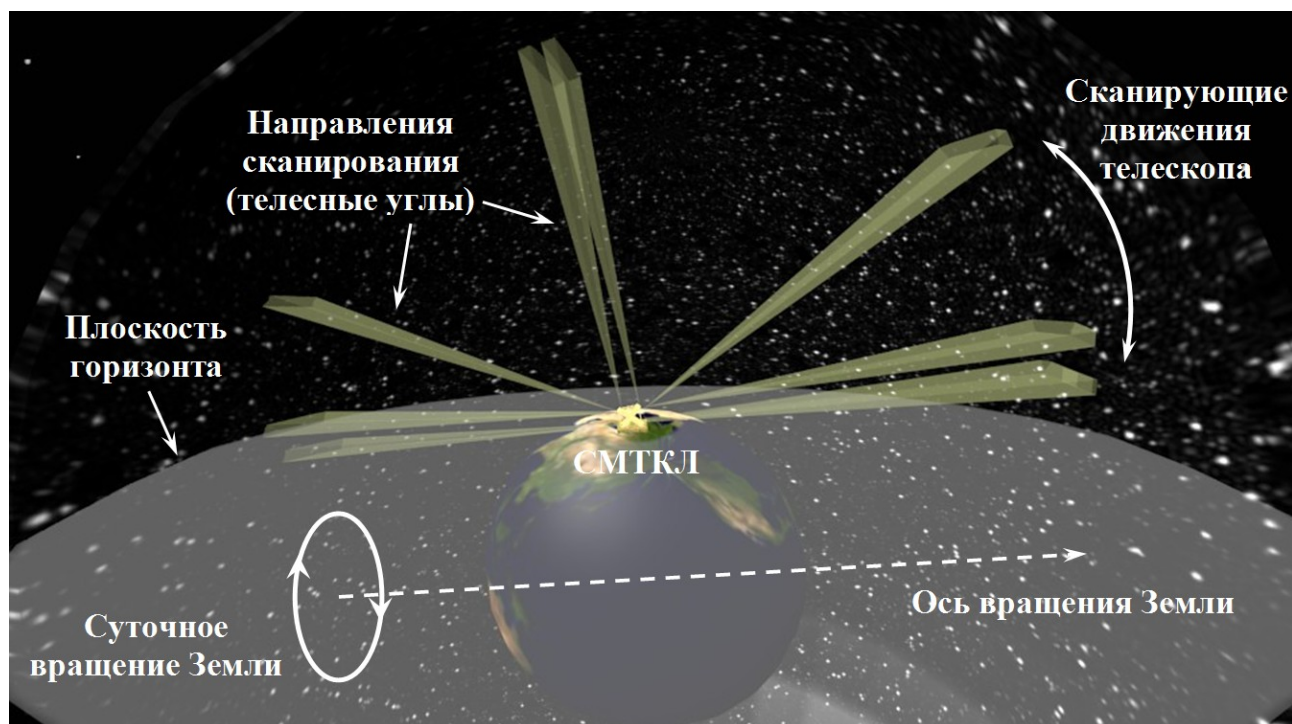


Рис.5. Ориентация и схема сканирования СМТКЛ

Здесь мы использовали принципы ТРИЗ – «разделение во времени» и «динамизация» [3], [4]. Это приводит к удешевлению конструкции и упрощению электроники (при некотором росте сложности механики). При этом, конечно, повышается вероятность пропуска частиц при пролёте их там, где в данный момент времени не находятся регистрирующие приборы. Для снижения этой вероятности мы предлагаем следующую идею.

#### б) Одновременное сканирование не по одному, а сразу по 8-ми направлениям (с учётом частичного совпадения части направлений,

**направлений, на самом деле 12)** (см. рис.5, рис.12).

С учётом ненулевой разрешающей способности телескопа (см. таблицу 1), правильнее говорить не о направлениях, а о **телесных углах сканирования**, соответствующих геометрии конкретных регистрирующих приборов, что и показано на рис.5. Однако, в дальнейшем мы будем употреблять термины «направление сканирования (регистрации)», «линия сканирования (регистрации)», помня об этой оговорке.

### **в) Меридианное сканирование**

Сканирование только в одной плоскости (в нашем случае – в плоскости небесного меридиана; в случае расположения прибора на космическом аппарате эта плоскость может быть другой, в зависимости от ориентации аппарата, наличия на его борту гиростабилизированной платформы и т.п.) (см. рис.5). При этом, суточное движение Земли поворачивает эту плоскость на один оборот за звёздные сутки и, тем самым, в поле зрения телескопа попадает вся доступная для обзора в данной местности часть небесной сферы. Поэтому, характерное время непрерывной работы нашего телескопа – сутки. А идеальной местностью для наблюдений был бы экватор Земли. Меридианное сканирование также удобно относительной простотой перевода высоты и времени в склонение и прямое восхождение направлений сканирования.

Меридианное сканирование, помимо упрощения и удешевления конструкции, также даёт **возможность отсева земных источников** радиации: при наложении на карту звёздного неба они будут выглядеть, как полосы, вытянутые в широтном направлении (иметь одинаковое склонение), что может быть устранено последующей обработкой.

Следует отметить, что при реализации проекта на космических аппаратах, сканирование не обязательно предполагает наличия на борту аппарата сложной и точной механики со взаимно вращающимися элементами: сканирование может выполняться путём вращения аппарата в целом во время полёта, а телескоп может быть неподвижно закреплён на нём.

г) **Выявление совпадений срабатывания регистрирующих приборов** для определения направлений прилёта частиц. Эта идея придумана не нами, она достаточно хорошо известна в физике микромира.

д) **Двухуровневая система обработки данных с телескопа**

Производится запись **всех** событий (всей «сырой информации») - срабатываний регистрирующих приборов вместе с показаниями датчика угла поворота рамы (энкодера) и времени в моменты срабатываний. Они записываются на SD-карту прибора. По окончании работы телескопа SD-карта переносится из него в компьютер, где все данные обрабатываются специальной программой. Производится поиск совпадений (в основном – двойных, но могут быть и тройные) и наложение соответствующих направлений прилёта частицы на карту звёздного неба.

Такая система даёт больше возможностей исследователю, поскольку он может выявлять не только совпадения, но и другие всевозможные интересные события, которые он захочет выявить.

## **2.2. Недостатки нашей конкретной конструкции в настоящее время**

1) Вероятность пропуска пролетающих частиц вследствие замены сплошных матриц на сканирование (см. выше).

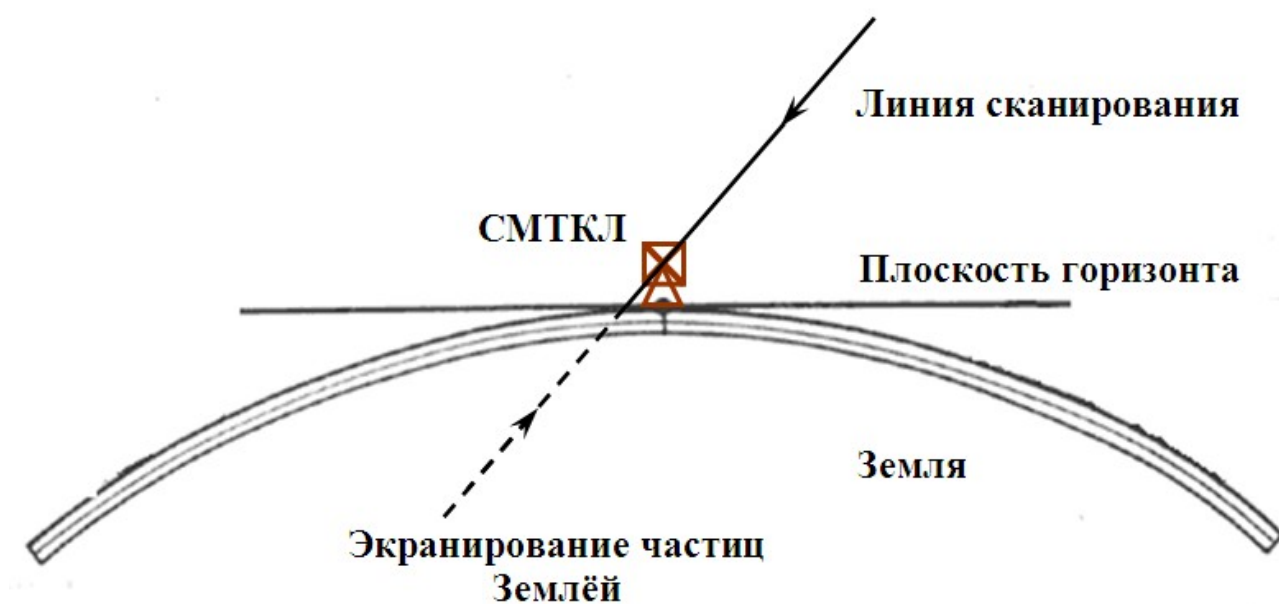
2) Поскольку мы располагаемся на дне «воздушного океана», то регистрируем, в основном, **вторичные космические лучи**, ШАЛы, направления частиц в которых могут несколько отличаться от направления первичной частицы (см. рис.6).



**Рис.6.** Несоответствие направлений прилёта частицы первичных КЛ (1) и направления регистрации (2) вторичной частицы

Это приводит к понижению точности регистрации направления прилёта первичной частицы. Данный эффект нами сейчас не учитывается. Указанный недостаток будет полностью устранён при реализации проекта на базе космических аппаратов.

3) Вследствие небольших размеров сканирующего блока, несовершенства счётчиков Гейгера и недостаточной рабочей частоты управляющего прибором контроллера, мы не имеем возможности различать наносекундные интервалы времени, что необходимо для определения **последовательности срабатывания** регистрирующих приборов и, тем самым, точного определения направления прилёта частицы по линии сканирования, а также для определения скорости частицы. Для частичной компенсации этого недостатка мы сделали **допущение** о том, что Земля (ниже линии горизонта) полностью экранирует частицы КЛ. Т.е., при одновременном срабатывании счётчиков при ненулевой высоте линии сканирования мы считаем, что частица прилетела со стороны, находящейся выше горизонта (см.рис.7).



**Рис.7.** Допущение о полном экранировании частиц КЛ Землёй

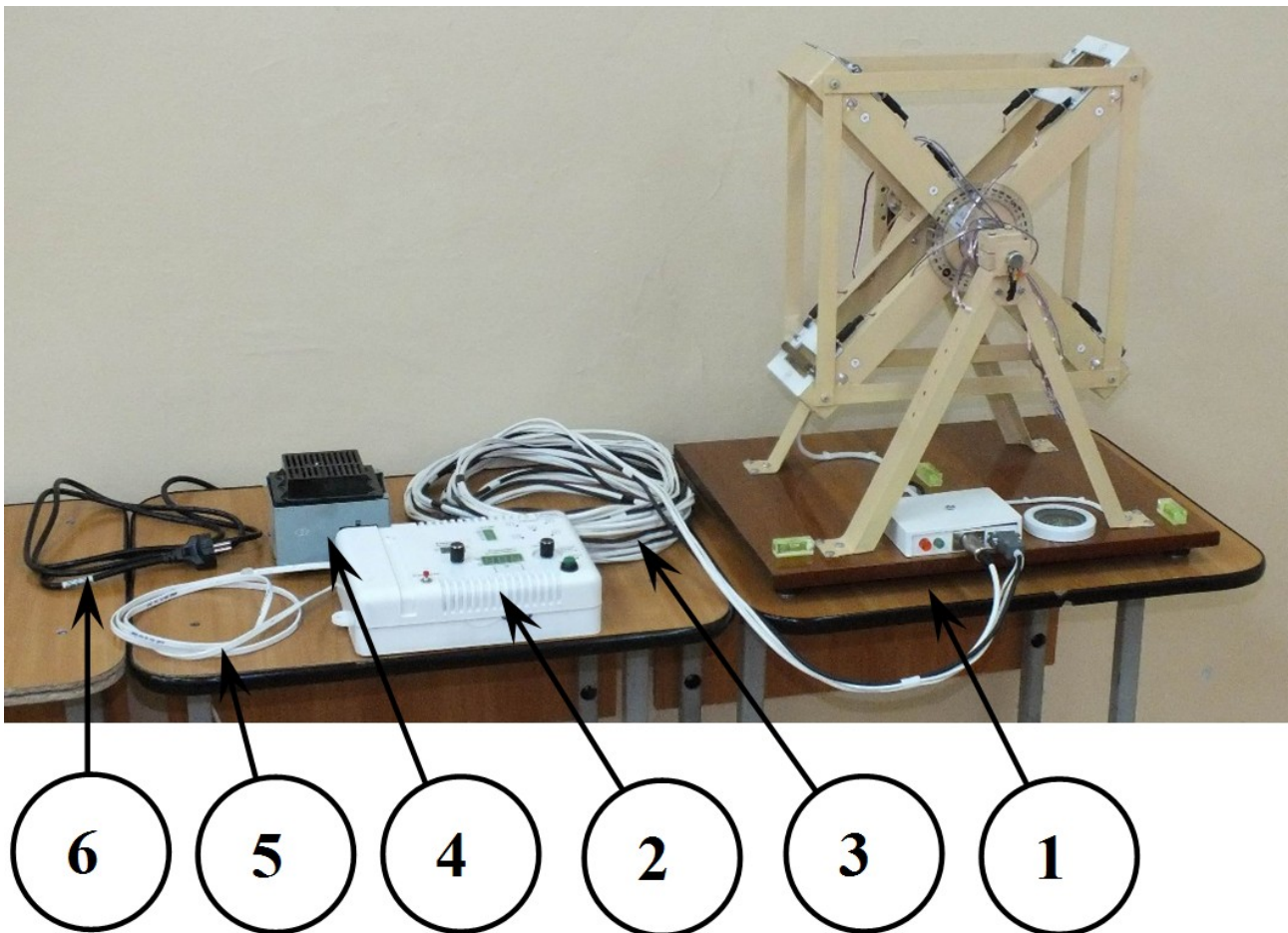
Данное допущение будет более обоснованным при расположении СМТКЛ на достаточно плотном экранирующем основании.

Этот недостаток будет устранён при полноценной реализации проекта на космических аппаратах. В этом случае необходимо использовать более совершенные (но и более дорогостоящие) регистрирующие приборы, электронику, контроллеры.

### 2.3. Состав СМТКЛ

Детальное описание устройства телескопа будет дано ниже, а пока мы ограничимся общим описанием его состава.

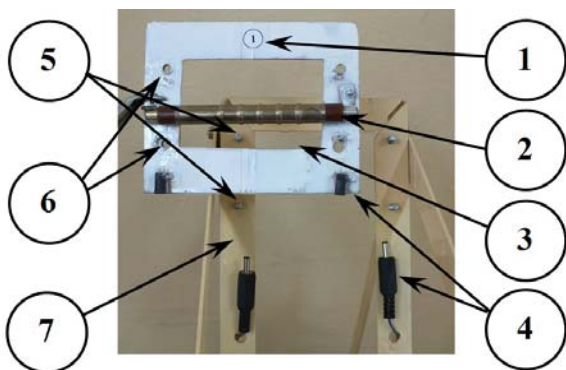
Телескоп состоит из трёх блоков (см. рис. 8).



**Рис.8.** Общий вид СМТКЛ. 1 – сканирующий (наблюдающий) блок, 2 – блок управления, 3 – кабель связи и питания сканирующего блока, 4 – блок питания, 5 – кабель питания блока управления, 6 – сетевой шнур

### 2.3.1. Сканирующий (наблюдающий) блок с чехлом

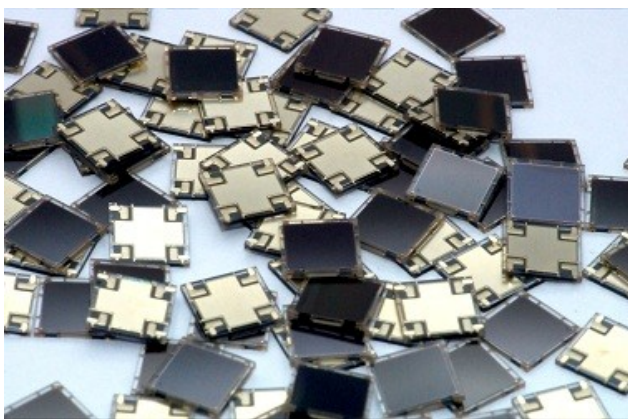
Состоит из **поворотной рамы**, расположенной на **станине** и **основании** (см. рис.14 и 15) с закреплёнными на ней с помощью болтов и гаек **съёмными площадками** (см. рис.9) с регистрирующими приборами.



**Рис.9.** Съёмная площадка. 1 – номер площадки, 2 – счётчик Гейгера СБМ-20 в зажимах, 3 – окошко, сделанное для того, чтобы не мешать пролёту частиц, 4 – электрические разъёмы, 5 – посадочные болты на поворотной раме, 6 – посадочные отверстия в площадке, 7 – поворотная рама



Пока мы используем в качестве регистрирующих приборов **счётчики Гейгера СБМ-20**, но затем планируем исследовать возможность применения в качестве регистрирующих приборов счётчики Гейгера СБМ-10, СИ29БГ, СИЗБГ, для которых необходимы соответствующие площадки. Для экспериментов на космических аппаратах потребуются, конечно, более точные и дорогие приборы, например, микропиксельные лавинные фотодиоды (гейгеровского режима) со сцинтилляционной матрицей (см. рис.10), микростриповые детекторы и т.п.



**Рис.10.** Микропиксельные лавинные фотодиоды (гейгеровского режима) - МЛФД (ГР)

Съёмные площадки с **электрическими разъёмами** и **стандартными посадочными местами** обеспечивают возможность быстрой смены различных типов регистрирующих приборов.

С целью обеспечения возможности многочасового наблюдения в сложных метеоусловиях **на сканирующем блоке располагается минимум электроники**, и все его части (там, где была такая возможность) либо **покрашены алкидной эмалью**, либо **лакированы**. Механические части покрашены **бежевой эмалью**, электрические – **белой**. Для этой же цели (а также, для переноски прибора) служит **чехол** (на рисунке не показан).

Питается сканирующий блок от напряжений **400 вольт** (для работы счётчиков Гейгера) и **6 вольт** (питание сервопривода). На передней панели (**распределительной коробки**) сканирующего блока имеются **разъёмы** для кабеля от управляющего блока и **индикаторы** подачи указанных выше напряжений питания.

### 2.3.2. Блок управления

В нём располагаются **все основные электронные компоненты** телескопа: микроконтроллер ATmega 328 на плате Arduino Nano, преобразователь напряжения 10 – 400 вольт для питания счётчиков Гейгера, нижние плечи делителей напряжения со счётчиков, каналы управления сервоприводом и энкодером, наружная **панель управления** с различными кнопками, регуляторами и индикаторами, разъёмами питания и USB, слотом под SD-карточку (см. рис.11).



**Рис.11.** Внешний вид блока управления (панель управления)

Из блока управления исходит **7-метровый кабель** для связи со сканирующим блоком и его питания. Последний, тем самым, может находиться на открытом пространстве (за окном, на крыше здания), тогда как блоки управления и питания – в помещении. Кабель является **составным**, он содержит в своём составе 4 подкабеля разной жильности, сечения, изоляции проводов, их экранированности в зависимости от характера целевого устройства. Подкабели перехвачены стяжками с интервалом 25 см.

Питается блок управления от напряжений **10 вольт** (электроника, преобразователь 10 – 400 вольт) и **6 вольт** (питание сервопривода), подаваемых с блока питания.

### 2.3.3. Блок питания

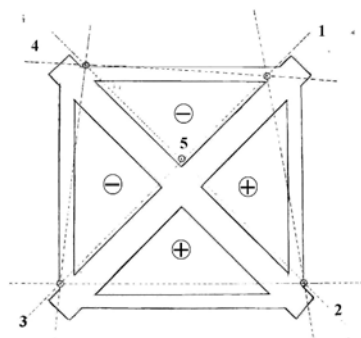
Питается от сети **220 вольт** через **сетевой кабель** с заземляющим проводом. На входе прибор защищён **предохранителем**. Сетевой выключатель светящийся, двухпроводной (что обеспечивает безопасность работы со схемой при его выключении).

Блок выдаёт напряжения **6 и 10 вольт** с требуемыми параметрами по току и пульсации напряжения. Наличие напряжений на выходе индицируется, соответственно, большими (10 мм.) зелёным и синим **светодиодами**. Выходные линии **гальванически развязаны с сетью 220 вольт**, что увеличивает безопасность при работе с прибором.

Из блока исходит **3-х-метровый кабель** для подключения к управляющему блоку. Кабель **3-х-жильный** («общий = земля», «+6 вольт», «+10 вольт»). Его длина выбрана из условий удобства взаимного расположения блоков питания и управления в помещении.

### 2.4. Геометрия СМТКЛ

Из расположения счётчиков (см. рис. 12) видно, что телескоп имеет 8 направлений линий сканирования (с учётом частичного совпадения части направлений, их 12, см. таблицу 1).



**Рис.12.** Геометрия поворотной рамы СМТКЛ (вид спереди). Круги – проекции счётчиков Гейгера СБМ-20 по их осям. Пунктирные линии – линии сканирования. В центре, на пересечении перекладин – ось вращения. Цифры – номера площадок (счётчиков). «+» и «-» - знаки углов направлений по отношению к главному.

Часть из направлений прикрыта с одной стороны 2-х-миллиметровым слоем алюминия, что может служить своеобразным «фильтром» для частиц и учитывается при обработке данных. Углы между всеми направлениями

измерены с точностью до 1° и сохраняются при работе телескопа с указанной точностью.

**Главным направлением** считается направление от регистрирующего прибора №3 к прибору №1. Оно же – направление соответствующей перекладки поворотной рамы, на которой расположены эти счётчики. Относительно него определяются положения всех других направлений сканирования телескопа.

При старте телескопа главное направление принимает положение, соответствующее высоте 45° по отношению к горизонту и направление на север. Это положение называется **исходным (стартовым) положением** телескопа. Оно оптимально при работе телескопа в средних широтах.

**Угловые разрешения** (точности определения пространственных направлений пролёта частиц) также определены, исходя из геометрии телескопа и конкретных регистрирующих приборов (см. таблицу 1) и вводятся в программу обработки в качестве параметров.

**Таблица 1.** Углы и угловые разрешения различных направлений сканирования СМТКЛ для счётчиков Гейгера СБМ-20

№ направления	Номера одновременно срабатывающих счётчиков	Угол по отношению к главному направлению, °	Вертикальное угловое разрешение (по склонению), °	Горизонтальное угловое разрешение (по прямому восхождению), °
1 (главное)	3, 1	0	2,7	18,8
2	2, 4	-90	2,6	17,8
3	5, 1	+1	6,6	43,8
4	5, 2	+91	4,6	31,2
5	5, 3	+178	4,6	31,2
6	5, 4	-90	5,9	39,5
7	2, 1	-55	3,7	25,8
8	3, 2	+45	3,3	22,7
9	3, 4	-38	3,6	24,8
10	4, 1	+49	4,4	29,8
11	3, 5, 1	0	2,7	18,8
12	2, 5, 4	-90	2,6	17,8

Символом || обозначены направления, закрытые со стороны данного счётчика 2-х-миллиметровым слоем алюминия

Все остальные совпадения считаются случайными одновременными срабатывания счётчиков, поскольку соответствующие счётчики не лежат на одной прямой.

Отметим, что данные угловые разрешения относятся к достаточно большому по размера счётчикам СБМ-20. В нашем распоряжении имеются и более компактные счётчики (см. рис.13), которые легко могут быть установлены на стандартные съёмные площадки и на телескоп.

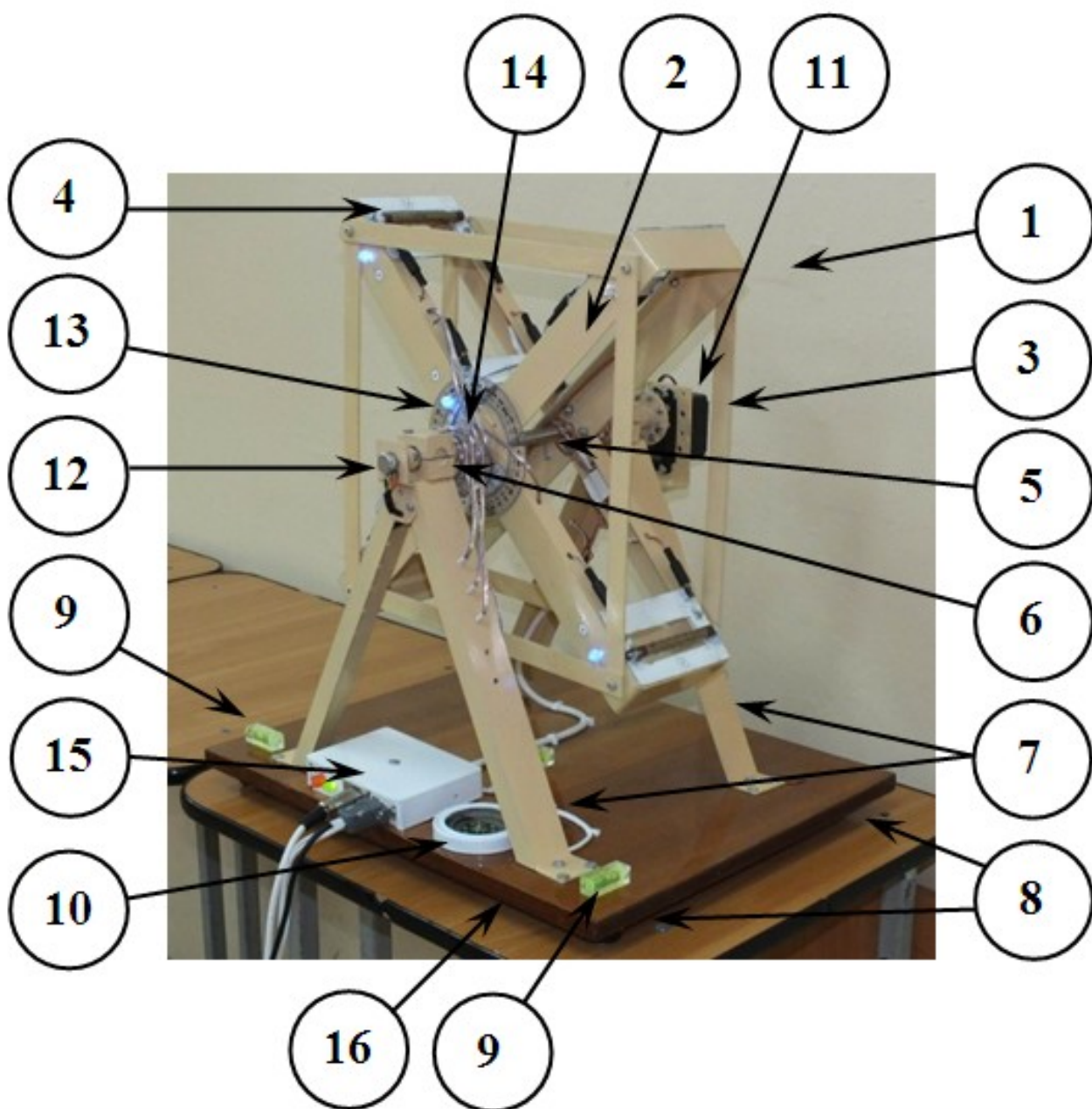


Рис.13. Счётчики Гейгера для СМТКЛ. Слева направо: СБМ-20, СИЗБГ, СИ29БГ, СБМ-10.

## 2.5. Механическая подсистема СМТКЛ

### 2.5.1. Статика

Основу механической подсистемы прибора составляет **поворотная рама** (1 на рис.14), состоящая из 2-х **перекладин** (2 на рис.14), стянутых **штангами** (3 на рис.15) для обеспечения жёсткости конструкции. Рама и штанги изготовлены из алюминиевых уголков и полос.

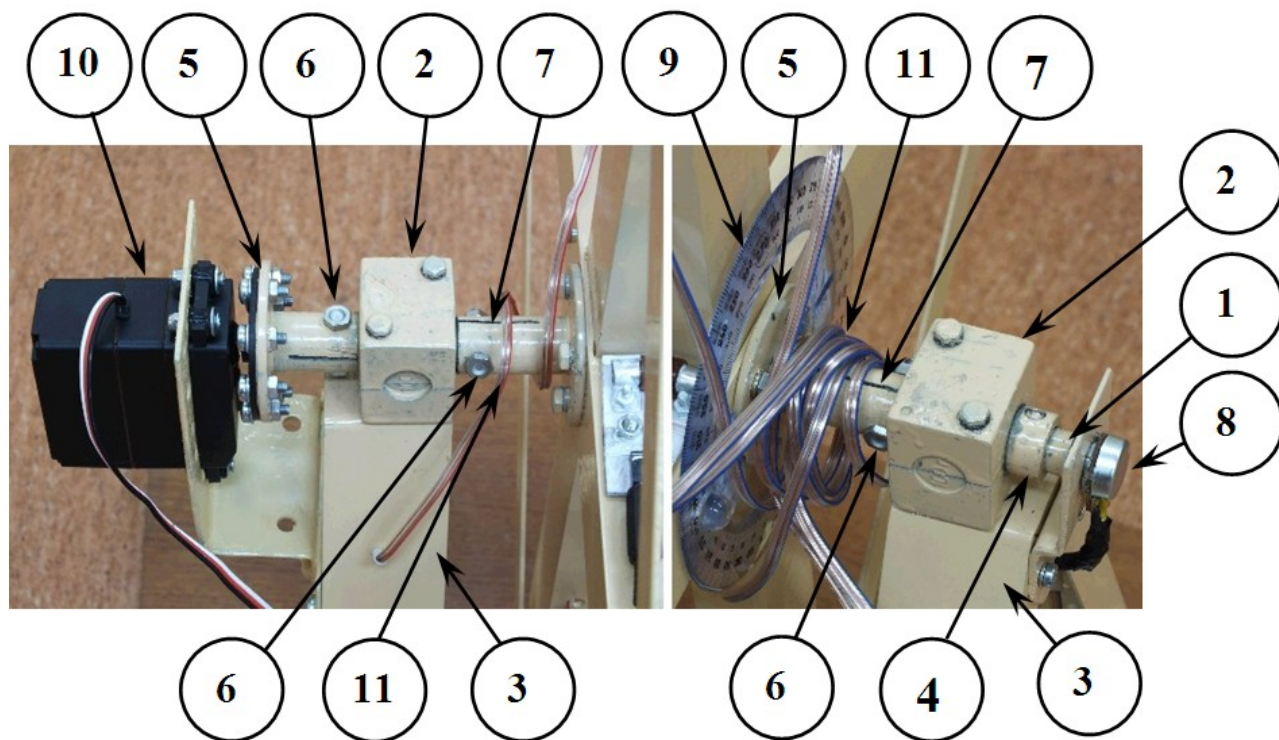


**Рис.14.** Общий вид сканирующего блока. 1 – поворотная рама, 2 – перекладины, 3 – штанги, 4 – посадочные места с площадками с регистрирующими приборами, 5 – ось, 6 – опора-подшипник, 7 – ножки станины, 8 – регулируемые ножки основания, 9 – уровни, 10 – компас, 11 – сервопривод (во время работы закрыт чехлом-экраном), 12 - энкодер (во время работы закрыт чехлом-экраном), 13 – шкала, 14 – проводка, 15 - распределительная коробка, 16 - основание

Одна из перекладин задаёт **главное направление** телескопа, по отношению к которому определяются все остальные его направления. На концах перекладин и в районе их соединения расположены 5 стандартизированных **посадочных мест** (4 на рис.14) для установки **съёмных площадок** с регистрирующими приборами (см. рис.9). Посадочные места

образованы стержнями болтов М4, которые ввинчены изнутри перекладин в резьбу, нарезанную в стенках перекладин и зафиксированы стопорными шайбами. Площадки крепятся к болтам гайками.

Поворотная рама закреплена на **оси** (5 на рис.14; 1 на рис.15), которая опирается на две **опоры-подшипника** (6 на рис.14; 2 на рис.15). Подшипники смазаны смазкой «Литол-24» и являются разборными для облегчения различных манипуляций с рамой и осью, если в этом возникает потребность.



**Рис.15.** Слева - заднее соединение оси с поворотной рамой и станиной, справа - переднее соединение. 1 – ось, 2 – опора-подшипник, 3 – ножки станины, 4 – упорное кольцо, 5 – фланец, 6 – штифт-болт, 7 – прорезь на фланце, 8 – энкодер (во время работы закрыт чехлом-экраном), 9 – шкала, 10 – сервопривод, 11 – оборот каждого провода вокруг оси вращения рамы

Подшипники закреплены на горизонтальных площадках **ножек станины** (7 на рис.14; 3 на рис.15), которые, в свою очередь, крепятся на деревянное полированное **основание** (16 на рис.14). Основание покоится на четырёх **регулируемых ножках** (по углам) (8 на рис.14), позволяющих точно выставить основание телескопа в плоскость горизонта. Для контроля горизонтальности основания на нём установлены два взаимно перпендикулярных **уровня** (9 на рис.14).

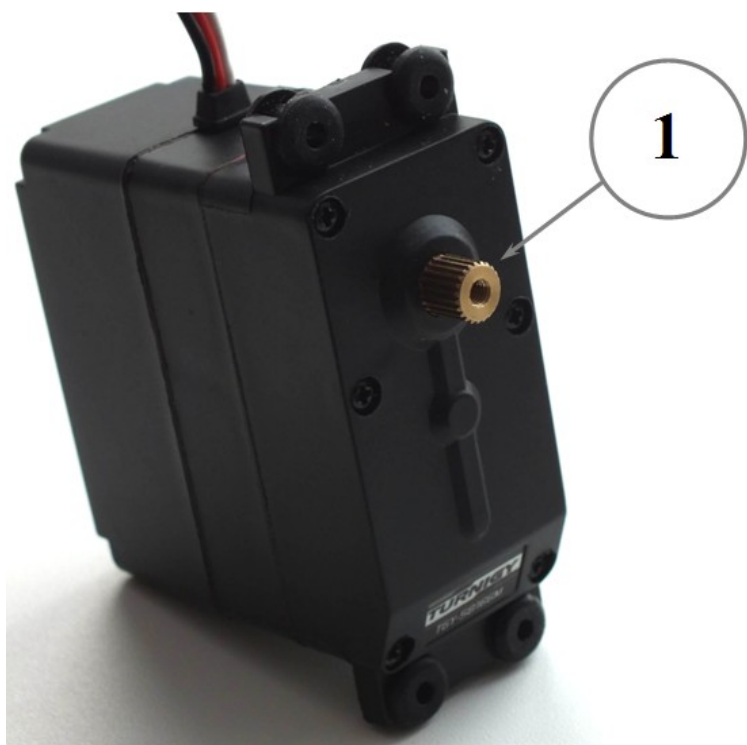
Для облегчения позиционирования плоскости сканирования телескопа в направлении «север-юг» в полевых условиях на его основание прикреплён **компас** (10 на рис.14). Впрочем, он выполняет лишь вспомогательную роль, позволяя вначале грубо сориентировать телескоп.

Поскольку предполагается работа телескопа в непростых метеоусловиях (на открытой местности, на крыше здания), то все его механические части, контактирующие с окружающей средой, покрашены **алкидной эмалью** бежевого цвета.

### 2.5.2. Динамика

**Исходным (стартовым) положением** рамы телескопа является положение, при котором его главное направление (3, 1) образует угол  $45^\circ$  к горизонту (к точке севера).

Поворотное усилие, необходимое для обеспечения сканирующих движений телескопа, развивается **сервоприводом** Turnigy S8166M (см. рис 16, а также 11 на рис.14 и 10 на рис.15) с максимальным вращающим моментом  $33 \text{ кгс} \times \text{см.}$ , максимальной скоростью поворота  $286^\circ/\text{сек.}$  и возможностью поворота на  $\pm 90^\circ$  от начального положения.



**Рис.16.** Сервопривод Turnigy S8166M. 1 – шлицевой вал



Сервопривод прикреплен к задней ножке станины телескопа на резиновых демпферах, предотвращающих большие перегрузки при рывках. В креплении использованы гайки с нейлоновыми вставками для предотвращения самостоятельного развинчивания.

Вращающий момент с сервопривода передается через его **шлицевой вал** (1 на рис.16) на **ось** телескопа (5 на рис.14; 1 на рис.15), а с неё – на поворотную раму с помощью системы **фланцевых соединений** (5 на рис.15) и **болтовых штифтов** (6 на рис.15). В хвостовых частях фланцев сделаны осевые прорези (7 на рис.15), формирующие на них зажимные лепестки и превращающие их в своеобразные «**цанговые зажимы**», стягиваемые болтовыми штифтами и плотно зажимающие ось. Такое внимание к качеству данных соединений обусловлено тем, что допуски на поворотный люфт в них установлены нами в  $1^\circ$ , что при диаметре оси 12 мм. является достаточно серьезным требованием. Однако, эти требования нами были выдержаны.

На передней ножке станины закреплен **энкодер** (датчик поворота) (12 на рис.14; 8 на рис.15). В качестве энкодера мы использовали переменный резистор в 100 кОм. Ось резистора вставлена в соосно высверленное в оси отверстие и зафиксирована с двух сторон винтами М3, ввинченных в стенки образовавшейся полости (в отверстиях нарезана резьба). Головки винтов находятся внутри отверстий **упорного кольца** (4 на рис.15).

Для визуального контроля угла поворота на поворотной раме установлена **шкала** (13 на рис.14; 9 на рис.15) с шагом  $1^\circ$  и указателем, находящимся между передними ножками станины.

На этапе проточной сборки механическая часть была испытана раскруткой поворотной рамы до скорости 5-10 об/сек. Уровень биений, эксцентricности, несоосности элементов конструкции, а также качество подшипников были признаны нами вполне удовлетворительными. Заметим что максимальная штатная скорость вращения поворотной рамы -  $286^\circ/\text{сек.}$ , т.е. на порядок меньше.

## 2.6. Электронная подсистема СМТКЛ

### 2.6.1. Сканирующий блок

С целью обеспечения возможности многочасового наблюдения в сложных метеоусловиях на сканирующем блоке располагается **минимум электроники**. Тем не менее, она есть. Электронная часть сканирующего блока состоит, в основном, из **проводки** (14 на рис.14), выполненной различными видами кабеля с определённой цветовой маркировкой:

- красный – подача +400 вольт на счётчики,
- серебристый – общий, земля,
- синий – сигналы от счётчиков,
- прозрачный – внешние светодиоды (на поворотной раме вблизи регистрирующих приборов).

Проводка проходит внутри переключателя поворотной рамы и переходит в районе оси вращения на станину, по ножкам которой через основание она идёт в **распределительную коробку** (15 на рис.14), на внешней стенке которой расположены разъёмы для подключения кабеля от блока управления. Для уменьшения перегибов проводов при выполнении сканирующих движений поворотной рамы, каждый провод проходит с оборотом вокруг оси вращения рамы (11 на рис.15).

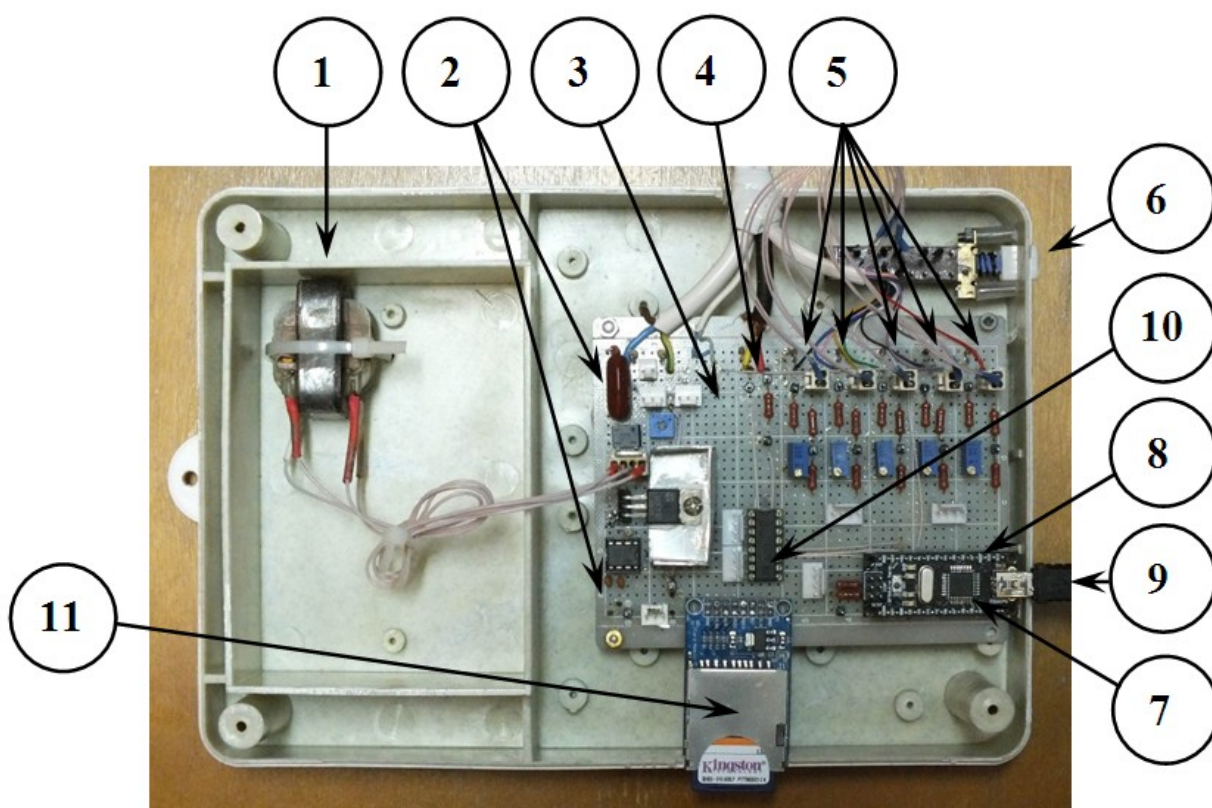
Кроме проводки, в электронную часть сканирующего блока входят: неоновый и светодиодный **индикаторы питания** (соответственно, 400 и 6 вольт) с соответствующими **резисторами**, **регистрирующие приборы** (сейчас это **счётчики Гейгера СБМ-20**) на съёмных площадках с разъёмами, **резистор 5,1 мОм** для обеспечения оптимального режима работы счётчиков, **сервопривод**, внешние **светодиоды** вблизи каждого счётчика, которые индицируют их срабатывание и **энкодер** (переменный резистор 100 кОм). Индикаторы питания и разъёмы для подключения кабеля от блока управления выведены на переднюю панель распределительной коробки.

## 2.6.2. Блок управления

Состоит из следующих подсистем:

- микроконтроллер ATmega 328 на плате Arduino Nano (7, 8 на рис.17),
- преобразователь напряжения 10 – 400 вольт для питания счётчиков Гейгера (1, 2 на рис.17),
- регулируемые нижние плечи делителей напряжения со счётчиков (5 на рис.17),
- каналы управления сервоприводом (3 на рис.17) и энкодера (4 на рис.17),
- каналы управления светодиодами (5 на рис.17),
- наружная панель управления (см. рис.11).

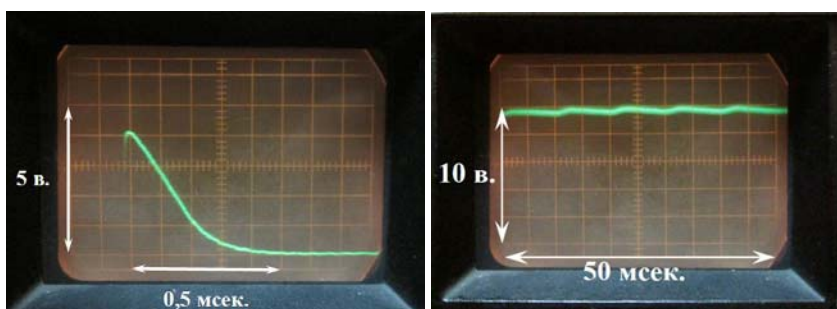
Питается блок управления от напряжений 10 вольт (электроника, преобразователь 9 – 400 вольт) и 6 вольт (питание сервопривода), подаваемых с блока питания.



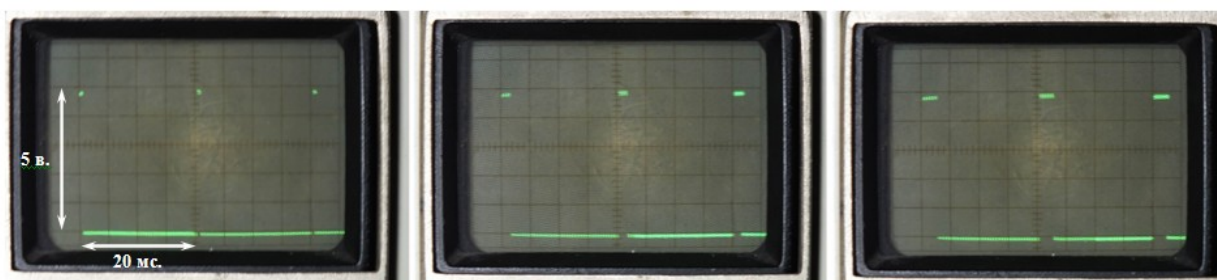
**Рис.17.** Внутренний вид блока управления. 1 – высоковольтный трансформатор, 2 - преобразователь напряжения 10 – 400 вольт, 3 – канал сервопривода, 4 - канал энкодера, 5 - каналы счётчиков и светодиодов, 6 – кнопка включения внешних светодиодов, 7 - микроконтроллер ATmega 328, 8 - плата Arduino Nano, 9 – USB-разъём, 10 – микросхема – сдвиговый регистр, 11 – слот под SD-карту

В высоковольтном канале предусмотрена регулировка выходного напряжения в пределах 380 – 460 вольт. Имеется возможность включения/выключения внешних светодиодов (на поворотной раме рядом с площадками) посредством кнопки 6 (см. рис.17). Микросхема – сдвиговый регистр M74HC595BL (10 на рис.17) - предназначена для управления по интерфейсу SPI линейной 10-разрядной светодиодной шкалой (см.рис.11), индицирующей показания энкодера. По этому же интерфейсу управляется и SD-карта (11 на рис.17). На плате Arduino Nano имеется USB-разъём, который выводится наружу (9 на рис.17).

Для удобства отладки на ключевых местах платы блока управления выведены на её верхнюю часть **контрольные точки**. Ниже приведены осциллограммы с некоторых контрольных точек.



**Рис.18.** Слева - импульсы со счётчика Гейгера СБМ-20 (вторая половина), справа - пульсация напряжения в цепи 10 вольт при полной нагрузке



**Рис.19.** Управляющие ШИМ-сигналы, идущие от контроллера к сервоприводу. Кодированные сигналами углы поворота сервопривода – слева направо: 0°, 90°, 180°.

Из блока исходит 7-метровый кабель, разделяющийся на силовую и информационную части, подключающийся к сканирующему блоку.

### 2.6.3. Блок питания

Блок запитан от сети 220 вольт 50 Гц через сетевой кабель с заземляющим проводом. На входе прибор защищён **предохранителем 0,25А**. **Сетевой выключатель** светящийся, двухпроводной, что обеспечивает безопасность работы со схемой при его выключении.

В основе электроники блока – **унифицированный трансформатор ТН-22**. Напряжения с подобранных вторичных обмоток которого выпрямляются при помощи **диодных мостов BR-610** (6А, 1000 В), и сглаживаются посредством **сглаживающих конденсаторов**. Номиналы конденсаторов подобраны так, чтобы обеспечить достаточный уровень пульсации напряжения на выходах. На выходе 10 вольт оно составляет примерно 5% (см. рис. 18). Этого достаточно для электроники, поскольку на плате Arduino Nano имеется стабилизатор напряжения на 5 вольт, который устраняет эти пульсации.

Первичная и вторичная обмотки **гальванически развязаны**, что увеличивает безопасность при работе с прибором.

Блок выдаёт напряжения **6 и 10 вольт** с требуемыми параметрами по току и пульсации напряжения. Наличие напряжений на выходе индицируется, соответственно, большими (10 мм.) зелёным и синим **светодиодами**, ток в которых регулируют **резисторы**.

## 2.7. Информационная подсистема СМТКЛ

Информационная подсистема СМТКЛ состоит из двух уровней: **внутреннего** (в управляющем блоке СМТКЛ на базе платы с микроконтроллером) и **внешнего** (на базе внешнего компьютера).

### 2.7.1. Внутренний уровень

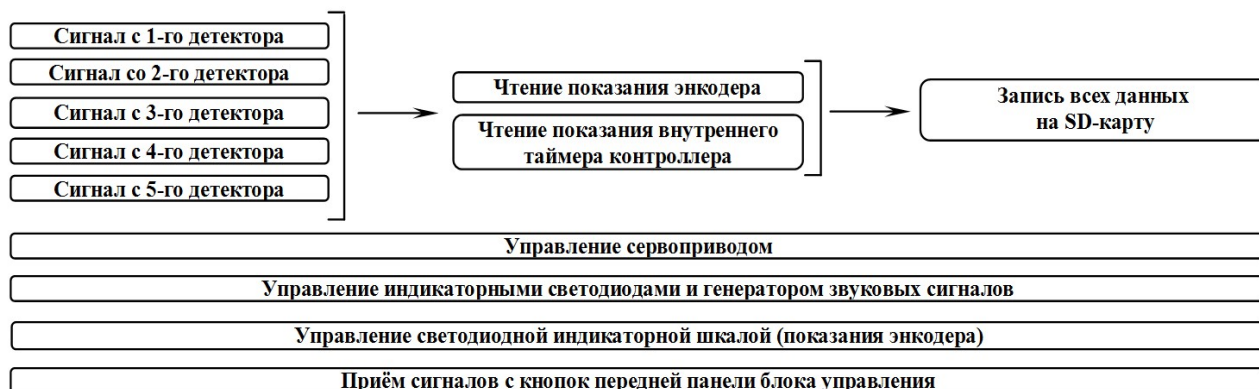
Выполнен на базе аппаратной вычислительной платформы **Arduino Nano w/ATmega 328** (см. таблицу 2).

**Таблица 2.** Краткие характеристики Arduino Nano w/ATmega 328 (по [7])

Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение (уровень логической единицы)	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	8
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Максимальный общий ток со всех выходных пинов	300 мА
Флеш-память	32 Кб при этом 2 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб
EEPROM	1 Кб
Тактовая частота	16 МГц
Размеры	1.85 см x 4.2 см

Её основными компонентами которой являются простая плата ввода-вывода и среда разработки на языке **Processing/Wiring**.

Общая схема работы внутреннего уровня представлена на рис.20.



**Рис.20.** Общая схема работы контроллера ATmega328

Программа контроллера регистрирует и обрабатывает все события, происходящие на телескопе и осуществляет их запись на SD-карту, формируя массив «сырых» данных.

**Основной проблемой**, с которой мы здесь столкнулись, была проблема согласования управления «быстрых» устройств (счётчиков Гейгера, импульсы с которых длятся порядка **1 мсек.** – см. рис.18) и «медленных» устройств – сервопривода и индицирующих импульсы счётчиков светодиодов и генератора

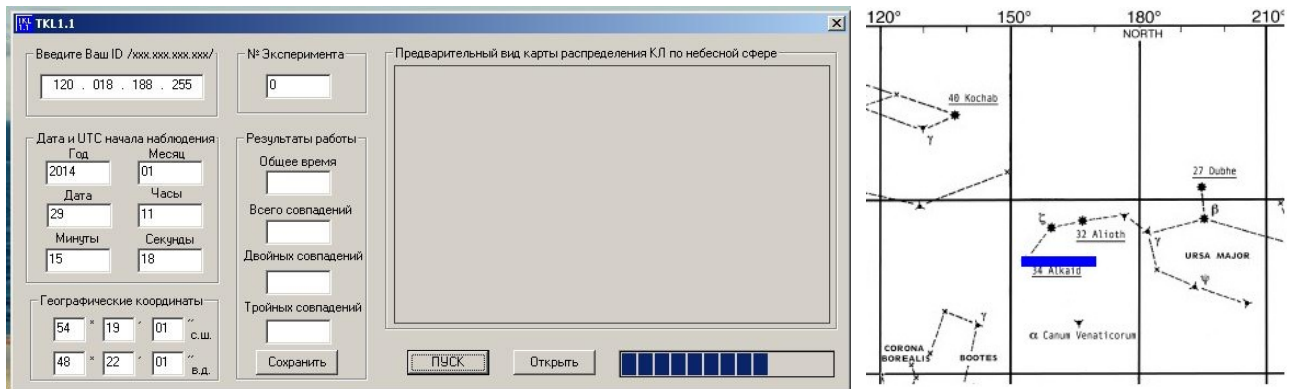
звукового сигнала. Сервопривод, как видно из рис.19, требует для адекватного управления времени не менее 20 мсек. Светодиоды и звуковой сигнал, хотя и могут включаться ровно на время импульса (т.е., на 1 мсек.), но, как мы установили экспериментально, это не очень комфортно для индикации. Наиболее комфортная длительность сигнала индикации: 30 – 50 мсек. Однако, если организовывать включение и выключение сигнала с помощью комбинации команд «включить» - «подождать 30 мсек.» - «выключить», то за время этого ожидания контроллера он может пропустить «быстрые» события – срабатывание счётчиков. По-сути, речь идёт о необходимости организации **нескольких параллельных процессов**, показанных горизонтальными цепочками на рис.20, не мешающих друг другу в плане расходования ресурса времени. Решение этой проблемы с помощью **аппаратных прерываний** контроллера мы не стали рассматривать, поскольку Arduino Nano имеет только 2 пина для внешних прерываний, чего недостаточно для наших 5-ти счётчиков.

Мы решили эту проблему путём введения для каждого процесса переменных, отражающих его текущее состояние. Программа лишь опрашивает их все по очереди, выполняя необходимые быстрые действия в зависимости от значений переменных и текущего времени, тем самым, не задерживаясь надолго ни на одном из этих процессов.

### 2.7.2. Внешний уровень

Реализован в виде **обрабатывающей программы ТКЛ 1.0** на внешнем компьютере для анализа массива «сырых» данных на предмет совпадений срабатывания счётчиков, что идентифицируется, как пролёт частицы через них. Затем, используя введённые в неё географические координаты места наблюдения, время начала наблюдения и данные о геометрии ТКЛ из таблицы 1 и допущение, показанное на рис.7, программа находит угловую высоту направления зафиксированного прилёта частицы и время этого события, после чего по известным формулам сферической тригонометрии находит склонение и прямое восхождение направления прилёта частицы и рисует на карте звёздного

неба (в прямоугольной проекции) синий прямоугольник, соответствующий данному направлению плюс-минус разрешающая способность телескопа по осям (из таблицы 1) (см.рис.21).



**Рис.21.** Слева - скриншот работы программы TKL 1.1, справа – результат её работы

Следующие версии программы TKL предполагают дополнение, по желанию исследователя, блоками, отвечающими за поиск других сложных событий и закономерностей в массиве данных, которые он захочет выявить в этом массиве. Совокупность всех файлов «сырых» данных образует **архив наблюдений**, к которому исследователь сможет обращаться и позже.



### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые испытания показали, что все блоки и подсистемы телескопа работают в заданных режимах и с заданными погрешностями и допусками.

Сейчас мы работаем над доводкой и **усовершенствованием** прибора.

**Следующей нашей задачей** является накопление и анализ статистики по наблюдениям КЛ.

**Перспективой данной работы** нам видится создание более совершенной и дорогой аппаратуры космического базирования малых габаритов с высоким угловым разрешением (до  $0.09^\circ$ ) на основе МЛФД (ГР) (см. рис.10) и других современных регистрирующих приборов, использующей опробованные нами в данной работе идеи. Это откроет возможности для создания карты углового распределения КЛ для исследования их пространственной анизотропии, поиска их корреляций с источниками электромагнитного излучения (рентгеновскими и радиопульсарами, источниками гамма-всплесков, квазарами, активными ядрами галактик) и реликтовым излучением. Конечно, решение этой задачи возможно только при заинтересованности в этом соответствующих крупных космических организаций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.Н.Калмыков, Г.В.Куликов, Т.М.Роганова Галактические космические лучи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kosmofizika.ru/abmn/kalmikov/cosrays.htm> (дата обращения: 21.01.2014).
2. Астрофизика космических лучей (Кафедра физики космоса МГУ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cosmos.msu.ru/kafedra/cr.html> (дата обращения: 21.01.2014).
3. Альтшуллер Г.С. Маленькие необъятные миры: стандарты на решение изобретательских задач В сб. «Нить в лабиринте». - Петрозаводск: Карелия, 1988. - С. 165-230. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.altshuller.ru/triz/standards.asp> (дата обращения: 21.01.2014).
4. Альтшуллер Г.С., Типовые приемы устранения технических противоречий, 1973 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.altshuller.ru/triz/technique1.asp> (дата обращения: 21.01.2014).
5. Космические лучи. Их состав и происхождение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://phys.bsu.edu.ru/resource/nphys/spargalka/039.htm> (дата обращения: 21.01.2014).
6. Гуськов А. Жемчугов А., Шелков Г. Ливни знаний (ОИЯИ, г. Дубна). В журнале «Наука и жизнь» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nkj.ru/archive/articles/21974> (дата обращения: 21.01.2014).
7. Arduino Nano [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano> (дата обращения: 21.01.2014).