

Эксперимент ЛОРД по регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий с окололунного спутника

Проблемы регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий

Изучение природы и спектров космических частиц с предельными, существующими во Вселенной энергиями, является одной из наиболее актуальных задач современной науки [1, 2]. Информация о природе таких частиц важна для решения фундаментальных проблем астрофизики и физики элементарных частиц, касающихся источников и механизмов ускорения космических лучей, а также природы темной материи [3].

Основная трудность при регистрации космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) связана с редкостью этих событий. Если при энергии $E_{CR} \geq 10^{19} \text{ эВ}$ интегральный поток КЛУВЭ равен $\sim 1 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, то при $E_{CR} \geq 10^{20} \text{ эВ}$, этот поток не превышает одной частицы на 1 км^2 в столетие. В общей сложности в экспериментах зарегистрировано всего несколько десятков ливневых событий КЛУВЭ с энергиями $E_{CR} > 5 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$. Очевидно, что для регистрации КЛУВЭ необходимы детекторы с огромными площадями, в которых регистрируются вторичные частицы, входящие в состав широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В настоящее время уже работают детекторы КЛУВЭ нового поколения с очень большой апертурой. Среди них недавно введенная в строй установка AUGER [4, 4] и Telescope Array [5]. Площадь покрытия детекторами в двух массивах установки AUGER составляет $6 \times 10^3 \text{ км}^2$, а в установке Telescope Array – около 10^3 км^2 . Однако, эти детекторы, по-видимому, близки к пределу по площади обзора, достижимой для наземных детекторов.

Следующий шаг на пути регистрации частиц с предельно высокими энергиями связан с выходом в космическое пространство. В проекте JEM-EUSO предполагается установить детектор на Международной Космической станции [7] и из космоса, наблюдая за затененной поверхностью Земли, регистрировать флуоресцентный свет в атмосфере от ШАЛ, образованных КЛУВЭ. Кроме того, возможна регистрация черенковского света, отраженного от поверхностей морей и океанов. Эффективная апертура детектора JEM-EUSO составит около $10^5 \text{ км}^2 \text{ ср}$. Несколько меньшим по масштабам является российский проект ТУС [8]. В экспериментах космического базирования возможно также наблюдать горизонтальные ливни в атмосфере Земли, инициированные нейтрино.

Несмотря на прогресс в создании установок, позволяющих регистрировать КЛУВЭ, имеется неоднозначность в интерпретации данных экспериментов, в которых восстановленная энергия первичной частицы превышает $E_{CR} \approx 10^{20} \text{ эВ}$. В первую очередь это обусловлено недостаточностью апертур даже гигантских установок, просматривающих площади в несколько тысяч км^2 . Может оказаться, что апертуры наземных установок AUGER, Telescope Array и даже космического детектора EUSO будут недостаточно велики, чтобы надежно регистрировать КЛУВЭ с энергиями $E_{CR} \geq 10^{20} \text{ эВ}$ (если такие существуют в Природе).

Главной задачей нейтринной астрономии сегодняшнего дня является регистрация нейтрино ультравысоких энергий (НУВЭ). Такие нейтрино могут образовываться в удаленных астрофизических источниках, при распадах сверхмассивных частиц, а также при распространении КЛУВЭ в межзвездной среде. Имеются серьезные основания предполагать существование астрофизических и космологических источников нейтрино с энергиями, различающимися более чем на 10 порядков – от нескольких единиц 10^{12} эВ до $10^{22} - 10^{24} \text{ эВ}$. Астрофизическими источниками, в которых протоны или ядра могут быть ускорены до энергий $\sim 10^{20} \text{ эВ}$, являются гамма-всплески и активные ядра галактик. В

таких "космических ускорителях" в результате pp - и $p\gamma$ -взаимодействий должны рождаться заряженные пионы, распады которых должны приводить к образованию потоков нейтрино с энергиями, достигающими $E_\nu \approx 10^{19} \text{ эВ}$. Нейтринные потоки могут возникать и при распадах или аннигиляции сверхмассивных частиц, которые образовались на ранней стадии эволюции Вселенной и дожили до наших дней. Максимальные энергии нейтрино в этих сценариях зависят от массы распадающихся тяжелых частиц и могут простираются до $E_\nu \approx 10^{24} \text{ эВ}$. "Гарантированным" источником нейтрино сверхвысоких энергий являются реакции взаимодействия распространяющихся КЛУВЭ во Вселенной, с космическим микроволновым фоном. Распады пионов, образованных в реакциях фоторождения, приводят к потоку так называемых "космогенных" нейтрино, энергетический спектр которого имеет максимум при энергиях $E_\nu \approx 10^{19} \text{ эВ}$. Однако величина этого потока неоднозначна из-за неопределенностей, связанных с видом исходного спектра протонов в источнике, распределением источников протонов по красным смещениям и их эволюцией. Возможность измерения потока космогенных нейтрино обычно служит отправной точкой при оптимизации апертур проектируемых нейтринных детекторов.

Создаваемые нейтринные телескопы нового поколения (ANTARES, KM3NeT, IceCube + IceTop) имеют чувствительные объемы более 1 км^3 и позволяют регистрировать НУВЭ с энергиями вплоть до $E_\nu \approx 10^{19} \text{ эВ}$. Однако, если поток космических нейтрино окажется меньше, чем предсказывается в наиболее распространенных моделях, то просматриваемых объемов воды и льда $\sim 1 \text{ км}^3$, будет не достаточно для его обнаружения.

Для обнаружения космических лучей и нейтрино с энергиями $E \geq 10^{20} \text{ эВ}$, требуется создание установок, работающих на новых принципах и методах регистрации. В последние годы широкое распространение получил метод, основанный на регистрации когерентного черенковского радиоизлучения каскадов, порожденных частицами ультравысоких энергий.

Радиометод регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий

Радиометод регистрации космических лучей и нейтрино был впервые предложен Г.А. Аскарьяном еще в начале 60-х годов [9, 10]. Как известно, при движении заряженной частицы в среде со скоростью v , превышающей фазовую скорость света в этой среде ($v > c/n$, где n – коэффициент преломления для данной среды), возникает излучение Вавилова-Черенкова. В оптической области это излучение широко используется для регистрации, как одиночных релятивистских частиц, так и каскадов частиц. Поскольку процессы рождения пар и тормозного излучения в кулоновском поле атомных ядер, которые определяют развитие каскадов при высоких энергиях ливневых частиц, симметричны по зарядам, то в первом приближении (учитывающем только энергичные ливневые частицы), ливень является электрически нейтральным. Когда длина волны излучения становится больше расстояния между частицами в ливне, деструктивная интерференция должна приводить к взаимному сокращению излучения от положительно и отрицательно заряженных частиц. Поэтому можно ожидать, что ливень не должен излучать в радиодиапазоне. Однако, как было впервые замечено Г.А. Аскарьяном, значительное число ливневых частиц имеют энергии порядка 30 МэВ и ниже, при которых существенно не только взаимодействие с ядрами, но также взаимодействие с атомными электронами

$$\gamma + e_{at}^- \rightarrow \gamma + e^-, \quad e^+ + e_{at}^- \rightarrow e^+ + e^-, \quad e^- + e_{at}^- \rightarrow e^- + e^-.$$

Это взаимодействие приводит к "вытягиванию" электронов из атомов окружающего вещества в ливень и к возникновению зарядовой асимметрии ШАЛ – избытку

отрицательных зарядов в ливневом диске. В целом этот избыток составляет величину порядка 20 – 30% от полного числа электронов. Быстрые электроны этого избытка с энергиями, которые превышают порог черенковского излучения, излучают радиоволны.

Важнейшим преимуществом радиометода является возможность использования очень большой длины распространения радиоволн, что позволяет обеспечить просмотр огромных объемов атмосферы или других прозрачных для радиоизлучения сред, и регистрировать с высокой статистической обеспеченностью редкие события при ультравысоких энергиях. Применение радиометода особенно целесообразно при ультравысоких энергиях, поскольку мощность когерентного радиосигнала растет квадратично с энергией ливня, и при высоких энергиях мощность излучения в радиодиапазоне превосходит мощность излучения в оптической области. Используя радиометод можно обеспечить просмотр огромных объемов прозрачных для радиоизлучения сред и регистрировать с высокой статистической обеспеченностью редкие события при ультравысоких энергиях [11].

К настоящему времени радиометод регистрации нейтрино ультравысоких энергий с использованием ледяных мишеней был апробирован в экспериментах FORTE [12], RICE [13] и ANITA [14, 15]. В эксперименте FORTE просматривался ледяной массив Гренландии объемом $\sim 1,8 \times 10^6 \text{ км}^3$ антеннами со спутника с околоземной орбиты. В эксперименте RICE используются 20 антенн с приемными устройствами, вмороженных в лед Антарктиды на глубины 100–300 м. В эксперименте ANITA осуществляется регистрация 36 антеннами, которые при пролете аэростата над массивом Антарктиды на высоте $\sim 40 \text{ км}$ обеспечивают просмотр ледяной мишени объемом $\sim 9 \cdot 10^5 \text{ км}^3$. К настоящему времени осуществлено два полета аэростата общей продолжительностью 66 дней. Анализ наблюдаемых во всех этих экспериментах радиосигналов не выявил кандидатов на взаимодействия высокоэнергичных нейтрино во льду.

Следует отметить, что в экспериментах с наземными ледяными мишенями (массивы Гренландии и Антарктиды) возможно регистрировать только каскады, инициированные нейтрино сверхвысоких энергий, так как космические лучи (протоны и ядра) не достигают ледяной мишени, начиная взаимодействовать уже в верхних слоях атмосферы Земли.

Идея использовать Луну в качестве мишени для регистрации КЛУВЭ и НУВЭ радиометодом впервые была высказана Г.А. Аскарьяном [10]. Ее суть заключается в том, что рождение каскадов и генерация радиоизлучения происходит в приповерхностном слое лунного грунта - радиопрозрачного реголита, состоящего из мелких частиц и небольших камней, выброшенных при ударах метеоритов о поверхность Луны. Толщина реголита обычно составляет 10–30 м. Радиоизлучение генерируется каскадом от высокоэнергичной частицы в области углов вблизи черенковского конуса и в широком частотном диапазоне. Часть этого излучения после преломления на границе "реголит-вакуум" выходит из лунного грунта и может быть зарегистрирована радиотелескопом. Поскольку у Луны отсутствует атмосфера, то можно регистрировать взаимодействия с лунным грунтом как КЛУВЭ, так и НУВЭ.

В работе [16] Р.Д. Дагкесаманский и И.М. Железных предложили для этой цели использовать наземные радиотелескопы. Австралийский радиотелескоп Parces с диаметром зеркала 64 м впервые в 1996 г. был использован для регистрации радиоизлучения от каскадов из лунного лимба [17]. В эксперименте GLUE [17] были задействованы два радиотелескопа NASA с диаметрами зеркал 70 м и 34 м, разнесенные на расстояние 22 км. Суммарное время наблюдения импульсов радиоизлучения, возникающих при взаимодействиях нейтрино в лунном реголите, составило около 120 часов. Первые серии измерений в эксперименте NuMoon [18] проводились на массиве радиотелескопов WSRT, состоящим из четырнадцати 25 м параболических антенн и расположенных вдоль линии длиной 2,7 км. Были сформированы два разнесенных луча, каждый из которых покрывал 1/3 лунной поверхности. Максимально время регистрации

каскадов от частиц ультравысоких энергий составило 46,7 часа [19]. Дальнейшие измерения предполагается проводить на создаваемом массиве радиотенн LOFAR, размещенном на площади $3 \cdot 10^4 \text{ км}^2$ [20].

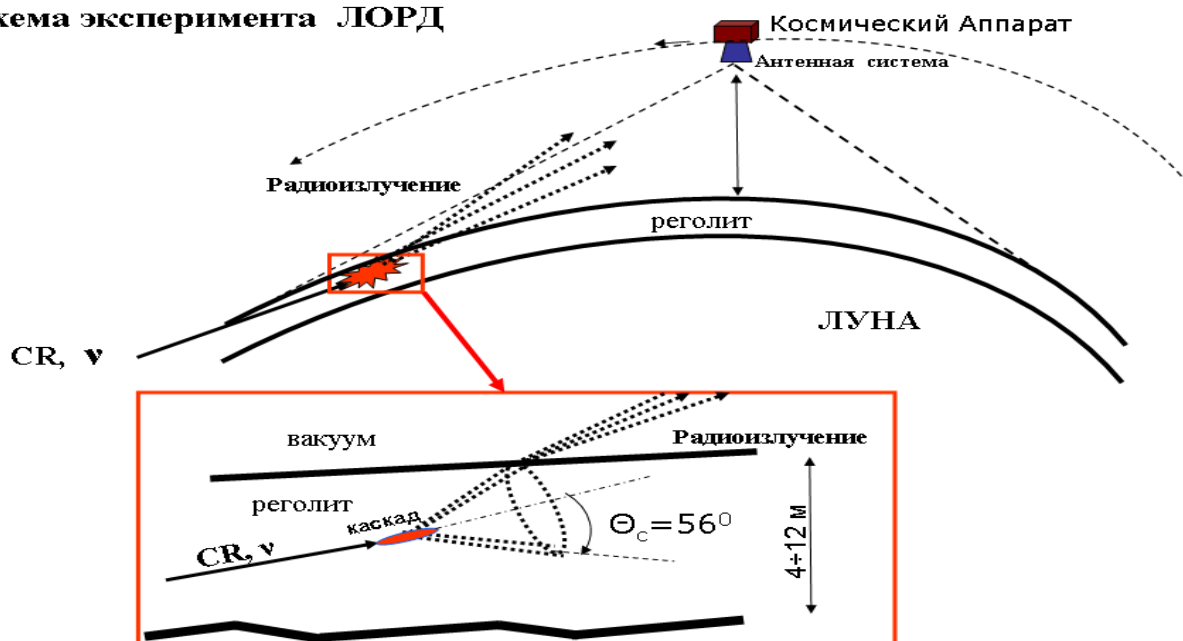
Впервые зарегистрировать КЛУВЭ и НУВЭ с окололунного спутника было предложено при разработке концепции эксперимента ЛОРД (Лунный Орбитальный Радио Детектор) в работе [21]. Регистрация радиосигналов с лунной орбиты дает преимущества по сравнению с регистрацией радиотелескопами с Земли. Они обусловлены меньшим расстоянием (100–1000 км для случая спутника по сравнению с $\sim 4 \cdot 10^5 \text{ км}$ при наземной регистрации с помощью радиотелескопов) и несравненно более благоприятными фоновыми условиями. Развитие концепции регистрации КЛУВЭ и НУВЭ в эксперименте ЛОРД описано в работах [22, 23, 24, 25, 26].

Для дальнейшего развития радиометода регистрации КЛУВЭ и НУВЭ в космических экспериментах в работах [27, 28] проведен анализ возможностей использования ледяных спутников Юпитера и Сатурна в качестве мишеней для регистрации частиц с самыми высокими, существующими в Природе энергиями.

Регистрации космических лучей и нейтрино радиометодом в эксперименте ЛОРД

Схема регистрации космических лучей и нейтрино в эксперименте ЛОРД приведена на Рис. 1. Падающая частица при взаимодействии с веществом мишени генерирует каскад, избыточный отрицательный заряд которого формирует черенковское радиоизлучение, распространяющееся в конусе с угловой шириной $\Delta\theta_c$. При пересечении поверхности радиоволны преломляются по законам геометрической оптики и распространяются в космическое пространство на большие расстояния. Излучение, достигая антенны, расположенной на космическом аппарате на высоте h , может быть зарегистрировано радиодетектором.

Схема эксперимента ЛОРД



Эксперимент ЛОРД – Лунный Орбитальный РадиоДетектор

Рис.1. Схема регистрации космических лучей и нейтрино в эксперименте ЛОРД.

Расчетная апертюра радиодетектора ЛОРД при регистрации космических лучей с энергиями выше 10^{20} эВ достигает $10^6 \text{ км}^2 \text{ ср}$, а при регистрации нейтрино с энергиями $E_\nu \geq 10^{21} \text{ ГэВ}$ превышает $10^3 \text{ км}^2 \text{ ср}$ (Рис.2).

На Рис.3. показаны ограничения на потоки космических лучей и нейтрино, которые можно получить в эксперименте ЛОРД. Ограничения на потоки КЛУВЭ и НУВЭ, которые можно получить в течение одного года наблюдений в эксперименте ЛОРД на окололунной орбите показаны на Рис.3. Эти ограничения существенно превосходят возможности наиболее амбициозных экспериментов AUGER и ANITA, проводимых в настоящее время. Такой высокий потенциал регистрации КЛУВЭ и НУВЭ обусловлен большими апертурами радиодетектора ЛОРД. Для космических лучей с энергиями $E_{\text{кл}} \geq 10^{20} \text{ эВ}$ полная апертюра ЛОРД составляет $2 \cdot 10^5 \text{ км}^2 \text{ ср}$, что почти на два порядка величины превышает апертюру эксперимента AUGER.

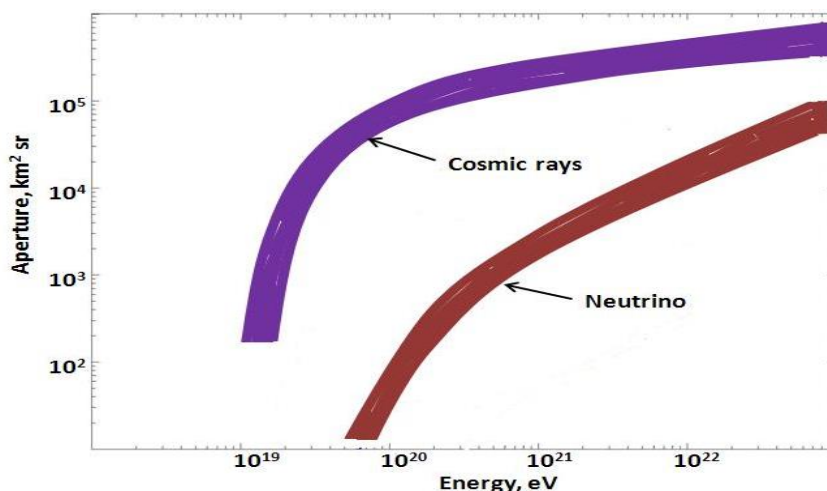


Рис.2. Апертура радиодетектора ЛОРД для регистрации каскадов частиц при взаимодействии космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий с лунным реголитом. Заштрихованные области соответствуют неопределенностям в параметрах, используемых в расчетной модели.

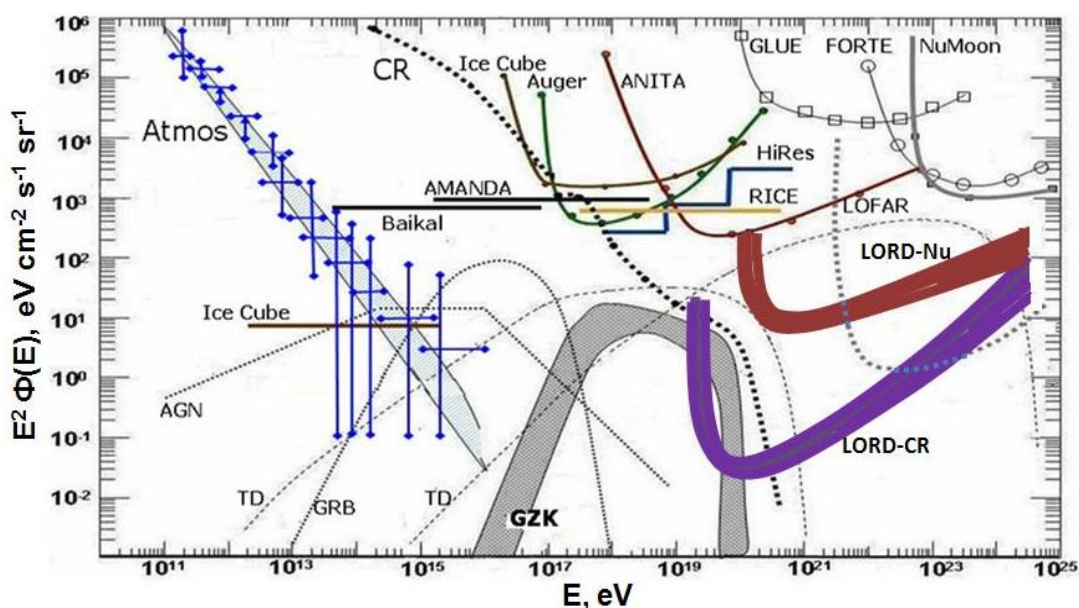


Рис.3. Ограничения на потоки космических лучей и нейтрино, которые можно получить в эксперименте ЛОРД (соответственно кривые LORD-Nu и LORD-CR). Также представлены модельные нейтринные потоки и ограничения других экспериментов по регистрации частиц ультравысоких энергий.

Экспериментальная аппаратура радиодетектора ЛОРД

Регистрация наносекундных импульсов в частотном диапазоне 200–800 МГц будет проводиться радиодетектором, состоящим из пары конических логопериодических антенн. Одна антенна обеспечивает прием сигналов с левой, а другая – с правой круговой поляризацией. Смоделированный вариант антенной системы приведен на Рис.4. Параметры антенны: двухплечевая коническая логарифмическая спираль с количеством витков 20х2. Высота конуса антенны – 1150 мм, диаметры конуса (вершина и основание) – 110 мм и 550 мм соответственно. Вес одной антенны без узлов крепления к спутнику составляет 10 кг. Антенны имеют встроенный малошумящий усилитель (Рис.4) со следующими характеристиками: коэффициент шума – не более 1,5 дБ; коэффициент усиления по напряжению – 17 ± 2 дБ.

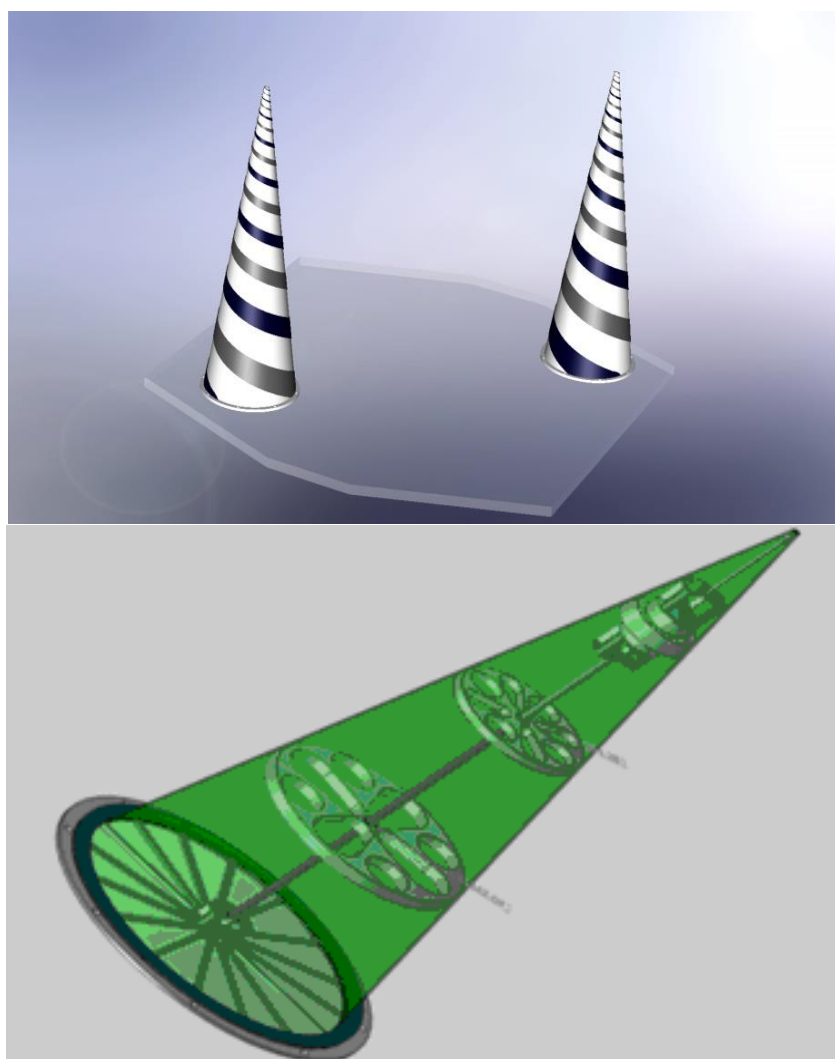


Рис.4. Смоделированный вариант антенной системы (слева) и внутренний вид антенны со встроенным малошумящим усилителем.

Система регистрации принимаемых сигналов содержит 2 канала и обеспечивает прием сигналов от малошумящих усилителей, усиление, фильтрацию, программную регулировку усиления с помощью цифровых управляемых аттенюаторов и преобразование принимаемых аналоговых сигналов в цифровые данные, непрерывную запись в быстродействующую память (Рис.5).

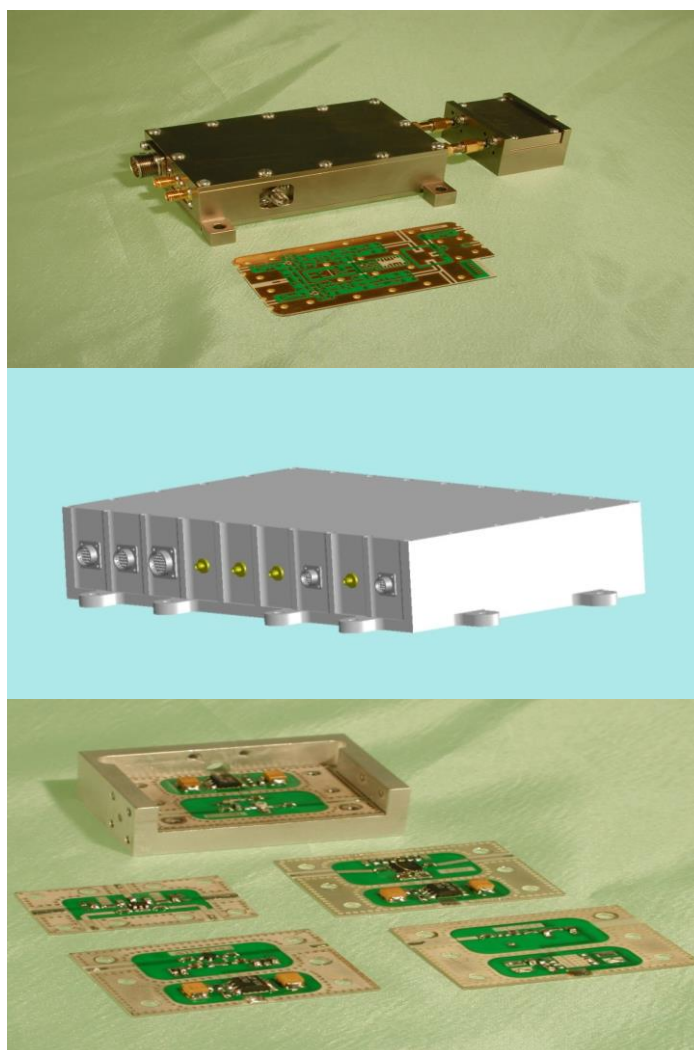


Рис. 5. Вверху: фотография малошумящего усилителя. В середине: фотография корпуса блока регистрации принимаемых сигналов. Внизу: фотографии плат электроники блока регистрации.

Сигналы от антенн поступают на аналоговую ВЧ- плату блока электроники и их спектры обрезаются низкочастотным фильтром на частоте 800 МГц . Суммарное усиление аналогового тракта >1000 . Аналоговые сигналы с ВЧ- платы поступают на быстродействующие АЦП. Потoki цифровых данных поступают на входы БИС с программируемой логикой (FPGA –Field Programming Gate Array), где они непрерывно записываются в память. Триггер на нейтринное взаимодействие формируется в виде совпадения сигналов превышающих пороги в любой паре антенн во временном окне $\sim 10 \text{ нс}$. При наступлении события формируется запись сигнала длительностью 2 мкс до триггерного сигнала и после (Рис.6). Данные из памяти FPGA записываются в память бортового компьютера для последующей обработки, упаковки, записи и передачи данных на Землю.

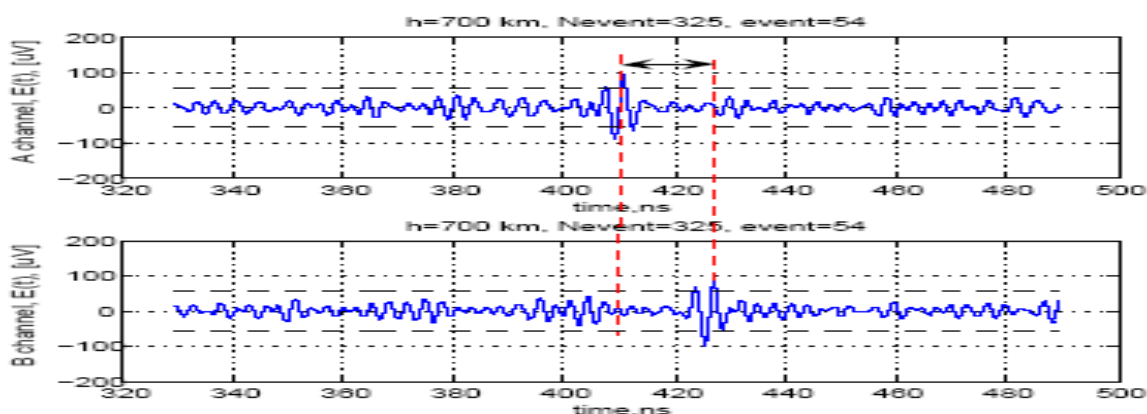


Рис. 6. Моделирование регистрации сигнала в эксперименте ЛОРД по триггеру. Логика триггера: Непрерывное сравнение данных в обоих каналах с уровнем порога. При превышении порога в любом канале запускается импульс длительностью 20 нс, совпадение этих импульсов является условием формирования триггера.

Эксперимент ЛОРД включен в Федеральную космическую программу России. Эксперимент ЛОРД, входящий в состав космического комплекса для исследования Луны и размещаемый на борту перелетного модуля космического аппарата «Луна-Глоб» осуществляется под научным руководством ФИАН (научный руководитель д.ф.-м.н. В.А. Рябов), а разработка и изготовление прибора ЛОРД возложены на ФГУП СКБ ИРЭ РАН. Разработка и создание всего комплекса научной аппаратуры размещаемой на космической платформе «Луна-Глоб» возложены на ИКИ РАН (научный руководитель академик Л.М. Зеленый). Унифицированная платформа для размещения научной аппаратуры «Луна-Глоб» разрабатывается ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина». Запуск космического аппарата «Луна-Глоб» с научной аппаратурой, включающей детектор ЛОРД запланирован на 2016 г. На Рис.7 показана схема размещения научной аппаратуры на космической платформе «Луна-Глоб», а на Рис.8 – схема выведения платформы на окололунную орбиту.

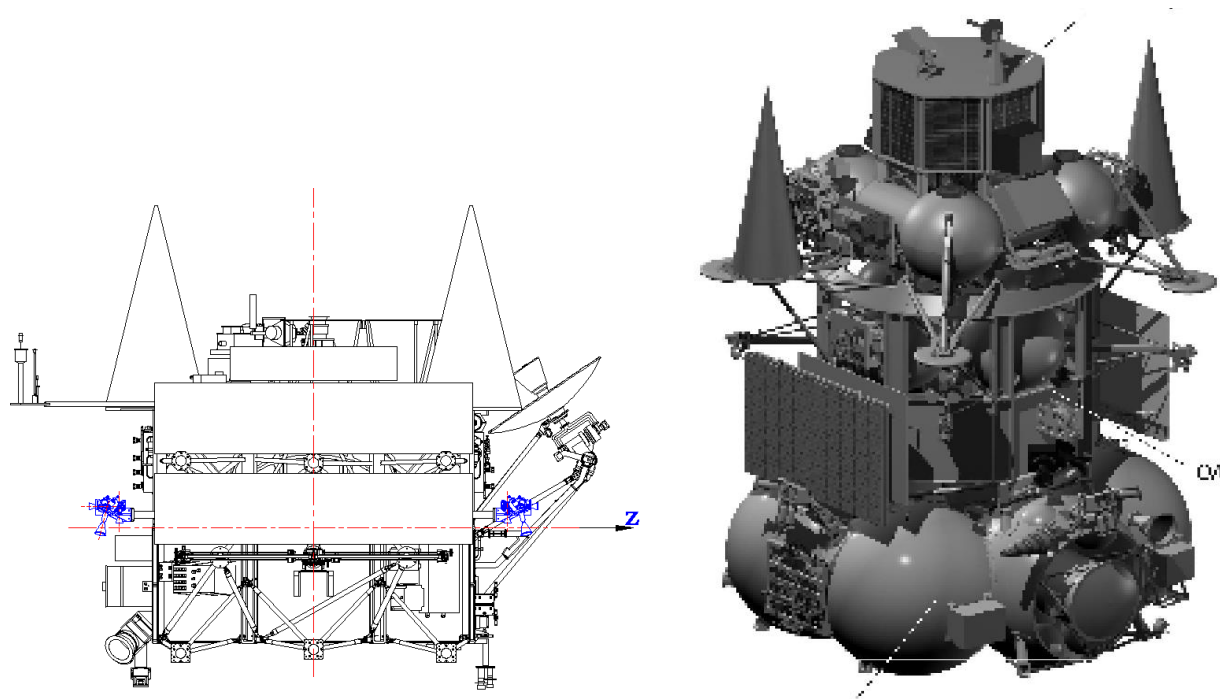


Рис. 7. Схема размещения научной аппаратуры на космической платформе «Луна-Глоб». Конусы – антенная система ЛОРД.

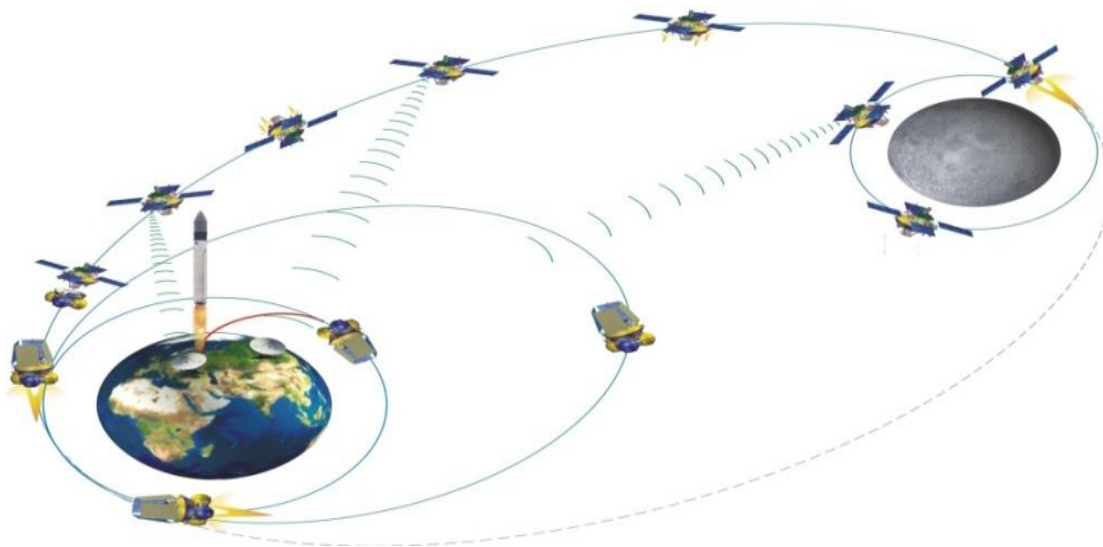


Рис.8. Схема выведения платформы «Луна-Глоб» на окололунную орбиту.

Литература

1. Рябов В А *УФН* **176** 931 (2006)
2. Рябов В.А. *ЭЧАЯ* **40** №1 5 (2009)
3. Рябов В А, Царев В А, Цховребов А М *УФН* **178** 1129 (2008)
4. Abraham J, Abreu P, Aglienta M et al. *Phys.Lett. B.* **685** 239 (2010)
5. Abreu P, Aglienta M, Ahlers M et al. *Phys.Rev.D* **84** 122005 (2011)
6. Tameda Y et al *Nuclear Physics B Proc.Suppl.* **196** 74 (2009)
7. Takahashi Y et al *New J. Phys.* **11** 065009 (2009)
8. Tkachev L, Abrashkin V, et al *Proc of the 30 ICRC, Merida, Mexico 3 – 11 July 2007*
9. Аскарьян Г А *ЖЭТФ* **41** 616 (1961)
10. Аскарьян Г А *ЖЭТФ* **48** 988 (1965)
11. Царев В А *ЭЧАЯ* **35** №1 187 (2004)
12. Lehtinen N., Gorham P., Jacobson A., Roussel-Dupre R. *Phys.Rev. D* **69** 013008 (2004)
13. Kravchenko I, Cooley C, Hussain S et al *Phys.Rev.D* **73** 082002 (2006)
14. Gorham P, Allison P, Barwick S et al *Phys.Rev.Lett.* **103** 051103 (2009)
15. Gorham P, Allison P, Vaughman B M et al *Phys.Rev.D* **82** 022004 (2010)
16. Дагкесаманский Р Д, Железных И М *Письма в ЖЭТФ* **50** 233 (1989)
17. James C W, Crocker R M, Ekers R D et al *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* **379** 1037 (2007)
Gorham P, Hebert C., Liewer K.et al *Phys.Rev.Lett.* **93** 041101 (2004)
18. Scholten O, Buitink S, Bacelar J et al *Contribution to the Arena 2008 conference, Rome, 25-27 June 2008; arXiv: 0810.3426 [astro-ph]*
19. Scholten O, Bacelar J, Bacelar J et al *Phys.Rev.Lett.* **103** 191301 (2009)
20. Horneffer A, Bähren L, Buitink S et al *To be published in NIM A; arXiv:0903.2398 [astro-ph]*
21. Гусев Г А, Ломоносов Б Н, Пичхадзе К М, Рябов В.А. и др. *Космические Исследования* **44**, №1, 22 (2006)
22. Гусев Г.А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К М., Рябов В.А. и др. *ДАН* **406**, № 3, 327 (2006)
23. Гусев Г А, Ломоносов Б Н, Полухина Н Г и др. *Математическое моделирование* **20** №6, 67 (2008)
24. Ryabov V A, Chechin V A, Gusev G A et al *Nuclear Physics B Proc.Suppl.* **196** 458 (2009)
25. Гусев Г А, Ломоносов Б Н, Полухина Н Г и др. *ЖТФ* **80**, №1, 98 (2010)
26. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N.and Ryabov V.A. *NIM A* **662** 99 (2012)
27. Гусев Г.А., Ломоносов Б. Н., Рябов В. А., Чечин В. А. *УФН* **180**, № 9, 957 (2010)
28. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., and Ryabov V.A. **662** 103 (2012)

Опубликованные работы по эксперименту ЛОРД

1. Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Пичхадзе К.М., Полухина Н.Г., Рябов В.А. и др. // *Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий радиометодом с использованием искусственных спутников Луны* // Космические Исследования, 2006, Т.44, №1, С.22 – 42;
2. Гусев Г.А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М., ... Рябов В. А. и др. // *Концепция лунного орбитального радиоволнового детектора для регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий* // Доклады Академии наук, 2006, том 406, № 3, стр. 327;
3. Рябов В.А. // *Нейтрино сверхвысоких энергий от астрофизических источников и распадов сверхмассивных частиц* // Успехи физических наук 2006, том 176, № 9, стр. 931 – 963;
4. Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Полухина Н.Г.,..., Рябов В.А. и др.// *Моделирование методом Монте-Карло эксперимента по регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий с помощью окололунного орбитального радиодетектора* // Математическое моделирование, 2008, т. 20, № 6, стр.67 – 78;
5. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., Pichkhadze K.M., Polukhina N.G., Ryabov V.A., Sysoev V.K., Tsarev V.A. // *Current status of the LORD experiment* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2009, v.604, S124 –S126;
6. Ryabov V.A., Chechin V.A., Gusev G.A., Lomonosov B.N., Polukhina N.G., Tsarev V.A., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. // *Ultrahigh-energy particle exploration in the lunar experiment (LORD Project)* // Nuclear Physics B, Proc.Suppl. 2009, V.196, pp.458 – 461;
7. Рябов В.А. // *Регистрация астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий* // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2009, том 40, вып. 1, стр. 5 – 62;
8. Галкин В.И., Гусев Г.А., Кроль И.А, Ломоносов Б.Н., Полухина Н.Г., Роганова Т.М., Рябов В.А., Царев В.А., Чечин В.А. // *Гибридный метод регистрации каскадов от космических частиц ультравысоких энергий с помощью окололунного спутника* // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009, № 6, стр.22 – 29;
9. Гусев Г.А., Ломоносов Б. Н., Полухина Н. Г., Рябов В. А., Царев В. А, Чечин В. А. // *Моделирование эксперимента по регистрации частиц ультравысоких энергий с учетом приповерхностного слоя лунного грунта* // Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 1, стр. 98 – 102;
10. Гусев Г.А., Ломоносов Б. Н., Рябов В. А., Чечин В. А. // *Ледяные спутники планет Солнечной системы и орбитальные радиодетекторы для регистрации частиц ультравысоких энергий* // УФН, 2010, том 180, № 9, стр. 957 – 964;
11. Рябов В.А. , Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Полухина Н.Г. , Чечин В.А. // *Особенности регистрации частиц ультравысоких энергий в эксперименте ЛОРД (Лунный Орбитальный РадиоДетектор)* // КСФ ФИАН, 2010, № 4, стр. 8 – 16;
12. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., Polukhina N.G., and Ryabov V.A. // *Design of the LORD Experiment and Perspectives of Ultrahigh-Energy Particles Observation* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, v.662, pp. 99 – 102;
13. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., and Ryabov V.A. // *Targets and radio detectors in far-space region for registration of ultrahigh-energy cosmic rays and neutrino* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, v.662, pp. 103 – 105;
14. Gusev G.A., Chechin V.A., Ryabov V.A. // *Lunar Space Missions for Ultrahigh-energy Cosmic Rays and Neutrinos Observation* // International Workshop Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities (ARENA 2012), 19 - 22 June 2012, Erlangen, Germany (to be publish in the AIP Conference Proceedings);
15. Ryabov V.A., Gusev G.A. and Chechin V.A. // *LORD Space Experiment for Investigation of Ultrahigh Energy Cosmic-ray Particles* // Journal of Physics: Conference Series 2013, v. 409, 012096; (23rd European Cosmic Ray Symposium, ECRS-2012, 2012, 3-7 July, Moscow, Russia).