

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Иркутский государственный университет
Физический факультет

На правах рукописи

Казарина Юлия Андреевна

Исследование структуры радиоизлучения
каскадного ливня от космических лучей высоких
энергий в Тункинском эксперименте

01.04.03 – Радиофизика

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук, профессор
Афанасьев Николай Тихонович

Иркутск – 2015

Содержание

Введение.....	4
1. Состояние проблемы регистрации космических лучей высоких энергий и возможности их исследования по радиоизлучению ШАЛ.....	12
1.1. Космические лучи и методы регистрации ШАЛ.....	12
1.2. Механизмы генерации радиоизлучения ШАЛ.....	16
1.3. Методы математического моделирования радиоимпульсов ШАЛ.....	20
1.4. Результаты численного моделирования пространственно-временной структуры импульса при различных геофизических условиях.....	21
1.5. Экспериментальные радиоустановки для регистрации ШАЛ.....	27
1.6. Резюме.....	35
2. Экспериментальные измерения радиоизлучения ШАЛ на астрофизическом полигоне ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине.....	37
2.1. Регистрация космических лучей в Тункинской долине.....	37
2.2. Установка Tunka-Rex для регистрации радиоизлучения ШАЛ.....	44
2.3. Анализ влияния положения антенны на прием радиосигнала от ШАЛ.....	49
2.4. Выбор диаграммы направленности антенны.....	59
2.5. Анализ фона для регистрации радиоимпульсов ШАЛ в Тункинской долине.....	64
2.6. Система мониторинга состояния установки Tunka-Rex.....	73
2.7. Резюме.....	75
3. Методики обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex.....	77
3.1 Сбор данных установки Tunka-Rex и разработка методики выделения радиосигналов ШАЛ	77
3.2 Разработка методик восстановления основных характеристик первичной космической частицы по радиосигналам ШАЛ.....	84
3.3 Оценка точности восстановления энергии первичной частицы и глубины максимума ШАЛ.....	89
3.4 Резюме.....	91
Заключение.....	92
Список литературы.....	94

Введение

Актуальность темы

Исследование источников и механизмов образования космических лучей высоких и сверхвысоких энергий является фундаментальной проблемой астрофизики [1-8]. Для решения этой проблемы особое значение имеет измерение тонкой структуры энергетического спектра, повышение уровня достоверности измерения массового состава и поиск анизотропии первичных космических лучей в различных областях энергий [9-11]. Только такие более качественные данные могут дать определенный ответ на вопрос о природе и механизмах ускорения галактических и внегалактических первичных космических лучей. Особый интерес представляет исследование первичных космических лучей в энергетическом диапазоне 10^{16} - 10^{19} эВ, в котором, как предполагается, происходит переход от галактических (вспышки сверхновых, пульсары, тесные двойные системы и т.д.) к внегалактическим (активные ядра галактик, квазары, источники гамма-всплесков и т.д.) источникам [12-14]. Эта область энергий привлекает особое внимание в связи с ее важностью для понимания природы источников и механизмов ускорения частиц сверхвысоких энергий, кроме того в области предельных энергий результаты измерений на разных установках сильно разнятся [15-20]. При энергиях $E_0 \geq 10^{15}$ эВ уже исключена возможность прямых измерений, поэтому изучают космические лучи высоких энергий, регистрируя продукты их взаимодействия с атмосферой. В результате взаимодействия развиваются так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Значительные расстояния, проходимые ливнем в процессе развития, позволяют родиться множеству компонент, среди которых можно выделить адронную, электрон-фотонную, мюонную, нейтринную, а также черенковское и радиоизлучение [21,22]. При высоких энергиях в ШАЛ могут присутствовать практически все элементарные частицы, но до поверхности Земли доходят преимущественно электроны, мюоны, γ -кванты, нейтрино, черенковское излучение, флуоресцентное излучение и радиоизлучение.

Энергетическая калибровка на сегодняшний день является наиболее существенной проблемой для многих установок, работающих в области сверхвысоких энергий. Недостаточная изученность космических лучей в энергетическом диапазоне 10^{16} - 10^{19} эВ и большой разброс в экспериментальных

данных в этой переходной области энергий связаны, в частности, с тем, что для ее исследования нужны установки площадью не менее квадратного километра. С другой стороны, это связано с тем, что необходимы небольшие расстояния между детекторами.

В большинстве существующих установок для исследования космических лучей высоких энергий регистрируется заряженная компонента ШАЛ. При этом до сих пор сохраняются значительные расхождения в результатах измерений на разных установках. Последнее является следствием как методических и технических проблем в калибровке установок, так и значительных флуктуаций заряженной компоненты ШАЛ, что в конечном счете приводит к большим статистическим и систематическим ошибкам в результатах измерений [10, 23]. Существенно более точные данные о космических лучах можно получать, используя методы наблюдений черенковского [24, 25] и радиоизлучения ШАЛ [26-30]. Достоинства этих методов обусловлены тем, что при генерации черенковского и радио излучения атмосфера играет роль гигантского калориметра, при этом существенно сглаживаются флуктуации, характерные для заряженной компоненты ШАЛ.

В 2009 году усилиями международной коллаборации Tunka, в которую входят НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ, ИЗМИРАН, ИЯИ РАН, Туринский университет (Италия), ДЕЗИ (Германия) и другие организации, было завершено создание на базе Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ строительство крупнейшей в мире черенковской установки Тунка-133 для исследования первичных классических лучей методом регистрации черенковского излучения ШАЛ. Результаты анализа данных с установки Тунка-133 с внешними кластерами черенковских детекторов, развернутых в 2010-2011 годах, с помощью оригинальных методов, разработанных коллаборацией Tunka, показали эффективность черенковского метода наблюдений [31]. Высокое энергетическое разрешение установки позволило получить наиболее точные данные об энергетическом спектре и выявить ряд особенностей, в том числе излом в спектре при энергии порядка 300 ПэВ (второе колено). Основным недостатком черенковского метода является то, что наблюдения можно вести только в ясные безлунные ночи, то есть порядка 400 часов в год в условиях Тункинской долины.

В 2012 году на территории черенковской установки Тунка-133 начато создание установки Tunka–Rex (Тунка-радиорасширение) для исследования космических лучей методом регистрации радиоизлучения ШАЛ. В отличие от черенковского этот метод позволяет вести практически круглосуточные круглогодичные измерения, независимо от метеоусловий. Кроме того, стоимость детекторов радиоизлучения ШАЛ существенно ниже, чем стоимость черенковских и сцинтилляционных детекторов. Первоначальная цель развития радиометода для исследования первичных космических лучей в Тункинской долине состоит в том, чтобы, используя результаты совместной работы черенковской установки Тунка-133 и установки Tunka-Rex, провести отработку методик восстановления основных характеристик первичного космического излучения по радиоданным, выяснить предел точности таких методик, а впоследствии использовать радиометод как самостоятельный способ исследований потоков космических лучей, возможно, и в других экспериментах. После развертывания сцинтилляционной установки Tunka-Grande стало возможным получать от нее триггер для круглосуточной работы радиоустановки Tunka-Rex, что позволило увеличить эффективное время радиоизмерений на порядок. Разработка методов восстановления параметров ШАЛ по результатам совместной работы и кросс калибровки установок Тунка-133, Tunka-Grande и Tunka-Rex позволит перейти к созданию крупных установок, где основной сбор данных будет осуществляться с помощью радиометода. Это позволит уже в недалеком будущем значительно расширить статистику при регистрации частиц сверхвысоких энергий.

Целью диссертационной работы является исследование возможностей восстановления характеристик ШАЛ от космических лучей высоких энергий по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков, регистрируемых на установке Tunka-Rex.

Задачи:

1. Анализ современных математических моделей расчета радиоизлучения ШАЛ и моделирование радиоимпульсов при различных геофизических условиях с целью исследования характеристик ожидаемого сигнала.

2. Анализ шумовой обстановки в месте проведения эксперимента по регистрации радиоизлучения Tunka-Rex и исследование влияния инфраструктуры Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ на регистрацию радиоизлучения ШАЛ.

3. Создание программы мониторинга состояния установки Tunka-Rex, калибровка антенн Tunka-Rex и проведение измерений.

4. Исследование влияния поворота антенны на эффективность детектора Tunka-Rex, а также расчет зависимости мощности радиоизлучения ШАЛ от направления прихода ливня.

5. Разработка методик выделения радиоимпульсов от ШАЛ, зарегистрированных на установке Tunka-Rex, и разработка методик восстановления основных характеристик ШАЛ по его радиоизлучению.

Научная новизна работы:

1. Впервые выполнен анализ шумовой обстановки в месте проведения эксперимента Tunka-Rex с целью подтверждения возможности регистрации радиоизлучения ШАЛ. Разработана система мониторинга состояния установки Tunka-Rex.

2. Аналитически и с помощью моделирования впервые показано, что ориентация радиоантенн в месте регистрации ШАЛ влияет на эффективность детектора в зависимости от направления магнитного поля Земли.

3. Впервые реализована энергетическая кросс калибровка методов регистрации ШАЛ, использующих радиоустановку Tunka-Rex и черенковскую установку Тунка-133. Показано, что радиометод является эффективным для исследования космических лучей высоких энергий.

4. Разработан метод оптимизации функции пространственного распределения (ФПР) радиоизлучения ШАЛ, позволяющий увеличить статистику для событий с энергиями космических лучей близкими к порогу регистрации.

Научная и практическая ценность работы:

1. Разработанные методы будут использоваться для дальнейших исследований при совместной работе установок Tunka-Rex и Tunka-Grande, что в значительной

степени позволит увеличить статистику при регистрации космических лучей высоких энергий и провести поиск гамма – квантов высоких энергий.

2. Разработанные методы восстановления параметров ШАЛ в Тункинском эксперименте могут быть использованы для анализа данных действующих и будущих радиоустановок.

Защищаемые положения:

1. Результаты измерений шумовой обстановки в Тункинской долине показывают возможность исследования космических лучей с энергетическим порогом 10 ТэВ путем детектирования радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц.

2. Разработанные методики выделения радиосигналов ШАЛ из экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex, позволяют обнаружить асимметрию зарегистрированных событий в направлении север-юг, что подтверждает геомагнитный механизм генерации радиоизлучения ШАЛ.

3. Предложенные методики реконструкции основных характеристик первичной космической частицы по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков от ШАЛ обеспечивают точность восстановления энергии первичной частицы 20 % и глубины максимума ливня 50 г / см^2 , что соответствует возможностям ведущих мировых экспериментов по регистрации космических лучей и подтверждает перспективность установки Tunka-Rex.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность выводов, полученных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением аналитических результатов в предельных частных случаях с известными из литературы. Данные измерений на установке Tunka-Rex не противоречат результатам других экспериментов, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались автором на научных семинарах НИИПФ ИГУ и ИКР КИТ (г. Карлсруэ, Германия), а также на следующих

конференциях: XIII International Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Россия, п. Большие коты, 2013; XIII и XIX Международных Байкальских молодежных научных школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2013, 2015 гг.); 6th International Conference on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities (ARENA), Annapolis, Maryland, USA, 2014; IX и X Всероссийских научных конференциях “Физика плазмы в солнечной системе” (Москва, Институт космических исследований РАН, 2014, 2015 гг.); Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) Wuppertal, Germany, 2015;

Исследования проводились при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 13-02-00214 и № 09-02-00211), гранта ФГБОУ ВПО ИГУ № 111-13-203 и стипендии Президента РФ для обучения за рубежом в 2014/2015 учебном году.

Личный вклад автора.

Основные результаты работы получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Автор принимал участие в разворачивании установки Tunka-Rex, в проведении штатных сеансов набора данных на этой установке, в разработке методик выделения радиосигнала ШАЛ, а также в измерениях шумовой обстановки в месте проведения Тункинского эксперимента. Автору принадлежат результаты моделирования, численных расчетов и обработки данных эксперимента Tunka-Rex. Интерпретация результатов измерений проводилась совместно с коллаборацией Tunka-Rex.

Публикации.

Результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах в российских и зарубежных изданиях, в том числе 6 статей в журналах из списка ВАК «Journal of Physics», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research», «AIP conference proceedings», «Journal of Instrumentation», «Physics Procedia», а также в трудах и сборниках докладов международных и российских научных конференций.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы; содержит 61 рисунок и 1 таблицу; список литературы включает 112 наименований. Объем диссертации 104 страницы.

Краткое содержание работы

Во **введении** рассмотрена актуальность исследуемой темы, обозначена цель диссертации и сформулированы решаемые задачи, научная новизна и научно-практическая ценность работы. Перечислены научные положения, выносимые на защиту, а также излагается краткое содержание работы.

В **первой главе** рассмотрено состояние проблемы регистрации космических лучей высоких энергий и возможности их исследования по радиоизлучению ШАЛ.

В **п. 1.1.** сделан обзор современных методов регистрации космических лучей. Показано, что детектирование космических лучей высоких энергий по радиоизлучению ШАЛ является одним из наиболее перспективных методов исследования космических лучей высоких энергий.

В **п. 1.2.** рассматриваются механизмы генерации радиоизлучения ШАЛ. Основное внимание уделено геомагнитному механизму радиоизлучения, связанного с движением заряженных частиц в магнитном поле Земли.

В **п. 1.3.** анализируются современные методы моделирования пространственно-временной структуры радиоимпульса. Существует два подхода к расчету: микроскопический, более точный, но затратный по времени, и макроскопический, не требующий особых временных затрат, но менее точный в силу большого количества упрощений и свободных параметров.

На основе математической программы моделирования CoREAS с использованием микроскопического подхода, заложенного в код, использующий метод Монте-Карло в **п. 1.4.** приводятся результаты моделирования радиоимпульса при различных геофизических условиях. Показано, что амплитуда радиоимпульса ШАЛ растет пропорционально энергии первичной частицы, а с ростом расстояния от оси ливня уменьшается амплитуда импульса и увеличивается его длительность. Показана существенная зависимость функции пространственного распределения радиоизлучения и формы импульса от энергии и типа первичной частицы, а также

от направления ее прихода относительно силовых линий магнитного поля. Показано влияние атмосферы Земли на формирование пространственной и временной структуры радиоизлучения ШАЛ.

В п. 1.5. приведены результаты экспериментальных исследований в области детектирования космических лучей высоких энергий по радиоизлучению ШАЛ. Рассмотрены ведущие экспериментальные установки, на которых было успешно зарегистрировано радиоизлучение ШАЛ. Обозначены преимущества эксперимента Tunka-Rex, в частности, низкий уровень шумовой обстановки и повышенная индукция магнитного поля Земли.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям космических лучей на астрофизическом полигоне ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине.

В п. 2.1. приведены сведения об экспериментах, регистрирующих ШАЛ в Тункинской долине. Показано, что в результате расширения установки Tunka-133 новыми детекторами радиоизлучения и заряженной компоненты ШАЛ Tunka стала единственной в мире «плотной» установкой, которая позволяет регистрировать максимально возможное количество составляющих ШАЛ. Это дает возможность получать наиболее точные данные о первичных частицах.

В п. 2.2. подробно рассмотрена антенная система Tunka-Rex для регистрации радиоизлучения ШАЛ. Сформулированы задачи эксперимента. Описан метод калибровки всего тракта установки Tunka-Rex, по которому проходит сигнал.

П. 2.3. посвящен исследованию влияния расположения антенн на прием радиосигнала ШАЛ. На основе аналитических вычислений и моделирования показано, что ориентация антенн в случае Tunka-Rex имеет важное значение для вертикальных ливней.

В п. 2.4. показано, что диаграмму направленности антенны следует выбирать исходя из условий места наблюдения с учетом величины и направления магнитного поля Земли. Показано, что в условиях Тункинской долины радиоизлучение ШАЛ мощнее для наклонных ливней.

В п. 2.5. анализируется помеховая обстановка в месте расположения эксперимента Tunka-Rex. Проведенный анализ подтверждает возможность регистрации радиоизлучения ШАЛ. Это делает эксперимент Tunka-Rex одним из

перспективных и надежных инструментов регистрации космических лучей, несмотря на простоту оборудования. Кроме того, приведены результаты исследований влияния электронного оборудования, систем электропитания установок и инфраструктуры Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования на регистрацию радиоизлучения ШАЛ, которые учитываются при в дальнейшей обработке данных Tunka-Rex.

Для максимально оперативного получения информации о сбоях антенн Tunka-Rex необходимо построить систему мониторинга, которая сможет обеспечить необходимой информацией в режиме реального времени. С этой целью в п. 2.6. предложен метод мониторинга состояний установки.

Третья глава посвящена разработке методик для обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex.

В п. 3.1. предложена методика сбора экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex. Разработана методика выделения радиосигналов ШАЛ из данных измерений.

В п. 3.2. предложена методика восстановления основных характеристик первичной космической частицы по данным о пространственной и временной структуре радиоизлучения ШАЛ. Предложен метод оптимизации функции пространственного распределения радиоизлучения.

В п. 3.3. реализована энергетическая кросс-калибровка двух различных методов регистрации ШАЛ в совместных экспериментах, выполненных на радиоустановке Tunka-Rex и черенковской установке Тунка-133. Показано, что радиометод является экономичным и эффективным методом для исследования космических лучей высоких энергии.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Глава 1

Состояние проблемы регистрации космических лучей высоких энергий и возможности их исследования по радиоизлучению ШАЛ

В настоящей главе рассмотрено современное состояние проблемы исследования космических лучей высоких энергий. Проведен анализ современных методов их регистрации. Обсуждаются механизмы генерации радиоизлучения ШАЛ от космических лучей. Анализируются методы моделирования пространственно-временной структуры радиоимпульса ШАЛ. Приведены результаты численного моделирования характеристик радиоизлучения ШАЛ в различных геофизических условиях. Проанализированы результаты измерений радиоизлучения ШАЛ, полученных на ведущих экспериментальных установках.

1.1 Космические лучи и методы регистрации ШАЛ

«Классические» первичные космические лучи – это ядра и ионизированные атомы от протона до железа, ускоренные до высоких энергий как в пределах нашей Галактики, так и вне ее. В более широком смысле к космическим лучам можно отнести и другие стабильные и квазистабильные частицы высоких энергий, такие как электроны, нейтроны, антипротоны, нейтрино, γ -кванты, и т.д., а также гипотетические объекты: магнитные монополи, суперсимметричные частицы, мини-черные дыры, если последние существуют [25]. Космические лучи как явление были открыты более ста лет назад. Обнаруженный ранее в опытах по изучению проводимости газов Вильсона, Гайтеля и Эльстера эффект ионизации первоначально связывался с источниками радиоактивного излучения, однако опыты с электроскопом, изолированным толстым слоем свинца, показали, что излучение обладает большой проникающей способностью и имеет место быть даже в тех случаях, когда радиоактивные элементы поблизости отсутствуют. В качестве рабочей гипотезы было принято, что ионизация вызывается источниками гамма-

излучения, скрытыми в земной коре. В 1911-1912 гг. В. Гессом в процессе опытов с подъемом электроскопов до высот в 5000 м был обнаружен эффект увеличения ионизации - при подъеме выше 700 м ионизация растет с увеличением высоты, что явно указывало на ошибочность предположений, сделанных ранее. Гесс предположил, что излучение, вызывающее ионизацию, идет не от поверхности Земли, как предполагалось ранее, а наоборот – из космоса [20]. Гипотеза о том, что излучение идет от Солнца, не оправдалась, так как в ночное время скорость разрядки электроскопов при подъеме возрастала так же быстро, как и днем. Позже это предположение было подтверждено В. Кольхерстером, проводившим измерения ионизации до высот в 9000 м. В 1936 г. Гессу была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие космических лучей. Скобельцин в 1927 г. в экспериментах с камерой Вильсона, помещенной в магнитное поле, зарегистрировал следы заряженных частиц с большими энергиями, чем возможны у продуктов радиоактивных распадов. Это открытие повлекло за собой новые экспериментальные методы изучения космических лучей. Росси разработал метод совпадений разрядов нескольких счетчиков. Блеккет и Оккиалини предложили управлять расширением камеры Вильсона по сигналу разрядного счетчика. В 1932 г. Андерсон открыл позитрон, затем были открыты μ -мезон, π -мезоны, K -мезоны и другие элементарные частицы [32]. Как теперь известно, наблюдаемые на поверхности Земли космические лучи являются вторичными, т.е. родившимися в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой. Вторичные космические лучи, т.е. широкие атмосферные ливни (ШАЛ), были открыты Оже, Мазе и Гривет-Мейер в 1938 г. Они обнаружили, что расположенные на расстоянии многих метров друг от друга детекторы космических лучей часто срабатывают одновременно [22]. В результате середина прошлого века физика космических лучей стала «золотой» порой.

На рис. 1.1. представлена схема развития ШАЛ. Первичная частица очень большой энергии (чаще протон), проникая в атмосферу Земли, вызывает цепь ядерных взаимодействий, в результате которых рождаются протоны, нейтроны, пи-мезоны, в свою очередь, вызывающие новые ядерные взаимодействия. Эти частицы образуют узкий пучок, называемый стволом ливня. На уровне моря диаметр ствола не превышает нескольких метров.

В каждом ядерном взаимодействии определенная доля энергии расходуется на образование нейтральных π -мезонов, которые быстро распадаются на высокоэнергичные фотоны. Эти фотоны, появляющиеся в стволе ливня, дают начало электрон-фотонным каскадам (лавинам), в результате чего возникает большое число электронов и позитронов. Из-за многократного рассеяния в атмосфере эти ливневые частицы отклоняются в сторону от ствола. Такое рассеяние представляет собой постепенное накопление большого числа отклонений на малые углы, которые испытывает заряженная частица со стороны поля атомных ядер. За время движения ливня в атмосфере электроны и позитроны отходят от ствола на несколько сот метров. В максимуме развития ливня подавляющее число этих частиц имеют энергию порядка 10^{18} эВ и их скорость выше скорости электромагнитных волн в атмосфере. Поэтому такой рой частиц, в котором количество электронов и позитронов составляет около 95-98 % от общего числа, имеет форму почти плоского диска радиусом около 100 м. На площади такого диска находится около половины всех частиц [19].

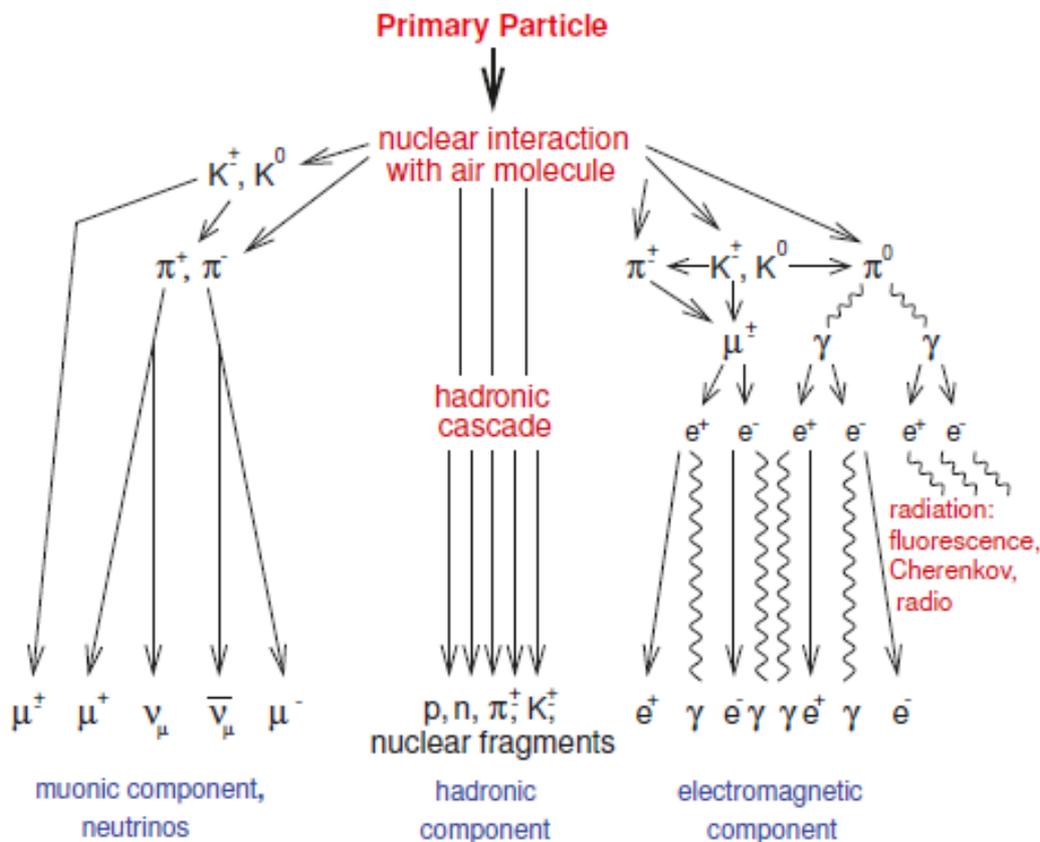


Рис. 1.1. Схема развития ШАЛ [11]

Во второй половине XX века в исследованиях космических лучей основной задачей было изучение источников и механизмов ускорения первичных космических лучей. Прямая регистрация космических лучей возможна только с помощью детекторов поднятых в стратосферу или расположенных на спутниках. Очевидно, что площадь таких детекторов не может быть больше, чем несколько квадратных метров, и разумную статистику, можно получить при энергии частиц не более чем $10^{14} - 10^{15}$ эВ. Изучать первичные космические лучи более высоких энергий можно только регистрируя ШАЛ.

В 1950-1960-х, когда единственным методом регистрации ШАЛ было детектирование заряженных частиц, появились альтернативные методы, заключающиеся в обнаружении не только оптических излучений (черенковский свет и флуоресценция), ставших в последующем основой независимых методов изучения ШАЛ, но и радиоволнового излучения ШАЛ, которое было теоретически предсказано Аскарьяном в 1961 г. [26]. На рис. 1.2. приведена иллюстрация методов регистрации ШАЛ.

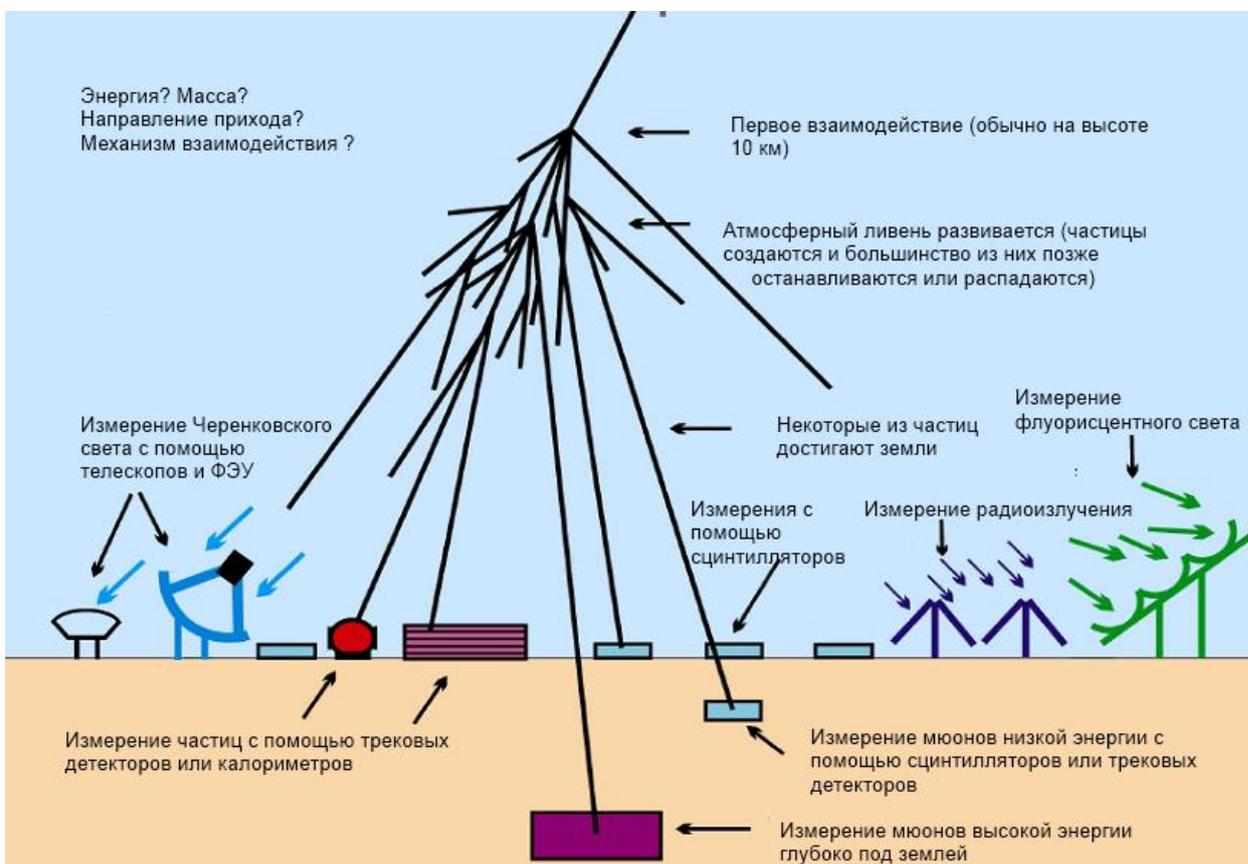


Рис. 1.2. Методы регистрации ШАЛ.

Всплеск когерентного на длинах волн $\lambda > 1$ м радиоизлучения ШАЛ обусловлен зарядовой асимметрией ШАЛ, возникающей за счет избытка электронов и поляризации ШАЛ в магнитном поле Земли. В 1966 г. Кан и Лерш показали доминирующую роль геомагнитного поля в образовании радиоизлучения ШАЛ [27]. Первые экспериментальные исследования радиоимпульсов от ШАЛ были начаты практически сразу после выхода теоретических работ [26, 27] и продолжались до середины 1970х гг. на установках МГУ [28] и Haverah Park [29]. Была накоплена обширная база экспериментальных данных по радиоизлучению ШАЛ. Однако из-за отсутствия быстродействующих электронных и вычислительных мощностей прорыва в создании надежного радиометода регистрации космических лучей не произошло. Выполненные расчеты развития ШАЛ и функции пространственного распределения радиоизлучения привели к результатам, которые было трудно согласовать с экспериментальными данными. Между тем в исследованиях тех лет были получены обнадеживающие результаты, которые указывали на возможность использования радиоизлучения для анализа ШАЛ.

Интерес к радиометоду возродился в 1990-х гг., когда возникла проблема регистрации космических лучей в диапазоне $E_0 > 10^{19}$ - 10^{20} эВ, что требовало «просмотра» огромных площадей [19, 30]. Основными достоинствами методов регистрации радиоизлучения атмосферных ливней являются дешевизна и простота эксплуатации радиоантенн, а также независимость регистрации ливней от существенных для оптического излучения условий: времени суток и погодных условий (ясные безлунные ночи).

1.2 Механизмы генерации радиоизлучения ШАЛ

Радиоизлучение ШАЛ это комплексное явление. В теоретических моделях вклад в общее радиоизлучение дают несколько видов генерации радиоизлучения, таких как черенковское излучение, эффект Аскарьяна, геоэлектрический механизм, геомагнитный механизм, радиоэмиссия, вызванная ионизационными электронами в поле атмосферного электричества, переходное излучение избыточными электронами ливня, переходное излучение квазистатического диполя ШАЛ и др. [3]. На сегодняшний день обнаружено, что основным механизмом генерации

радиоизлучения является геомагнитный механизм, который вносит наибольший вклад в радиоизлучение ($\sim 90\%$) [35]. На рис. 1.3. представлено схематическое изображение основных механизмов генерации радиоизлучения ШАЛ. Рассмотрим их подробнее.

Геомагнитный механизм излучения

Когда частица ультравысокой энергии входит в верхние слои атмосферы, развивается каскад вторичных частиц высоких энергий. Из-за высоких скоростей большая часть частиц сосредоточена в относительно тонком фронте ливня, который называют диском [35]. Диск, который предполагается электронейтральным, содержит большое количество электронов и позитронов. Близко к ядру ливня диск имеет типичную толщину порядка метра и движется к поверхности Земли со скоростью близкой к скорости света. Релятивистские электроны и позитроны в диске под действием силы Лоренца отделяются друг от друга из-за магнитного поля Земли. Это накладывает на независимое от заряда поперечное перемещение частиц направленное движение, перпендикулярное и к оси ливня, и к магнитному полю, причем электроны и позитроны движутся по взаимно противоположным направлениям. Такое явление имеет формальное сходство с поведением свободных электронов в проводнике при создании в нем постоянной разности потенциалов. В обоих случаях такое направленное движение частиц представляет собой электрический ток, значение которого определяется величиной заряда, прошедшего через условную площадь поперечного сечения.

Такой поперечный ток в ливне можно рассматривать как причину поляризации нейтрального в целом диска. При движении в магнитном поле диск позитронов и диск электронов раздвигаются во взаимно противоположных направлениях, образуя электрический диполь, направление которого совпадает с направлением поперечного тока. На том участке движения ливня, где число частиц близко к максимальному, можно считать, что в поперечном направлении имеет место динамическое квазиравновесие, при котором число рождающихся в стволе частиц равно числу частиц, выбывающих из ливня. Поэтому широкий атмосферный ливень можно уподобить движущемуся квазистатическому диполю, в котором поперечный ток поддерживает дипольный момент.

Поляризация геомагнитного радиоизлучения перпендикулярна к магнитному полю Земли, поэтому, излучение наблюдается преимущественно в направлении восток-запад.

На рис. 3.1. представлен случай, где ливень движется вертикально в направлении к поверхности Земли ($-z$ – направление ШАЛ) со скоростью $\vec{v}_s = -\beta_s c \hat{z}$, где $\beta_s \approx 1$. Положение фронта ливня над поверхностью Земли задано как $z = -\beta_s ct$, где фронт ливня достигнет Земли в момент времени $t = 0$. Магнитное поле Земли (с величиной B_E) параллельно поверхности (в направлении y), $\vec{B} = B_E \hat{y}$. Сила индуцированного электрического тока зависит от расстояния до фронта ливня h и от времени развития ливня t . Направление тока в направлении x . Все величины измеряются в системе наблюдателя, который находится в состоянии покоя на поверхности Земли.

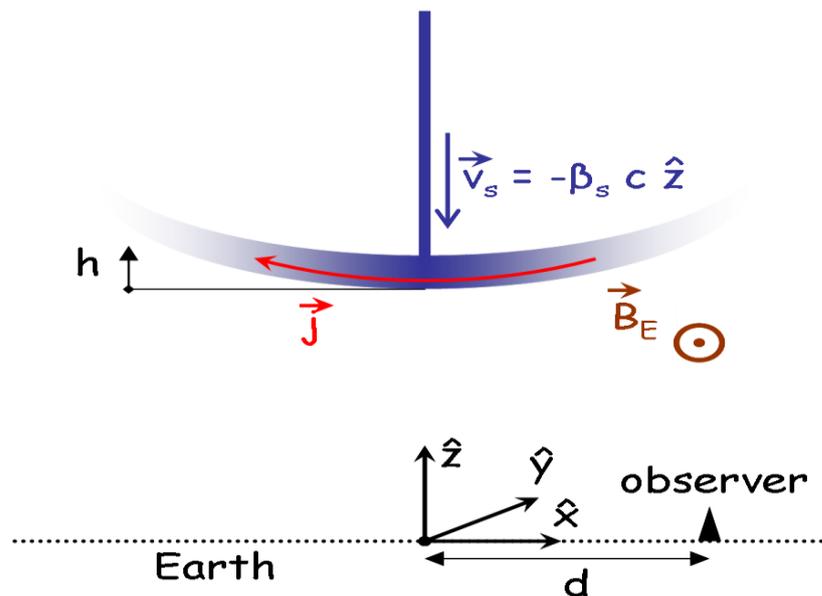


Рис. 1.3. Схема поперечных токов. Отклонение электронов и позитронов вызывает поперечные токи в атмосферном ливне, которые меняются с течением времени, что приводит к радиоизлучению.

Избыток электронов (эффект Аскарьяна)

Избыток электронов является следствием аннигиляции позитронов ливня и вовлечение в лавину комптон- и дельта-электронов. В процессе развития ШАЛ изменяется абсолютное количество избыточных электронов, что приводит к радиоизлучению с радиальной поляризацией. Избыток электронов со средней

энергией может достигать 10 % от общего числа частиц в ливне. При большом их числе когерентное излучение избыточного отрицательного заряда может достичь высокой интенсивности [2]. В радиочастотном диапазоне длин волн нескомпенсированный в ливне заряд может на порядки повысить интенсивность черенковского, тормозного или других видов излучения. Это связано с тем обстоятельством, что в этой области электромагнитных волн интенсивность излучения пропорциональна квадрату частоты и числу частиц в ливне.

Черенковское радиоизлучение

Когда заряд в среде движется быстрее, чем скорость света в этой среде, то это приводит к излучению Черенкова. Иногда это черенковское излучение также называют аскарьяновским радиоизлучением, так как они плохо разделяются из-за изменения заряда ливня[35]. Но черенковское излучение может возникать только в средах с показателем преломления $n > 1$. Таким образом, этот вид эмиссии имеет преимущество в плотных средах. Тем не менее, не очевидно, является ли излучение Черенкова незначительным по отношению к эффекту Аскарьяна, который имеет место быть при $n = 1$.

Геоэлектрический механизм излучения

Ускоренное движение заряженных частиц в электростатическом поле Земли также может привести к радиоизлучению ШАЛ. Для достижения эффективности, сравнимой с эффективностью геомагнитного или черенковского механизма, необходима напряженность статического поля около $6 * 10^{-3} \text{ В} * \text{ м}^{-1}$, что возможно только при нестабильных погодных условиях [34]. В ясную погоду вертикальный градиент электрического потенциала Земли имеет величину около 100 В/м. В условиях грозообразования он может увеличиться на два-три порядка, что может вызвать аномально большой радиоимпульс ШАЛ.

Все процессы радиоизлучения когерентны на мегагерцовых частотах из-за ограниченной толщины фронта ШАЛ (несколько метров). На сегодняшний день исследование процессов радиоизлучения сконцентрировано на достижении понимания радиоизлучения в целом, т.е. какой механизм дает какой вклад. Это

может быть определено изучением свойств радиоимпульса (т.е. формы импульса, поляризации и пространственного распределения) и их зависимостей от различных параметров ливней (т.е. геомагнитный угол, азимутальный и зенитный). Другим способом разделения механизмов является сравнение данных с моделированием на основе определенных моделей. Если модель включает в себя все процессы, ведущие к радиоизлучению, ее предсказаниям должны соответствовать экспериментальные данные. Для подтверждения теоретических предсказаний, заложенных в модели радиоизлучения ШАЛ необходимо повышение уровня точности экспериментальных измерений.

1.3 Методы математического моделирования радиоимпульсов ШАЛ

Для интерпретации данных измерений радиоизлучения ШАЛ необходимы модели радиоизлучения ливней. Проведенный анализ литературных источников [36-48], посвященных теоретическим исследованиям проблемы детектирования космических лучей высоких и сверхвысоких энергий по радиоизлучению ШАЛ, показал, что современные модели радиоизлучения ливней, как и первые простые модели 1960–1970-х гг., построены на основе интеграла излучения, записанного в приближении классической электродинамики [49].

В волновой зоне фурье-компонента электрического поля \mathbf{E}_ω , создаваемая системой токов \mathbf{j} , равна

$$\mathbf{E}_\omega(\mathbf{x}) = \frac{i\omega}{4\pi\epsilon_0 c^2} \int \mathbf{j}_{\perp\omega}(\mathbf{x}') \frac{e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}}{r} d\mathbf{x}', \quad (1.1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, c – скорость света в вакууме, \mathbf{k} – волновой вектор, направленный от элемента $d\mathbf{x}'$ излучающей системы к точке наблюдения \mathbf{x} , $\mathbf{j}_{\perp\omega} = -[\mathbf{k} \times [\mathbf{k} \times \mathbf{j}_\omega]] / |\mathbf{k}|^2$ и r – расстояние от $d\mathbf{x}'$ до \mathbf{x} . Существуют два основных подхода к расчету радиоизлучения ливней. Микроскопический подход (REAS1, REAS2, AIRES, EGS-based, REAS3, REAS3.1, CoREAS) заключается в вычислении интеграла излучения (1.1) путем суммирования радиоэмиссии от индивидуальных заряженных частиц ливня. Главным достоинством микроскопического подхода, базирующегося на моделировании Монте-Карло, является полнота физического описания развития ливня. Но с ростом

энергии первичной частицы существенно возрастает общее число частиц ШАЛ и, соответственно, время моделирования. Использование суперкомпьютеров лишь частично решает проблему оперативности расчетов. Для ускорения счета при моделировании радиоизлучения ливней используют метод прореживания, что является вмешательством в физику развития ливня. Микроскопический подход безусловно избыточен, поскольку он предполагает расчет радиоизлучения в когерентной области от каждой частицы, принадлежащей одной и той же зоне Френеля. Макроскопический подход к расчету радиоизлучения ШАЛ (MGMR, макроподход Константинова и др.) основан на интегральных представлениях об излучающей системе ливня и базируется на эвристических моделях. Макроподход позволяет проводить оперативные расчеты радиоизлучения ШАЛ, в том числе от частиц сверхвысоких энергий. Наиболее эффективной современной моделью в макроподходе является эвристическое представление об излучающем диске, характеризующимся тремя параметрами: вектором полного (перпендикулярного оси ливня) тока, среднеквадратичным радиусом пространственного распределения этого тока и одним параметром формы фронта ШАЛ. Достаточно полная макроскопическая модель радиоизлучения ШАЛ далека до завершения, однако получен ряд важных результатов на пути реализации макромоделей, пригодной для проведения оперативных расчетов радиоизлучения ШАЛ на частотах меньших 100 МГц. Макроскопический подход позволяет значительно сократить время вычислений, но для своей реализации требует некоторых допущений, справедливость которых может быть установлена лишь с использованием результатов, полученных в рамках микроскопической схемы. В настоящее время существует реальная возможность сравнения теории с экспериментом не на уровне оценок, как было ранее, а на уровне результатов, получаемых в рамках наиболее точной вычислительной схемы.

1.4 Результаты численного моделирования пространственно-временной структуры импульса при различных геофизических условиях.

В результате продолжительной дискуссии, более полный учет физических факторов, участвующих в формировании структуры радиовсплеска, привел к биполярной форме импульса (код REAS3.1). Код REAS3.1 – является реализацией

геосинхротронного механизма радиоизлучения ШАЛ с использованием модели Монте-Карло. Основанный на C++ Монте-Карло код REAS3.1 вычисляет радиоизлучение от ливней, которые моделируются с помощью программы CORSIKA [50]. В свою очередь CORSIKA является реализацией метода Монте-Карло, используемым для детального моделирования широких атмосферных ливней. Тем самым для численного эксперимента могут быть выбраны множество различных первичных частиц, таких как протоны, фотоны, ядра железа и несколько моделей взаимодействия частиц. Первичные и вторичные частицы атмосферных ливней отслеживаются программой CORSIKA, до тех пор, пока они не распадутся. Кроме того, существует возможность прореживания ливня, а также генерация черенковского излучения.

Информация об атмосферном ливне, выводится из кода CORSIKA и сохраняется в виде гистограмм на интерфейсе программы COAST. Эти гистограммы используются для расчета радиоизлучения ливня в REAS3.1. Основопологающим принципом REAS3.1 является расчет радиоизлучения каждого из вторичных электронов и позитронов и суммирование этих вкладов в точке наблюдения. Результат, следовательно, должен представлять полное радиоизлучение от атмосферного ливня. Преимущество кода REAS3.1 заключается в том, что число существующих свободных физических параметров сведено в нем до минимума. Для расчета радиоизлучения достаточно знать входные параметры атмосферного ливня. Недавно была реализована программа CoREAS, основанная на том же формализме что и REAS3.1, но теперь информация о ливне не хранится в гистограммах, а трэки отдельных частиц берутся напрямую из расчетов CORSIKA, что привело к более точным и быстрым вычислениям. На сегодняшний день в современных экспериментах, таких как LOPES, LOFAR, AERA, RASTA, ANITA, CROME для моделирования радиоимпульса ШАЛ используется код CoREAS. Именно CoREAS был использован для анализа пространственно-временной структуры прямого радиоизлучения ШАЛ в условиях Тункинской долины.

На рисунках 1.4.–1.9. приведены результаты моделирования пространственно-временной структуры радиоизлучения ШАЛ в различных геофизических условиях [51, 52]. Сначала был выполнен расчет огибающей радиоимпульса ШАЛ, возникшего в результате вторжения в атмосферу Земли

первичного протона под зенитным углом $\varphi = 25^\circ$ и азимутальным углом $\psi = 0^\circ$ (север) с различными энергиями (10^{16} эВ, 10^{17} эВ). Расстояние от оси ливня $R = 100$ м в направлении восток-запад. Из рисунка 1.4 видно, что амплитуда радиоимпульса растет пропорционально энергии первоначальной частицы, что соответствует теоретическим представлениям. Далее был исследован вопрос деформации формы импульса, а также соответствующего спектра в зависимости от расстояния между антенной и осью ливня.

В качестве примера на рисунках 1.5., 1.6. представлены расчеты структуры импульса, когда антенны располагались на расстоянии $R = 100$ м и $R = 400$ м от оси ливня, при этом остальные параметры были взяты прежними. Из результатов расчета следует, что с ростом расстояния от оси ливня уменьшается амплитуда импульса и увеличивается его длительность.

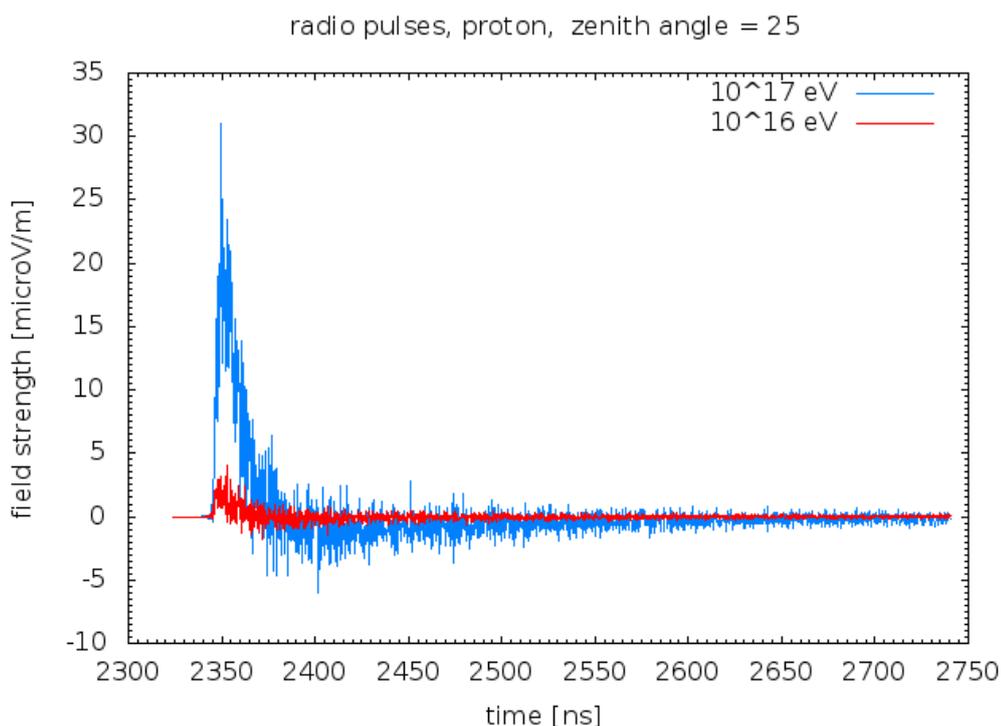


Рисунок 1.4. Импульсы радиоизлучения при различной энергии первичной частицы: 10^{16} эВ, 10^{17} эВ

На рис. 1.7. приведены расчеты структуры импульса для различных атмосферных условий. Для сокращения времени счета в качестве первичной частицы рассмотрен протон с энергией $E_0 = 10^{16}$ эВ. Нетрудно заметить, что

атмосфера оказывает заметное влияние на амплитуду импульса, но не столь существенное, порядка 20%.

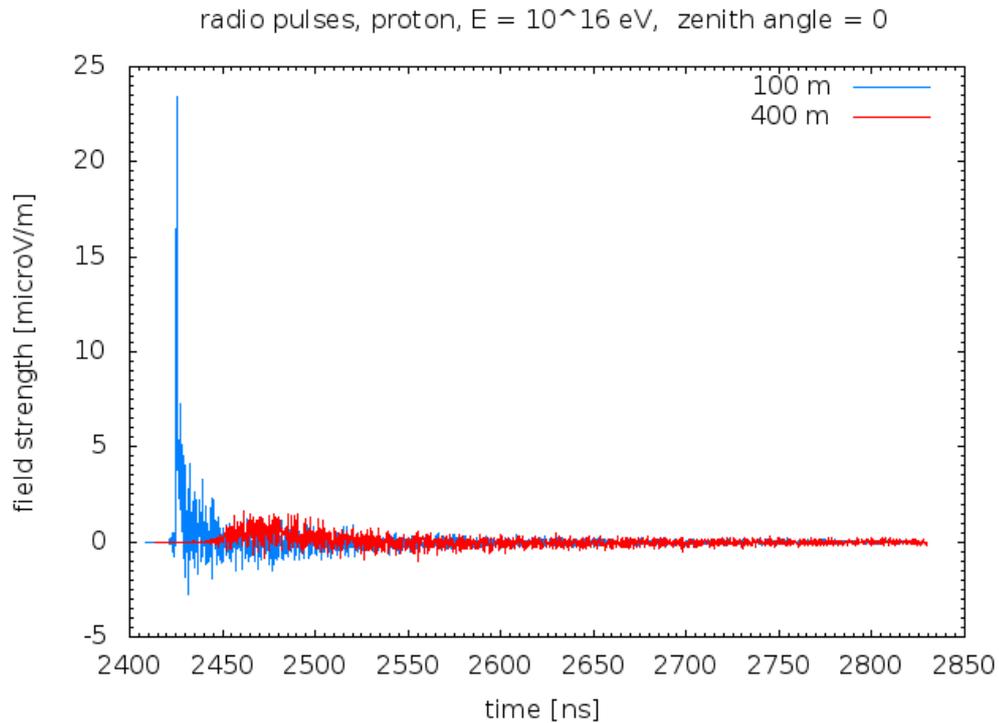
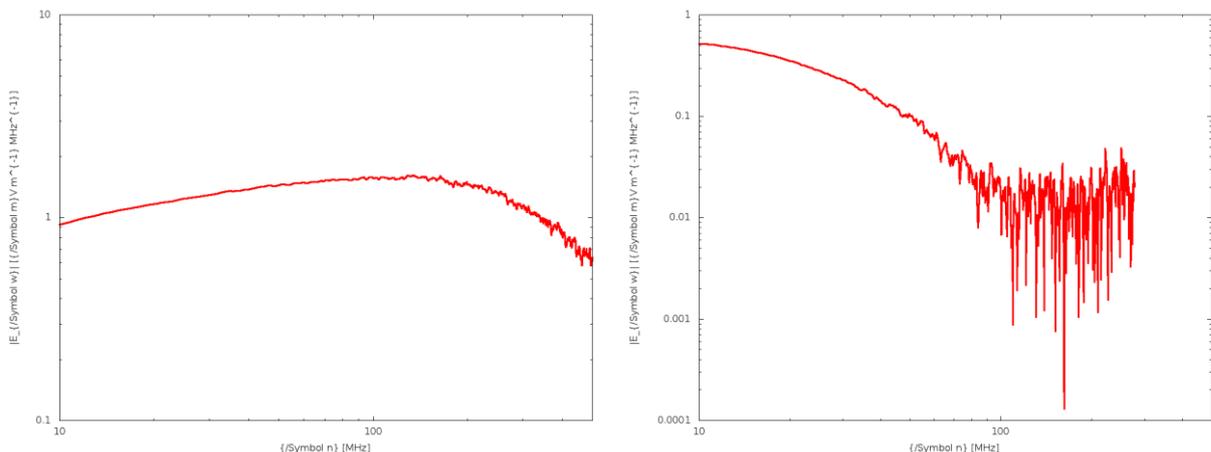


Рисунок 1.5. Зависимость амплитуды и формы импульса от расстояния антенны от оси ливня при $R = 100$ м и $R = 400$ м.



$R = 100$ м

$R = 400$ м.

Рисунок 1.6. Спектр импульса радиоизлучения при расстояниях антенны от оси ливня $R = 100$ м и $R = 400$ м.

Также было рассмотрено влияние зенитного угла φ вторгающегося протона с энергией $E_0 = 10^{16}$ эВ на формирование радиоимпульса ШАЛ. При этом расстояние

антенны до оси ливня составляло $R = 400$ м. На рис. 1.8 приведена форма импульса для четырех зенитных углов ($\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 25^\circ$, $\varphi = 50^\circ$, $\varphi = 75^\circ$) вторгающейся частицы. Из рисунка 1.8. следует, что с увеличением зенитного угла протона амплитуда импульса возрастает, а его длительность уменьшается. Наконец, рис. 1.9. демонстрирует структуру радиоимпульса ШАЛ для различных типов вторгающихся частиц.

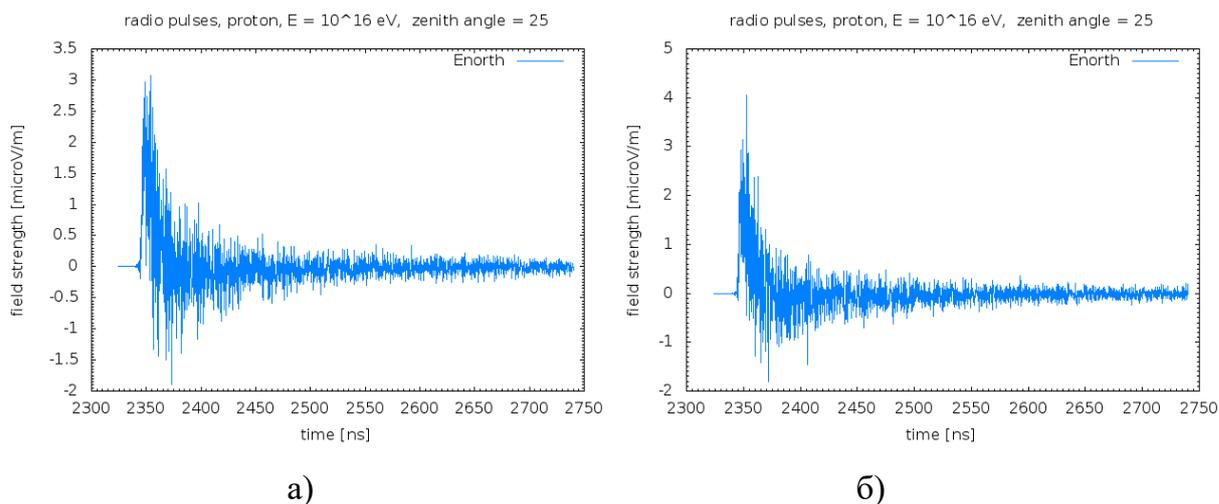


Рисунок 1.7. Импульс радиоизлучения ШАЛ, образованный при разных атмосферах: а) Центральная Европа, январь; б) стандартная атмосфера США.

С помощью CoREAS на основе экспериментальных данных 1-го совместного сезона наблюдений установок Тунка-133 и Tunka-Rex коллаборацией Tunka-Rex были смоделированы радиоимпульсы для детектора Tunka-Rex: 296 событий для протона и 332 события для железа, где энергия первоначальной частицы ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) и направление ШАЛ взяты из данных Тунка-133. Эта база намоделированных данных будет в дальнейшем использоваться в Главе 2 и в Главе 3.

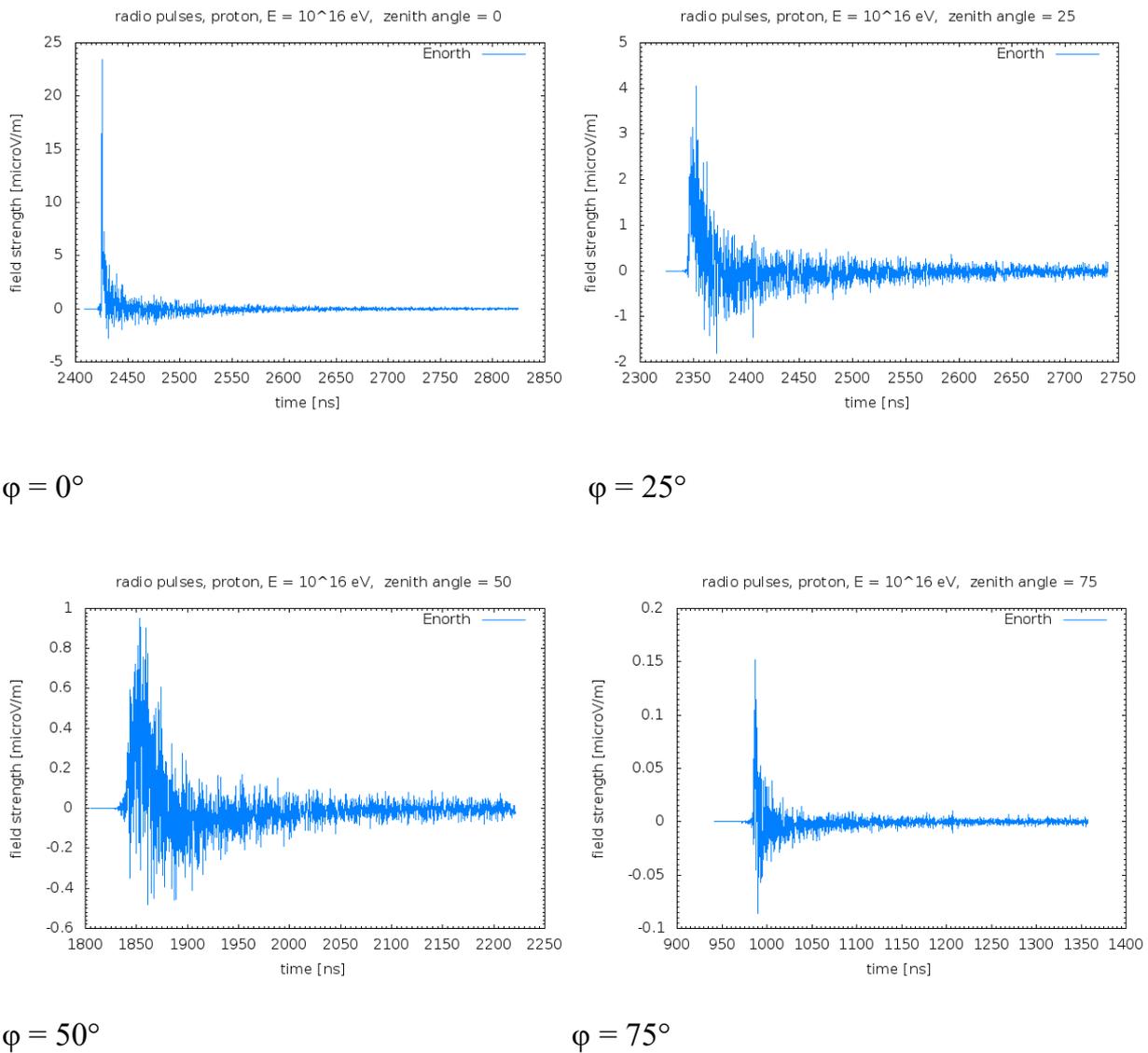


Рисунок 1.8. Импульс радиоизлучения ШАЛ, образованный протоном, входящим в атмосферу при различных углах.

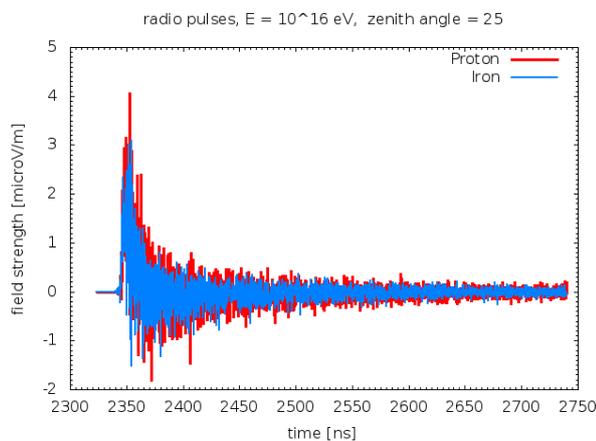


Рис. 1.9. Импульсы радиоизлучения ШАЛ различных первичных частиц с энергией $E_0 = 10^{15}$ эВ, $\varphi = 25^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $R = 100$ м (направление восток-запад): а) ядро железа; б) протон.

1.5 Экспериментальные радиостановки для регистрации ШАЛ

Возрождение метода регистрации радиоизлучения космических лучей началось с экспериментов LOPES [53] и CODALEMA [54] в 2003 году. Благодаря успеху этих экспериментов, настоящие обсерватории по наблюдению ШАЛ дополняют свои детекторы радиоантеннами. Самым значительным среди этих расширений является массив антенн AERA [55] на обсерватории Пьер Оже в Аргентине. На рис. 1.10. представлены основные элементы радиостановок [19]: 1 – антенна для регистрации радиоимпульсов; 2 – блок обработки радиосигнала или радиоприемник; 3, 3' – устройства регистрации; 4 – мастерный детектор (оптический, сцинтилляционный или ионизационный детектор для определения энергии ливня и получения синхронизирующего импульса); 5 – схема совпадения для формирования признака события.

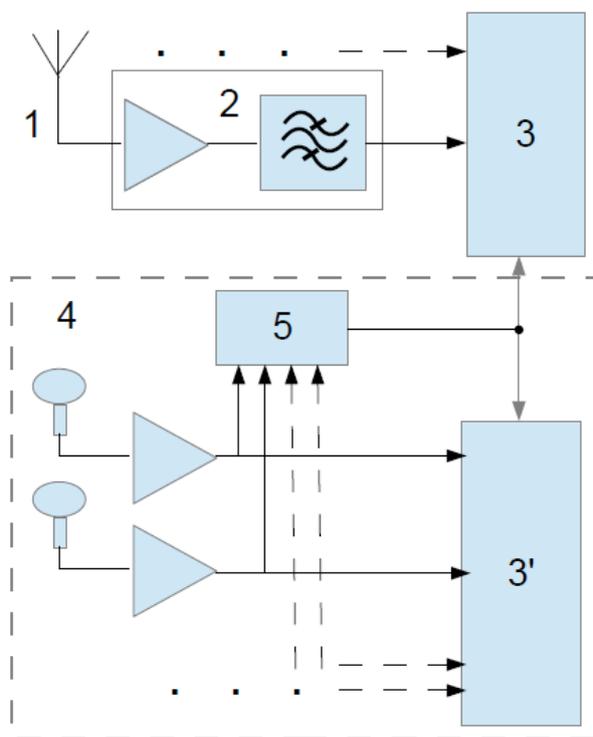


Рис. 1.10. Схема радиодетектора: 1 – антенна для регистрации радиоимпульсов; 2 - блок обработки радиосигнала или радиоприемник; 3, 3' - устройства регистрации; 4 - мастерный детектор (оптический, сцинтилляционный или ионизационный детектор для определения энергии ливня и получения синхронизирующего импульса); 5 - схема совпадения для формирования признака события.

Оптимальным для регистрации когерентного радиоизлучения ШАЛ является диапазон частот 30÷80 МГц [35]. В данный момент в мире насчитывается несколько радиостановок, работающих в этом диапазоне, однако ни в одном эксперименте пока не удалось восстановить основные характеристики ШАЛ исключительно по данным о его радиоизлучении. Это связано как с проблемами абсолютной калибровки радиометода, так и с высоким уровнем промышленных радиопомех в районах расположения известных экспериментальных установок.

Для обнаружения частиц с самыми высокими энергиями необходимы установки, работающие на новых методах регистрации, поэтому надежды были связаны с экспериментами, в которых регистрируется когерентное радиоизлучение от каскадов, инициированных взаимодействиями нейтрино в таких радиопрозрачных природных средах, как атмосфера (LOFAR - Low Frequency Array [56]), ледяные массивы Гренландии (FORTE - Fast on Orbit rapid Recording of Transient Events [57]) и Антарктиды (RICE - Radio Ice Cherenkov Experiment [58], ARIANNA - Antarctic Ross Ice shelf Antenna Neutrino Array [59], ANITA - Antarctic Impulsive Transient Antenna [60]) и соляные месторождения (SalSA - Salt dome Shower Array [61]). На рисунке 1.11. представлен энергетический спектр космических лучей с выделенными рабочими энергетическими диапазонами установок LOFAR, LOPES, Auger и др.

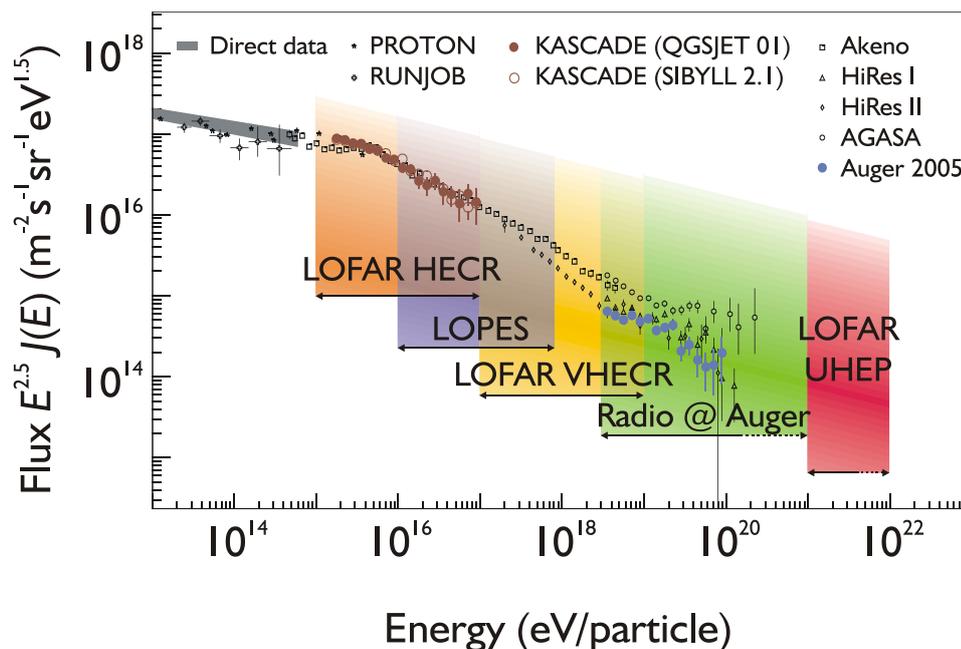


Рисунок 1.11. Энергетический спектр космических лучей с выделенными энергетическими рабочими диапазонами установок LOFAR, LOPES, Auger и др.

В ряде экспериментов в качестве мишени для регистрации космических лучей сверхвысоких энергий используется радиопрозрачный приповерхностный слой лунного грунта (реголит) и радиоизлучение от каскадов наблюдается с помощью наземных радиотелескопов (Parces, GLUE - Goldstone Lunar Ultra-high energy neutrino Experiment, NuMoon, WRST, LUNASKA или радиоприемных устройств, размещенных на окололунных спутниках - ЛОРД) [62].

Но многие эксперименты имеющие дело с регистрацией радиоизлучения в плотных средах, например во льду или лунном реголите, являются менее эффективными в отличие от детектирования радиоизлучения атмосферных ливней.

Цель текущих экспериментов оптимизировать технику радио детектирования и, соответственно, понять детали механизмов радиоизлучения. Далее приведен краткий обзор наиболее актуальных на сегодняшний день установок, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ.

Цифровые антенные массивы первого поколения

МГУ

На установке МГУ в 1960х гг. были начаты первые экспериментальные исследования радиоимпульсов от ШАЛ, которые продолжались до середины 1970х гг. [28]. Установка состояла из 11 антенн, работающих в частотном диапазоне 30-34 МГц совместно с подземными и надземными счетчиками Гейгера-Мюллера, которые измеряли количество электронов и мюонов. Экспериментальные данные МГУ подтвердили наличие зависимости функции пространственного распределения (ФПР) радиоизлучения от параметров ШАЛ, что позволяло делать некоторые выводы о свойствах первичного космического излучения. Было найдено также, что нормированная на первичную энергию напряженность электрического поля радиоизлучения на расстоянии 50-100 м от оси ливня флуктуирует слабо и может служить мерой первичной энергии.

Недавно [63] радиоизмерения установки МГУ были вновь проанализированы. На основе 85 событий с высоким отношением сигнал-шум при $E = 4 \cdot 10^{17}$ эВ показана корреляция между чувствительностью отношения количества электронов к количеству мюонов и шириной ФПР.

Якутская установка, измеряющая радиоизлучение ШАЛ на частоте 32 МГц

Первые работы по регистрации радиоимпульсов от ШАЛ на Якутской установке были проведены в 1986 – 1989 гг. [30, 64-66]. Тогда были зарегистрированы сигналы в 6250 ливнях с энергией выше 10^{17} эВ, в том числе несколько событий с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ. В 2009 – 2011 гг. регистрация радиоизлучения на Якутской установке ШАЛ была продолжена.

Для регистрации радиоизлучения от ШАЛ на частоте 32 МГц в полосе 8 МГц была создана установка, состоящая из шести приемных антенн, установленных на расстояния 300, 350 и 500 м от центра установки, усилителей и регистрирующего устройства с накопителем данных. Для регистрации радиоизлучения от ШАЛ были применены полуволновые диполи (рис. 1.12), поднятые на высоту $\lambda/4$. Скрещенные диполи ориентированы в направлении восток – запад (по магнитной параллели) и север – юг (по магнитному меридиану). События ШАЛ на Якутской установке выделяются при срабатывании одного из двух триггеров. Первым триггером являются сцинтилляционные детекторы, вторым – черенковские детекторы.



Рис. 1.12. Вид приемной антенны якутской установки.

Результаты измерений, полученные на Якутской установке, показали, что между измеренной амплитудой радиосигнала и энергией ливня существует

корреляция. Также была обнаружена корреляция между ФПР и глубиной максимума развития ШАЛ X_{\max} . Одним из наиболее значимых результатов Якутской установки является регистрация радиоизлучения от самого мощного события с энергией более 10^{20} эВ и зенитным углом прихода 60° .

LOPES

LOfar PrototypE Station (LOPES) – это установка, регистрирующая радиоизлучение ШАЛ в диапазоне энергий от $10^{16,8}$ эВ до 10^{18} эВ, расположенная на базе исследовательского центра г. Карлсруэ (Германия) (Рис. 1.13.). По принципу действия LOPES является цифровым радиоинтерферометром, который регистрирует радиоизлучение от ШАЛ в частотном диапазоне от 40 до 60 МГц. Триггером LOPES являются сцинтилляционные детекторы установки KASCADE.

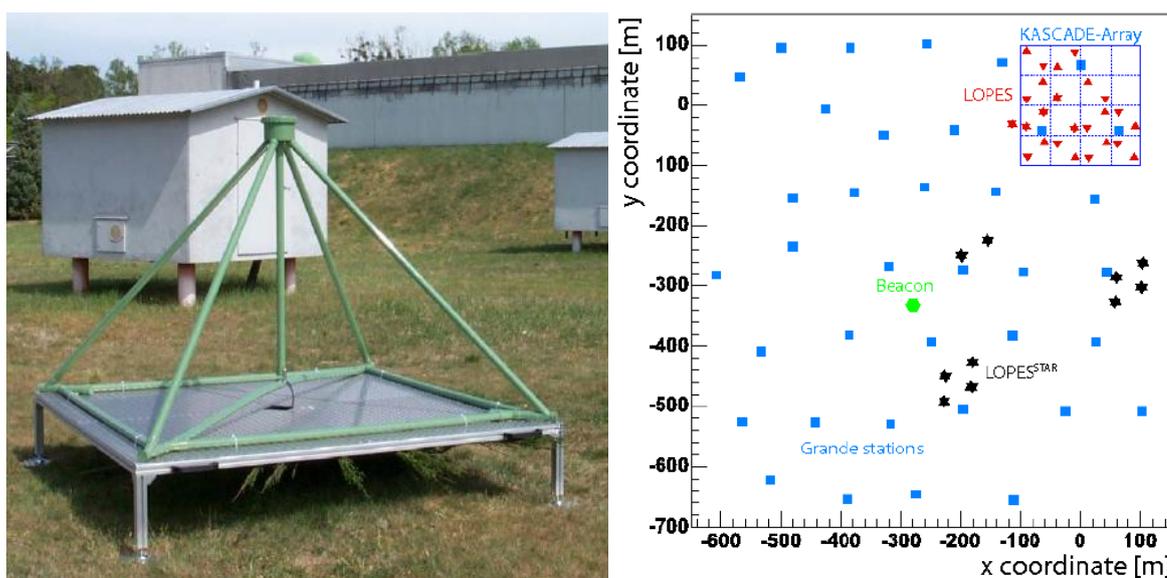


Рис. 1.13. Пример антенной системы LOPES. Слева: вид антенны LOPES. Справа: схема расположения антенн LOPES.

Эксперимент LOPES играет ведущую роль в развитии метода детектирования, по его результатам было доказано, что параметры радиоимпульса могут быть успешно восстановлены. Именно на эксперименте LOPES было показано, что величина электрического поля радиоизлучения ШАЛ пропорциональна энергии первичной частицы, а функция пространственного распределения (ФПР) радиоизлучения ШАЛ ведет себя по экспоненциальному

закону, также была замечена чувствительность радиоизлучения ШАЛ к массовому составу и т.д. Это послужил базой для создания и отработки методик, применимых к регистрации радиоизлучения ШАЛ, некоторые из них сегодня используются, например, в таких экспериментах, как AERA и Tunka-Rex [67]. Кроме того, в рамках этого эксперимента была создана программа моделирования радиоизлучения REAS [53, 68-69]. Но из-за небольшой площади и плохой помеховой обстановки эксперимент LOPES не дал точных результатов.

CODALEMA

Практически одновременно с установкой LOPES начались исследования радиоизлучения ШАЛ во Франции на эксперименте COsmic ray Detection Array with Logarithmic Electro Magnetic Antennas (CODALEMA) (Рис. 1.14.).



Рис. 1.14. Пример антенной системы CODALEMA. Слева: вид антенн CODALEMA. Справа: схема расположения антенн CODALEMA.

Энергетический диапазон, в котором работает установка CODALEMA, 10^{15} - 10^{16} эВ. В этом эксперименте 24 антенны, работающие в диапазоне частот 1-100 МГц, 3 из которых ориентированы в направлении север-юг, остальные в направлении запад – восток. Расстояние между антеннами – 85 метров. Триггером установки является массив из 17 сцинтилляционных станций, расположенных на расстоянии 80 метров друг от друга. Для получения необходимой чувствительности сигнал с этих антенн затем фильтруется в полосе 24 - 82 МГц. Для оцифровки данных используются 12-битные АЦП с частотой дискретизации в

1 ГГц [54, 70-71]. Преимуществом CODALEMA является спокойная помеховая обстановка, что позволяет восстанавливать положение оси ливня по данным радиоизлучения ШАЛ. Кроме того, на эксперименте CODALEMA было показано соответствие восстановления ФПР с результатами LOPES, а также в данных просматривалась асимметрия в направлении север-юг, вызванная доминированием геомагнитного механизма радиоизлучения ШАЛ и т.д.

Большие успехи этих экспериментов первого поколения, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ в мегагерцовом диапазоне, послужили последующему применению данной техники регистрации космических лучей на гораздо больших масштабах, что привело к созданию цифровых антенных массивов второго поколения: AERA, LOFAR и Tunka-Rex.

Цифровые антенные массивы второго поколения

AERA

Первая часть эксперимента Auger Engineering Radio Array (AERA) состояла из 21 антенной станции, расположенных на территории обсерватории Пьер Оже в Аргентине в непосредственной близости флуоресцентных детекторов Coihueco и HEAT, которые являются триггерами для AERA (Рис. 1.15.). В ближайшие годы, количество антенных станций, детектирующих радиоизлучение ШАЛ в диапазоне от 40 до 60 МГц, вырастет до 160, что увеличит размеры установки до 20 км². В эксперименте применяется два типа антенн Butterfly и LPDA, которые расположены на расстоянии 750 м, что позволяет регистрировать только наклонные ливни. AERA детектирует радиоизлучение ШАЛ в энергетическом диапазоне 10^{17} - 10^{19} эВ, а поскольку регистрации ШАЛ происходит совместно с флуоресцентными и сцинтилляционными детекторами, то это дает возможность кросс калибровки и, таким образом, позволяет исследовать интерферометрические и не интерферометрические методы регистрации ШАЛ. Цель эксперимента детально изучить механизмы, ответственные за радиоизлучение ШАЛ. AERA на сегодняшний день является наибольшей по площади установкой по регистрации радиоизлучения ШАЛ [55, 72-76].

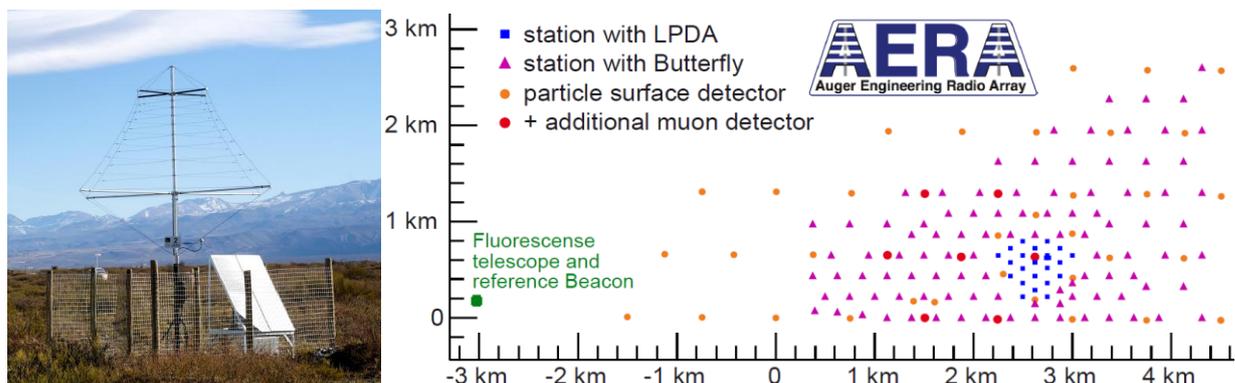


Рис. 1.15. Пример антенной системы AERA. Слева: вид одной из антенн AERA.

Справа: схема расположения детекторов обсерватории Пьер Оже, которая включает антенны AERA.

LOFAR

Low-Frequency Array (LOFAR) - интерферометрическая решетка из радиотелескопов, распределенная по всей Европе: большая часть установки расположена в Нидерландах, пять станций в Германии и по одной в Великобритании, Франции и Швеции (будущие станции также могут быть построены и в других европейских странах). LOFAR (Рис. 1.16) регистрирует радиоизлучение ШАЛ с июня 2011 года, основываясь на принципе интерференции с использованием около 25000 небольших антенн, сконцентрированных в 48 больших станциях. Измерения проводятся в диапазоне частот от 30 до 80 МГц, а также от 110 до 240 МГц.



Рис. 1.16. Пример антенной системы LOFAR. Справа: схема расположения антенн установки LOFAR. Слева: вид антенн LOFAR.

Триггером для LOFAR являются сцинтилляционные станции, которые предоставляют основную информацию о ШАЛ. Обработка данных производится с помощью суперкомпьютера, расположенного в Нидерландах в университете

Гронингена. LOFAR является крупнейшим плотным детектором и, следовательно, самым чувствительным к регистрации радиоизлучения ШАЛ [56, 77].

Tunka-Rex

В настоящее время в Тункинской долине (республика Бурятия) на территории черенковской установки Тунка-133 развернута установка Tunka-Rex (TunkaRadioEXtension), представляющая собой комплекс из 44 антенн, распределенных на площади 3 км² (Рис. 1.17.). Установка детектирует радиоизлучение ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц. Измерения проводятся совместно с установкой Тунка-133, которая регистрирует черенковское излучение ШАЛ в энергетическом диапазоне $10^{16.5} - 10^{18}$ эВ. Совместные измерения радиоизлучения и черенковского света предоставляют уникальную возможность для кросс калибровки этих двух калориметрических методов исследований [65, 78-81]. Основной целью Tunka-Rex является определение точности восстановления параметров атмосферного ливня, зарегистрированного по радиоизлучению ШАЛ. Преимуществом Tunka-Rex является достаточно низкий уровень шума в Тункинской долине, простота и низкая стоимость антенн. Эксперимент Tunka-Rex будет подробно рассматриваться в следующей главе.



Рис. 1.17. Экспериментальная установка Tunka-Rex. Слева: одна из антенн Tunka-Rex. Справа: географическое расположение Tunka-Rex.

1.6 Резюме

Детектирование космических лучей высоких энергий по радиоизлучению ШАЛ является одним из наиболее перспективных методов исследования космических лучей высоких энергий. Основным механизмом радиоизлучения

ШАЛ является геомагнитный механизм, заключающийся в отклонении заряженных частиц в магнитном поле Земли.

Для того чтобы выделить из экспериментальных данных радиосигнал от ШАЛ, необходимо знать характеристики ожидаемого сигнала. С этой целью были созданы различные программы моделирования радиоимпульса ШАЛ. Из анализа современных математических моделей расчета радиоизлучения ШАЛ следует, что существует два подхода к расчету: микроскопический, т.е. представление ШАЛ как системы отдельных заряженных частиц и макроскопический, т.е. представление ШАЛ как системы непрерывных токов. Микроскопический подход более точный, но затратный по времени, а макроскопический не требует особых временных затрат, но менее точен в силу большого количества свободных параметров.

На основе математической программы моделирования CoREAS с использованием микроскопического подхода, заложенного в код Монте-Карло, исследованы характеристики радиоизлучения ШАЛ для различных геофизических условий. Показано, что амплитуда радиоимпульса ШАЛ растет пропорционально энергии первичной частицы, а с ростом расстояния от оси ливня уменьшается амплитуда импульса и увеличивается его длительность. Показана существенная зависимость функции пространственного распределения радиоизлучения и формы импульса от энергии и типа первичной частицы, а также от направления ее прихода относительно силовой линии магнитного поля. Показано влияние атмосферы Земли на формирование пространственно-временной структуры радиоизлучения ШАЛ.

На сегодняшний день существует несколько экспериментальных установок, которые успешно регистрируют радиоизлучение ШАЛ, но не многие эксперименты расположены в местах с довольно благоприятной помеховой обстановкой, что является главным критерием для выделения радиосигнала от ШАЛ. Преимуществами эксперимента Tunka-Rex является достаточно низкий уровень шума в месте расположения, а также простота и низкая стоимость антенн.

Глава 2

Экспериментальные измерения радиоизлучения ШАЛ на астрофизическом полигоне ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине

Астрофизическая обсерватория в Тункинской долине предназначена для исследования широких атмосферных ливней, инициированных частицами и гамма-излучением высоких энергий. В измерениях задействованы детекторы черенковского света, радиодетекторы и сцинтилляционные детекторы. Место проведения исследований обусловлено, в первую очередь, удаленностью от населенных пунктов и сопутствующих им световых и радиопомех, а так же большим количеством ясных дней в году.

Данная глава содержит результаты анализа экспериментов Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ, расположенного в Тункинской долине. Исследуются возможности регистрации радиоизлучения ШАЛ с учетом фоновой помеховой обстановки в месте расположения эксперимента. Проводится анализ влияния электронного оборудования и систем электропитания установок астрофизической обсерватории на регистрацию радиоизлучения ШАЛ. Для набора экспериментальных данных выполнена калибровка антенны Tunka-Rex и разработана система мониторинга состояния установки. Посредством аналитических расчетов и численного моделирования исследуется влияние расположения антенн на прием радиосигнала от ШАЛ.

2.1 Регистрация космических лучей в Тункинской долине

В последние годы Тункинский Астрофизический центр коллективного пользования ИГУ стал крупнейшим в России международным центром астрофизических исследований. Здесь уже действуют: широкоугольная черенковская установка Тунка-133, робот - телескоп МАСТЕР-II, сеть широкополосных радиодетекторов Tunka-Rex, начато сооружение сети

сцинтилляционных станций для регистрации заряженной компоненты ШАЛ, в том числе подземных станций для регистрации мюонов, что особенно важно в связи с началом строительства крупнейшей в мире по площади гамма – обсерватории Tunka- HiSCORE, нацеленной на решение задач гамма – астрономии высоких энергий [82, 83]. На рис. 2.1 на переднем плане - антенна детектора Tunka-Rex, подключенная к центру кластера установки Тунка-133 (белый ящик), рядом с которым расположен оптический модуль Тунка-133. В большом контейнере на заднем фоне расположен детектор Tunka-Grande. На рис. 2.2 показана схема расположения детекторов в Тункинской долине.



Рис 2.1. Фото детекторов, расположенных в Тункинской долине.

В результате дополнения установки Тунка-133 новыми детекторами радиоизлучения и заряженной компоненты ШАЛ Тункинский эксперимент стал единственной в мире «плотной» установкой, в которой регистрируются все компоненты ШАЛ. Таким образом, совместная работа детекторов позволит увеличить точность и достоверность получаемых экспериментальных данных в результате абсолютной энергетической калибровки.

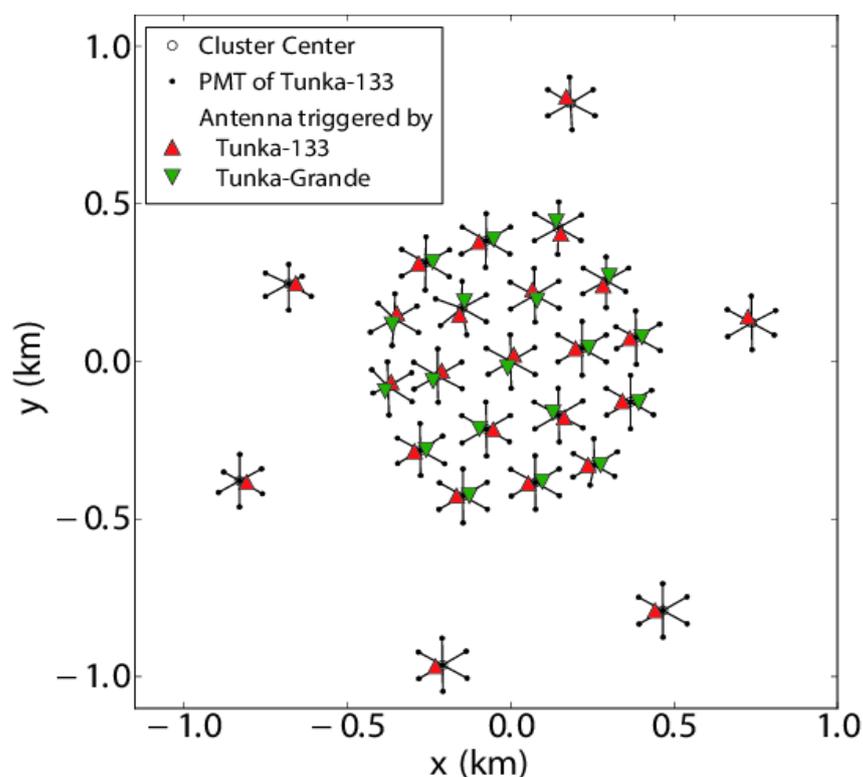


Рис. 2.2. Схема расположения детекторов в Тункинской долине.

Основными целями разрабатываемых и создаваемых новых детекторов и установок в Тункинской долине, а также соответственно новых методов и способов измерений, обработки и анализа экспериментальных данных, является исследование космических лучей и гамма-квантов высоких энергий, поиск их источников, изучение локальных астрофизических источников с наиболее мощным выделением энергии, изучение новых механизмов ускорения заряженных частиц, исследование процессов поглощения гамма-квантов на фоновом излучении (инфракрасном и микроволновом), поиск новых форм материи, поиск фотон-аксионных переходов и нарушений Лоренц-инвариантности, как нового подхода к поиску темной материи во Вселенной, решение других фундаментальных задач астрофизики элементарных частиц.

Тунка-133

В конце 2009 года в Тункинской долине в 50 км от озера Байкал организациями НИИПФ ИГУ, НИИЯФ МГУ, DESY (Германия), Туринским университетом (Италия) и другими введена в строй уникальная установка Тунка-133 для исследования первичных космических лучей в диапазоне энергий 10 – 1000 ПэВ

[25, 84, 85]. Установка регистрирует черенковский свет, излучаемый в атмосфере заряженными частицами ШАЛ. Изначально установка состояла из 133 оптических детекторов, расположенных на площади 1 км^2 (Рис. 2.3). Такой метод регистрации, при котором атмосфера выступает, как гигантский калориметр, позволяет достичь наилучшей точности в определении энергии космической частицы.



Рис. 2.3. Центр кластера установки Тунка-133 и один из оптических модулей
оптический модулей

В 2011 г. установка была дополнена 6-ю кластерами по 7 детекторов в каждом, расположенными на расстоянии 1 км от центра, что позволило эффективно детектировать ШАЛ на площади около 3 км^2 , расширить диапазон измерений в сторону высоких энергий и увеличить количество статистических данных для меньших энергий. При создании установки были использованы передовые достижения современной электроники, такие как передача информации по оптоволоконным кабелям, сверхбыстрые АЦП с частотой преобразования 200 МГц, логические матрицы высокой степени интеграции - FPGA. Таким образом, черенковская вспышка света ШАЛ в фотоприемнике преобразуется в импульс анодного тока, который усиливается и поступает на вход АЦП. Данные АЦП отслеживаются системой выработки локального триггера, который вместе с системой сбора данных организован в микросхеме FPGA. Информация о форме сигнала с каждого детектора позволяет восстанавливать положение оси ливня, даже если ось ливня находится вне геометрии установки. Измерения начинаются в октябре и заканчиваются в апреле-мае, проводятся по ночам, эффективное время

измерений составляет около 500 часов в год. Точность локации оси ШАЛ составляет 6 м, точность восстановления энергии - 15 %, а точность восстановления положения максимума развития ливня X_{\max} - 28 г/см² [86].

Восстановленный по данным трех сезонов работы (2009-2012) установки Тунка-133 энергетический спектр космических лучей (Рис. 2.4) находится в наилучшем согласии с новыми данными установки KASCADE-Grande при тяжелом составе первичных космических лучей.

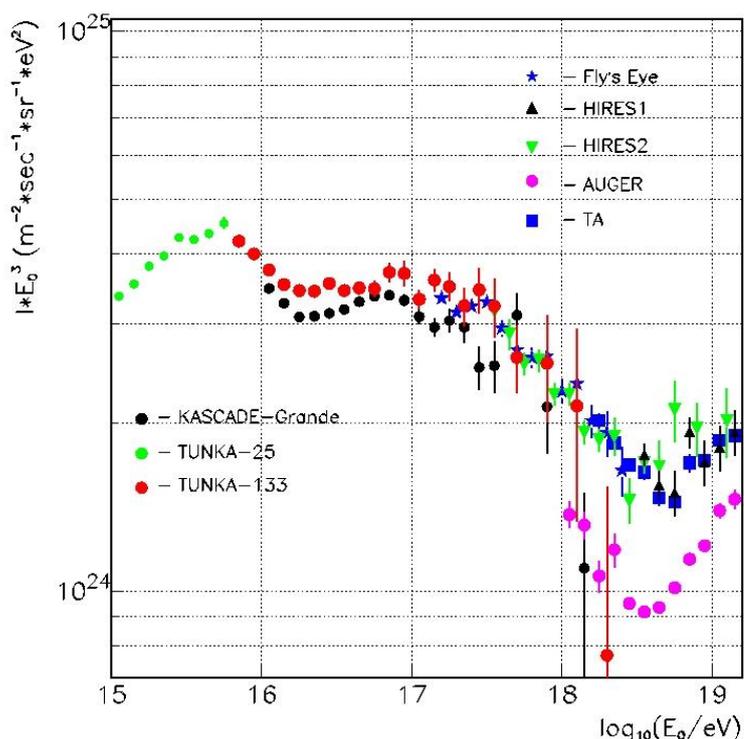


Рис. 2.4. Сравнение полученного установкой Тунка-133 спектра с другими экспериментами.

МАСТЕР

Летом 2010 года организациями НИИПФ ИГУ, ГАИШ МГУ и Уральским государственным университетом развернут сдвоенный автоматизированный робот-телескоп МАСТЕР, предназначенный для непрерывного оптического мониторинга неба с целью поиска некаталогизированных астрономических объектов до 20 звездной величины: сверхновых и новых звезд, оптического свечения гамма-всплесков, астероидов и комет (в том числе потенциально опасных), а также объектов околоземного пространства [87].

Tunka-HiSCORE

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований в Тункинской долине является поиск и исследование источников гамма-квантов высоких энергий. В 2012 году российскими организациями НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ, ИЯИ РАН и зарубежными организациями DESY, UniHH начато сооружение крупнейшей в мире гамма – обсерватории Tunka-HiSCORE [88, 89]. Преимущества гамма – квантов как носителя информации о самых мощных Галактических и метagalacticких источниках энергии по сравнению с заряженными космическими лучами связаны с тем, что гамма – кванты сохраняют направление движения на источник, а по сравнению с нейтрино – относительная простота их регистрации.

Гамма-обсерватория Tunka-HiSCORE будет включать в себя как широкоугольные низкопороговые оптические станции (Рис. 2.5), так и телескопы IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) с зеркалами диаметром порядка 3 м и светочувствительной матрицей. Новая установка в сочетании с многофункциональной установкой Тунка-133 позволит исследовать потоки гамма-квантов с энергией выше 50 ТэВ и впервые начать поиск астрофизических источников гамма-квантов с энергией выше 1 ПэВ (т.н. Пэватронов). С созданием установки Tunka-HiSCORE Россия войдет в число мировых лидеров в области гамма – астрономии высоких энергий.

Tunka-Grande

В 2013 г. началось развертывание сети сцинтилляционных станций для совместной работы с установкой Тунка-133. Каждая сцинтилляционная станция включает в себя детектор электронов, состоящий из 12 локальных сцинтилляционных детекторов общей площадью 8 м² (Рис. 2.6), и детектор мюонов общей площадью 5 м², состоящий из 8 аналогичных локальных детекторов. Мюонный детектор располагается под слоем грунта 1.5 м в непосредственной близости от детектора электронов. Сцинтилляционные детекторы электронов устанавливаются в специальных контейнерах на расстоянии не более 30 м от центров кластеров черенковской установки Тунка-133. Всего сцинтилляционный комплекс будет содержать 19 сцинтилляционных станций. Станции могут работать

как под управлением внешнего триггерного сигнала от ближайшего кластера установки Тунка-133, так и формировать собственный локальный триггер от детектора электронов. Электроника сцинтилляционной станции во многом совпадает с электроникой кластера установки Тунка-133. Дополнительным является наличие в каждой станции двух шестиканальных аналоговых сумматоров сигналов с детектора электронов. Составляющие электронный детектор 12 локальных сцинтилляционных детекторов разделены на две половины и подключены к двум разным сумматорам. Условие выработки локального триггера — наличие сигнала от электронной компоненты ШАЛ на выходе каждого сумматора в пределах 100 нс. [90, 91].

Включение сцинтилляционных детекторов в состав установки Тунка-133 позволит регистрировать не только черенковское излучение ШАЛ, но и его электронную и мюонную компоненты, и, следовательно, даст возможность получать качественно новые экспериментальные данные о космических лучах в области энергий 10 – 1000 ПэВ. Сцинтилляционные детекторы позволят вести круглосуточную регистрацию событий, что приведёт к увеличению статистики, в том числе и в области энергий выше 100 ПэВ. Использование триггера от Tunka-Grande для работы радиоустановки Tunka-Rex привело к увеличению эффективного времени радиоизмерений на порядок. Появится возможность проведения абсолютной энергетической калибровки черенковской установки и улучшится точность восстановления характеристик ШАЛ, поскольку увеличится объем информации, получаемой из каждого отдельного события. Энергетический диапазон регистрации событий расширится в область сверхвысоких энергий.

2.2 Установка Tunka-Rex для регистрации радиоизлучения ШАЛ

Успешная работа установки Тунка-133, ее развитая информационная инфраструктура и отличные метрологические характеристики привели к мысли создать на базе ее систему регистрации радиоимпульсов ШАЛ для отработки методики восстановления основных характеристик ливня по измерениям его электромагнитного излучения в радиодиапазоне. Размер экспериментальных установок, регистрирующих радиоизлучение, должен быть не меньше 300 * 300 м. Площадь Тункинской обсерватории порядка одного квадратного километра, что

перекрывает это условие в несколько раз, повышая статистику регистрации. 8 октября 2012 года запущена установка по регистрации радиоизлучения ШАЛ в Тункинской долине Tunka-Rex. До 2014 года в каждом кластере установки Тунка-133 стояло по одной антенной системе, подключенной к центру кластера (25 антенных станций обеспечивают площадь регистрации более 1 км²) (Рис. 2.2) [78, 79].

Основная цель эксперимента Tunka-Rex – выяснить предел точности восстановления параметров породившей каскад частицы по измерениям радиоизлучения ливня и, таким образом, получить представление о возможности использования радиоантенн как альтернативы классическим методам исследования ШАЛ. Совместные измерения с черенковской установкой Тунка-133 дают возможность проведения взаимной калибровки детекторов. В частности с помощью черенковских данных может быть проверена точность восстановления энергии и положения X_{\max} , полученных по радиоизмерениям. Таким образом, это уникальная не имеющая аналогов гибридная система по регистрации черенковского света и радиоизлучения от ШАЛ.

В свою очередь, радиоантенны, в отличие от детекторов черенковского света, не зависят от атмосферы и погодных условий, проще в установке и обслуживании. С 2014 года было установлено 19 дополнительных антенных станций, подключенных к станциям сцинтилляционных детекторов. Это позволит на порядок увеличить эффективное время работы радиоустановки.

Установка Tunka-Rex [92, 93] детектирует радиоизлучение ШАЛ в диапазоне 30-80 МГц (Рис. 2.1). Этот диапазон является оптимальным для регистрации когерентного радиоизлучения ШАЛ. Ограничение снизу обусловлено интенсивным использованием коротковолнового диапазона вещательными, любительскими и профессиональными радиостанциями. Сверху - характерными размерностями распределения зарядов в стволе ШАЛ, определяющих область когерентности радиоизлучения. Размер области распространения ливня определяется плотностью среды. В атмосфере поперечные размеры ливня составляют примерно 100 м, а длины излучаемых волн — несколько метров. Кроме того, на частотах до 20 МГц из-за наличия больших естественных радишумов преимущественно грозового

происхождения не представляется возможным выделять радиоимпульсы ШАЛ с достаточной эффективностью.

В качестве детектирующего элемента Tunka-Rex используется 2 петлевые антенны типа SALLA (Short Aperiodic Loaded Loop Antenna) [94], ориентируемые на северо-западное и северо-восточное направление. Такой тип антенны, разработанный немецким инженером Оливером Крёмером, обладает двумя основными преимуществами: во-первых, эти антенны недороги и просты в изготовлении, во-вторых, их диаграмма направленности мало зависит от подстилающей поверхности (Рис. 2.5).

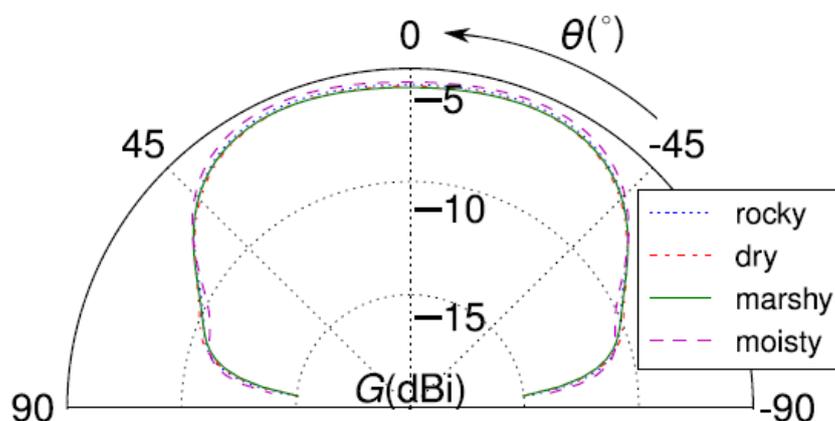


Рис. 2.5. Диаграмма направленности SALLA в вертикальной плоскости для частоты 50 МГц. Различные линии соответствуют разным типам поверхности: каменная, сухая, болотистая, влажная.

Расстояние между антенными станциями – 200 м. Каждая антенная станция имеет две перпендикулярные антенны, что позволяет восстанавливать поляризацию электромагнитной волны. Антенны в нижней части замкнуты на нагрузку, а в верхней подключены через согласующий трансформатор импеданса к широкополосному предусилителю LNA (Low Noise Amplifier - усилитель с коэффициентом передачи 24 дБ, разработанный на базе микросхемы MGA-62563). Далее сигнал проходит по 30 метровому кабелю RG213 в центр кластера установки Тунка-133 на фильтр-усилитель, который является адаптированной версией усилителя, используемого на обсерватории Пьер Оже в установке AERA (Рис. 2.6). Фильтр-усилитель обладает следующими характеристиками: полоса пропускания фильтра 30-76 МГц, коэффициент усиления 32 дБ, подавление боковых частот

более 90 дБ (Рис. 2.7). Усиленный фильтром-услителем сигнал подается на вход платы АЦП системы сбора данных установки Тунка-133, где оцифровывается с частотой дискретизации 200 МГц и разрешением 12 бит. Передаточные характеристики основных элементов цепи усиления сигнала (LNA, фильтры-усилители, кабеля) были промерены в институте технологий г. Карлсруэ (Германия) с помощью анализатора электрических цепей.

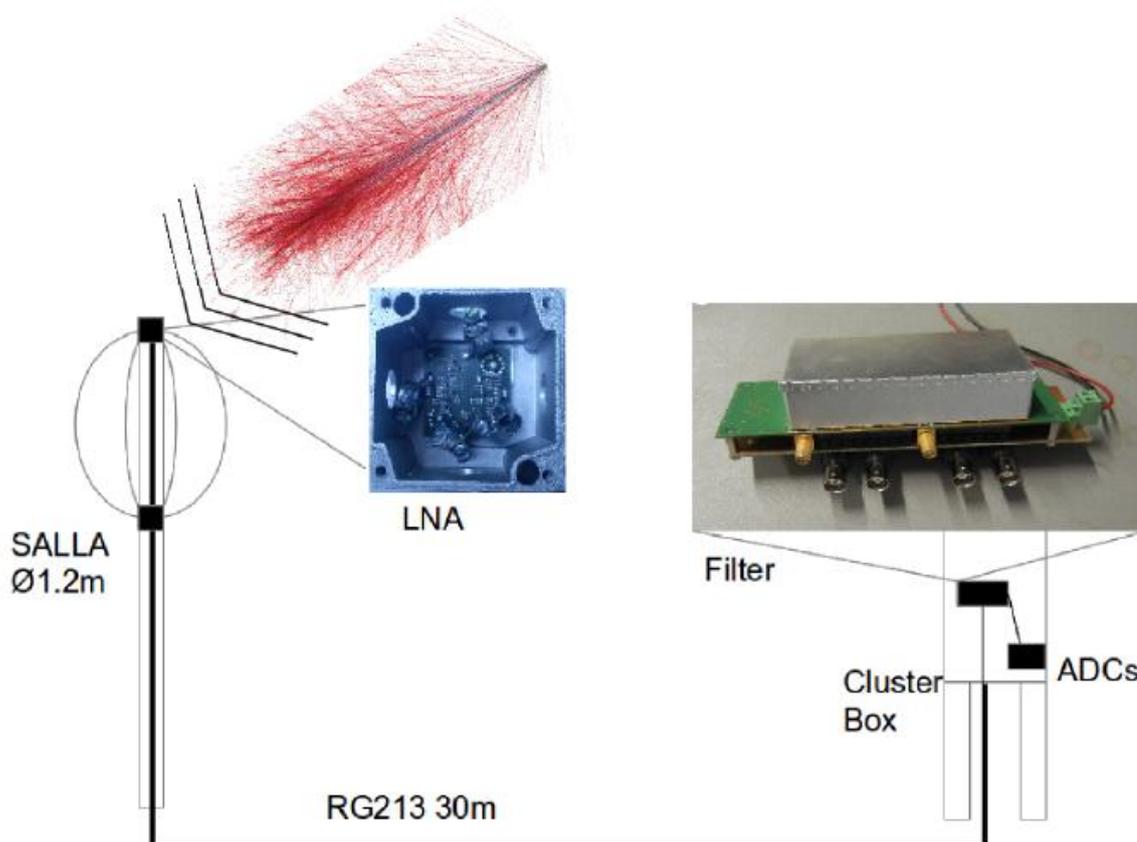


Рис. 2.6. Схематическое изображение тракта распространения сигнала станции детектора Tunka-Rex.

Для изучения характеристик антенны Романом Хиллером в институте технологий г. Карлсруэ (Германия) были проведены соответствующие измерения (Рис. 2.8) [93]. Был применен метод калибровки, использованный в эксперименте LOPES [95], а позже в эксперименте LOFAR. Метод основан на применении опорного источника излучения VSQ1000, состоящего из импульсного генератора RSG1000 и биконической широкополосной антенны DPA4000. Источник излучает дискретный спектр с шагом 1 МГц, рабочий диапазон опорного источника 30-1000 МГц. Опорный источник перемещался на расстоянии 12 м от антенны с помощью

подъемного крана, расположенного в 20 м от приемной антенны. Полученный с выхода фильтра-усилителя сигнал записывался с помощью осциллографа.

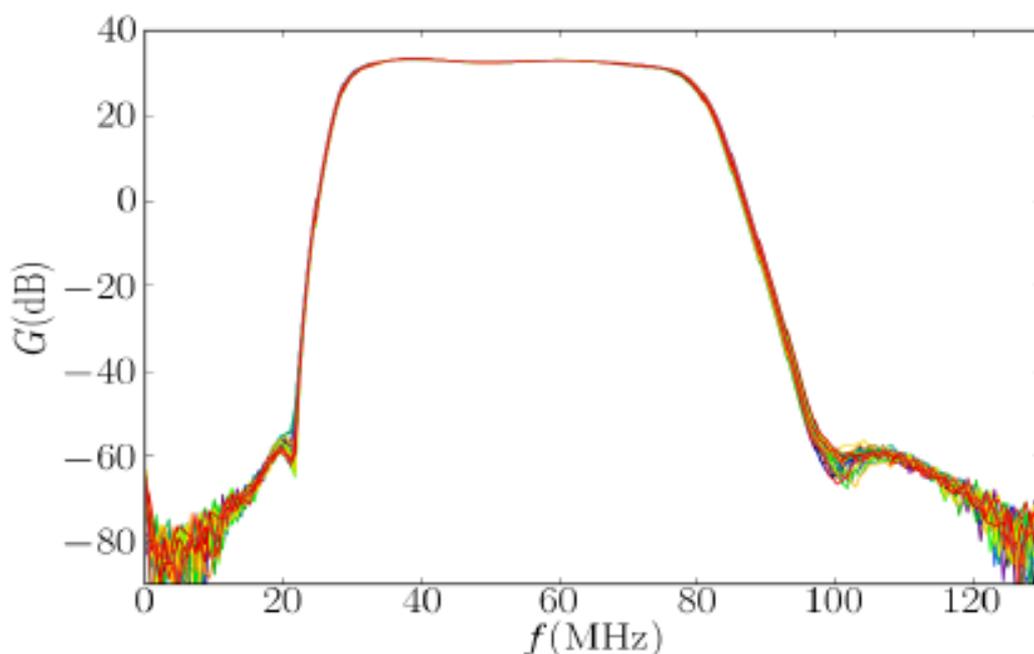


Рис. 2.7. АЧХ фильтров-усилителей установки Tunka-Rex (25 первых экземпляров).

Далее рассчитывались спектральные составляющие принятого сигнала и сравнивались с предполагаемой напряженностью поля опорного источника на приемной антенне. Для того чтобы описать диаграмму направленности антенны, необходимо было провести калибровку для всех зенитных углов и направлений, что представлялось слишком трудоёмким. Поэтому использовалось объединение двух методов: моделировалась диаграмма направленности с помощью программы NEC2, а калибровка амплитуды выполнялась только для зенитных углов 0° , 20° , 34° , 49° и 68° . Таким образом, был откалиброван практически весь тракт, по которому проходит сигнал, за исключением последней части, которой является плата АЦП системы сбора данных установки Tunka-133, которую не представлялось возможным развернуть в г. Карлсруэ. В последующем в Тункинской долине на установке Tunka-Rex с помощью генератора синусоидального сигнала было измерено поведение АЧХ входных цепей платы АЦП. Оказалось, что разброс в частотной области составляет до 20 %, что приходится учитывать при восстановлении сигнала [96].

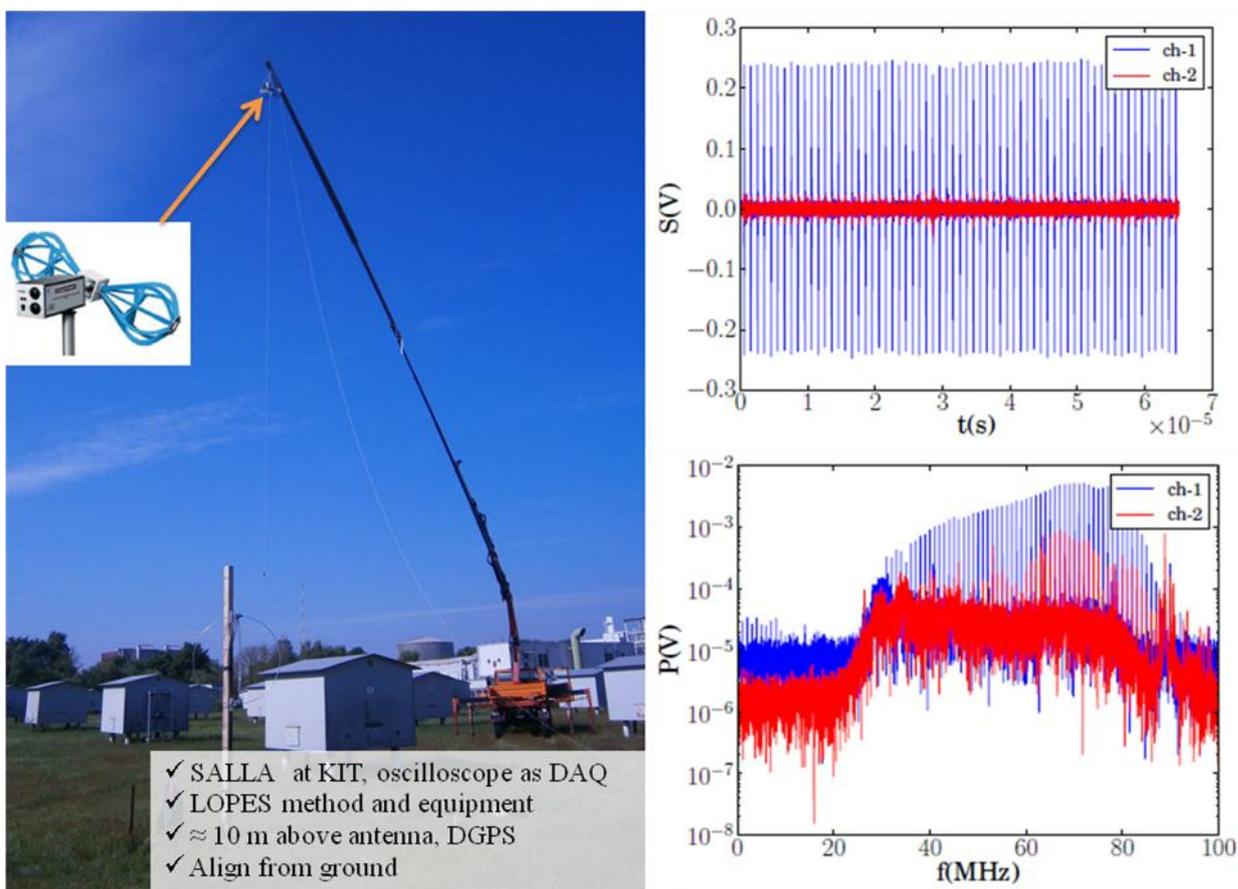


Рис. 2.8. Калибровка антенны Tunka-Rex.

Измеренные характеристики тракта распространения сигнала используются для восстановления напряженности электромагнитного поля на приемных антеннах. На рис. 2.11 представлена схема восстановления сигнала на антенне с соответствующими преобразованиями в частотной области. Вначале производится преобразование отсчетов АЦП в напряжение. Затем, используя измеренные параметры усилителей и кабелей, восстанавливается напряжение, наведенное радиоимпульсом на антенну (Рис. 2.9). Для сравнения результатов эксперимента Tunka-Rex с результатами других радио детекторов или моделирования электрическое поле должно быть представлено в абсолютных единицах. Преобразование входного сигнала может быть описано с помощью свертки в частотной области выходного сигнала с передаточными характеристиками тракта. Далее из входного сигнала, используя данные о диаграмме направленности, можно получить электромагнитное поле [93].

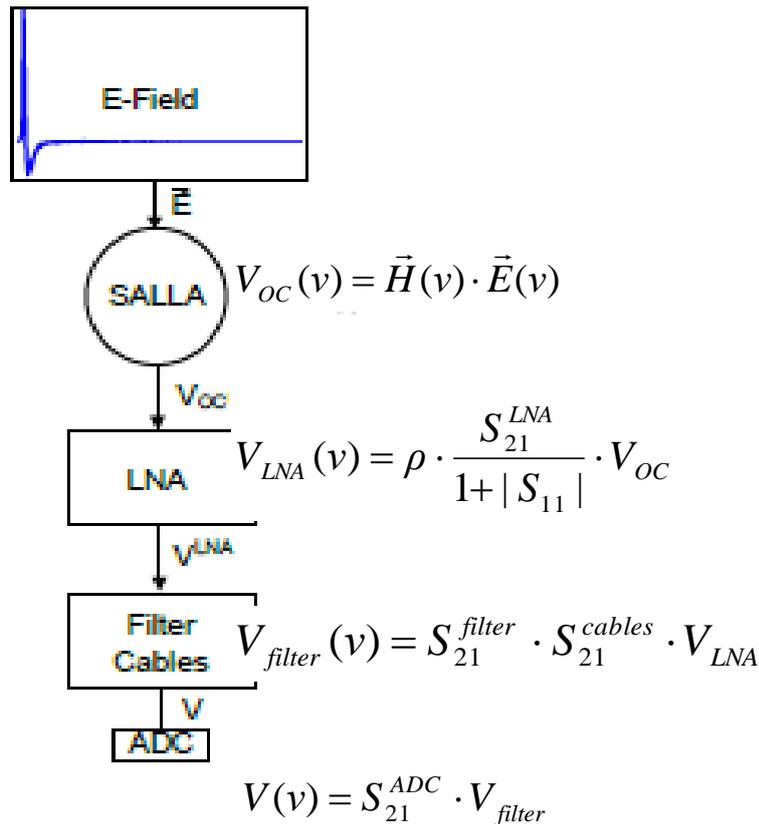


Рис. 2.9. Схема восстановления сигнала с соответствующими преобразованиями в частотной области

Общая погрешность восстановления абсолютной амплитуды сигнала по оценке Романа Хиллера составляет 37%, где доминирующий вклад вносит погрешность калибровки источника – 33%. В экспериментах LOPES и LOFAR используется тот же источник калибровки, что делает результаты экспериментов хорошо сопоставимыми.

2.3 Анализ влияния положения антенны на прием радиосигнала ШАЛ

В большинстве современных экспериментов, детектирующих радиоизлучение ШАЛ, антенны направлены строго на геомагнитные север-юг и запад-восток [53, 54, 55]. Так как радиосигнал ШАЛ поляризован, то такое расположение антенн предполагает более высокую статистику наблюдений, поскольку в одном из радиоканалов (запад-восток) всегда будет сигнал с высокой амплитудой. Но для того, чтобы восстановить вектор электрического поля необходимо иметь сигнал в обоих каналах. С этой целью антенны Tunka-Rex были

повернуты на 45° относительно геомагнитного полюса аналогично эксперименту LOFAR [56]. Такое расположение антенн предполагает наличие сигнала в обоих каналах с относительно равной амплитудой, что позволяет определить поляризацию сигнала [97].

Из Главы 1 п. 1.2. следует, что основной вклад в радиоизлучение ШАЛ дает геомагнитный механизм, рассматривается только компонента E_{EW} , которая пропорциональна силе Лоренца:

$$\vec{E} = (\vec{V} \times \vec{B}) = \begin{pmatrix} i & j & k \\ \sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \\ \sin \theta_B \cos \varphi_B & \sin \theta_B \sin \varphi_B & \cos \theta_B \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

где \vec{B} – магнитное поле Земли в месте расположения эксперимента, \vec{V} – направление оси ШАЛ, θ и φ – зенитный и азимутальный угол ШАЛ, θ_B и φ_B – зенитный и азимутальный угол магнитного поля Земли в месте расположения антенн.

Для того чтобы оценить эффективность каждой конфигурации антенн, то есть, при какой конфигурации лучше сигнал, а при какой восстановление поляризации, рассмотрим два типа конфигурации антенн: «А» – антенны направлены строго на геомагнитный север и восток, «А'» – антенны повернуты на 45° (Рис. 2.10). Далее, посчитаем проекции электрического поля на антеннах для двух конфигураций «А» и «А'»:

$$\begin{aligned} \vec{A}_1 &= \{1;0;0\} \Rightarrow (\vec{E}, \vec{A}_1) & \vec{A}_1' &= \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2}; \frac{\sqrt{2}}{2}; 0 \right\} \Rightarrow (\vec{E}, \vec{A}_1') \\ \vec{A}_2 &= \{0;1;0\} \Rightarrow (\vec{E}, \vec{A}_2) & \vec{A}_2' &= \left\{ -\frac{\sqrt{2}}{2}; \frac{\sqrt{2}}{2}; 0 \right\} \Rightarrow (\vec{E}, \vec{A}_2') \end{aligned} \quad (2.2)$$

Для того, чтобы оценить какая конфигурация антенн более эффективна вычислим разность между максимальными компонентами для каждой конфигурации:

$$\Delta \max(\theta, \varphi) = \max[(\vec{E}, \vec{A}_1)^2, (\vec{E}, \vec{A}_2)^2] - \max[(\vec{E}, \vec{A}_1')^2, (\vec{E}, \vec{A}_2')^2] \quad (2.3)$$

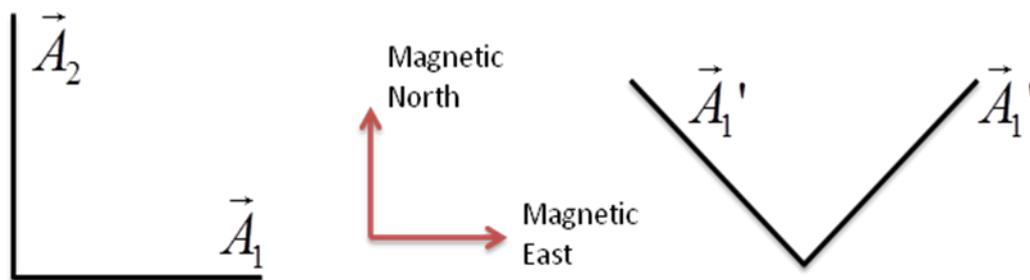


Рис. 2.10. Рассматриваемые конфигурации антенн

На рис. 2.11 изображена разность между конфигурациями (2.3) для зенитного угла ШАЛ $\theta = 45^\circ$ с учетом направления магнитного поля в месте расположения Tunka-Rex (см. Табл. 2.1, в нашей системе координат для Tunka-Rex $\theta_B = 18.2^\circ$), т.е. эффективность конфигурации антенн в зависимости от азимутального угла ШАЛ φ . Этот результат для ориентации антенн «А». График имеет как положительные, так и отрицательные значения. В том случае, когда значения положительные детектирование сигнала наблюдается в одном канале, что дает нам сигнал с более высокой амплитудой и в результате более высокую статистику, когда значения отрицательные, то сигнал наблюдается в обоих каналах, что позволит определить поляризацию сигнала и, соответственно, лучше восстановить вектор электрического поля ШАЛ. Для конфигурации антенн «А'» $\Delta \max$ имеет противоположный знак, поэтому график будет инвертированным.

Если же мы проинтегрируем (2.3) по азимутальному углу ШАЛ φ и возьмем зависимость от зенитного угла ШАЛ θ :

$$I(\theta) = \int_0^{2\pi} \Delta \max(\theta, \varphi) d\varphi \quad (2.4)$$

то получим, что при $\theta \geq \theta_B$ зависимость от поворота антенн вырождается (Рис. 2.12). Интегралы взяты для трех современных экспериментов с учетом магнитного склонения в месте расположения каждого из них: Tunka-Rex ($\theta_B = 18.2^\circ$), LOFAR ($\theta_B = 22^\circ$), AERA ($\theta_B = 53.4^\circ$). θ_B рассчитывается из табл. 2.1 в соответствии с рассматриваемой системой координат.

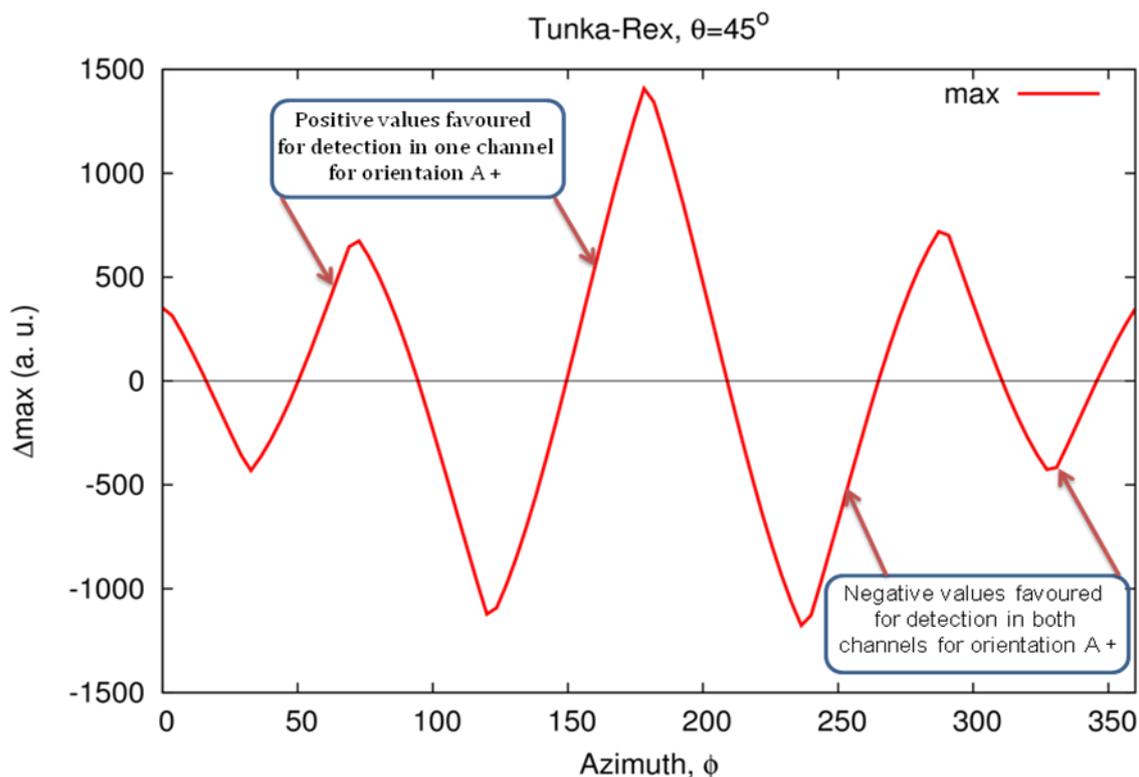


Рис. 2.11. Эффективность конфигурации антенн для магнитного поля Tunka-Rex и зенитного угла ШАЛ $\theta = 45^\circ$.

Эксперимент	Место расположения	Высота над уровнем моря, м	Величина магнитного поля, мкТл	Магнитное склонение, °
Tunka-Rex	Сибирь, ~ Иркутск	675	60.3	71.8
LOFAR	Нидерланды	0	49.3	68
AERA	Аргентина, Маларгуэ	1400	24.2	-36.7

Таблица 2.1: Сравнение магнитного поля для современных радиоэкспериментов.

В результате исследований можно сделать выводы, что ориентация антенн в случае Tunka-Rex важна только для вертикальных ливней (при $\theta < 18.2^\circ$), в то время как для наклонных ливней поворот антенны не должен сказаться на эффективности детектора. Значимое значение поворот антенны имеет для эксперимента AERA, так как для ливней, пришедших под зенитным углом $\theta < 53.4^\circ$ исходя из того, что их антенны направлены строго по геомагнитному северу и

востоку, они будут измерять преимущественно сигнал в одном канале с более высокой амплитудой.

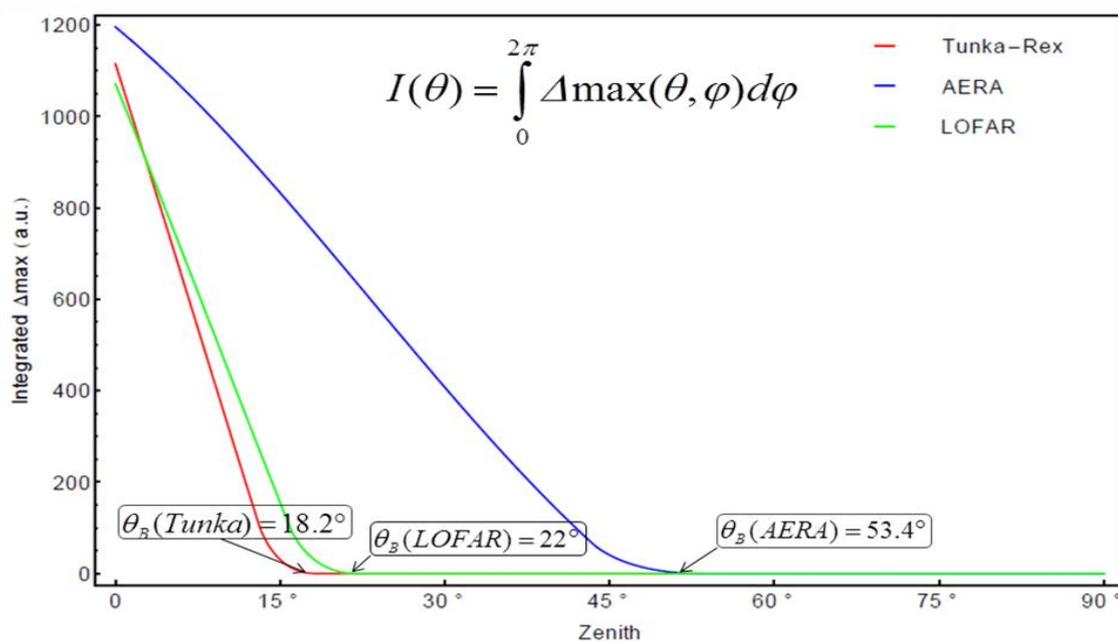


Рис. 2.12. Результат интегрирования разности конфигураций антенн $\Delta\max$ по направлению прихода ШАЛ для экспериментов Tunka-Rex, LOFAR, AERA.

Также было рассмотрено влияние поворота антенны на эффективность детектора Tunka-Rex в присутствии шума. Для этого используем базу данных радиоимпульсов, моделированных в программе CoREAS (см. Гл.1 п.1.4): для протона - 296 событий, для железа - 332 события. В реальных наблюдениях сигнал может быть замаскирован шумами, поэтому к событиям добавляем экспериментально померенный шум, который масштабируем от 50 % до 150 % от первоначальной амплитуды шума (6 уровней шума), так как на момент расчетов была неизвестна абсолютная калибровка антенны. Далее эти события обрабатывались с помощью модуля программного обеспечения Auger Offline для обработки данных с радиоустановок, модифицированного под нужды Tunka-Rex. Коллаборация Tunka-Rex принимает активное участие в разработке модулей Offline.

Для обработки данных Offline используется три критерия отбора событий ChannelSNRType (при учете minSNR=9):

- 1) Учитываются оба канала методом: $\sqrt{Ch_1^2 + Ch_2^2}$;
- 2) Канал с более высокой амплитудой;
- 3) Канал с меньшей амплитудой.

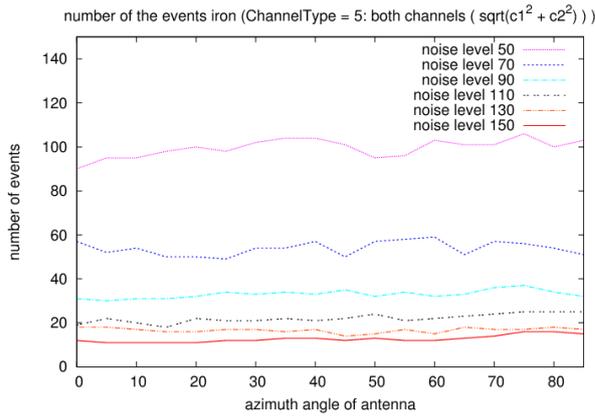
На рис. 2.13 и 2.14 представлены результаты обработки Offline для событий с учетом 6 уровней шумов, где в качестве первоначальной частицы берется ядро железа. На рис. 2.13 (а) и 2.13 (б) показано количество восстановленных событий для 1-го и 3-го критериев отбора, а на рис. 2.13 (в) и 2.13 (г) - количество восстановленных событий нормированное на значение, когда антенная система находится в конфигурации «А», соответственно. А на рис. 2.13 (д) - суммирование по всем уровням шумов для результатов 2.13 (в) и 2.13 (г) (нормирование и суммирование используется для наглядности результатов). На рис. 2.14 приведены аналогичные результаты для количества сработавших антенн

На рис. 2.15 и 2.16 так же представлено количество восстановленных событий и сработавших антенн в зависимости от азимутального угла антенны для различных уровней шумов при разных критериях обработки, где в качестве первоначальной частицы выступает протон.

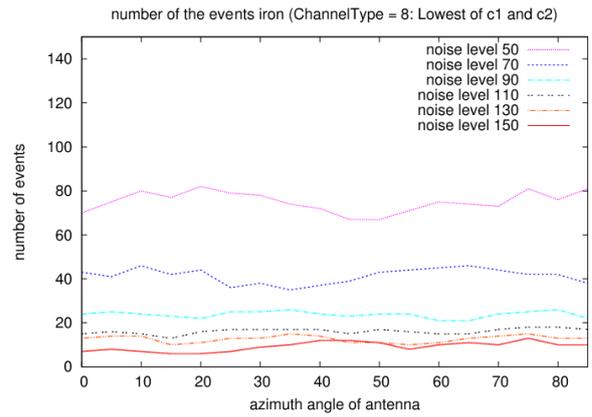
Как для протона, так и для ядра железа, результат обработки для 2-го критерия идентичен первому критерию.

В результате исследования было обнаружено, что моделирование предсказывает слабое влияние поворота антенной системы на эффективность детектора Tunka-Rex, что согласуется с теоретическими расчетами.

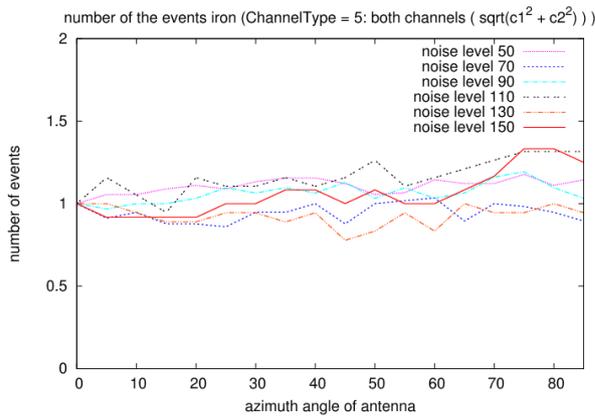
a)



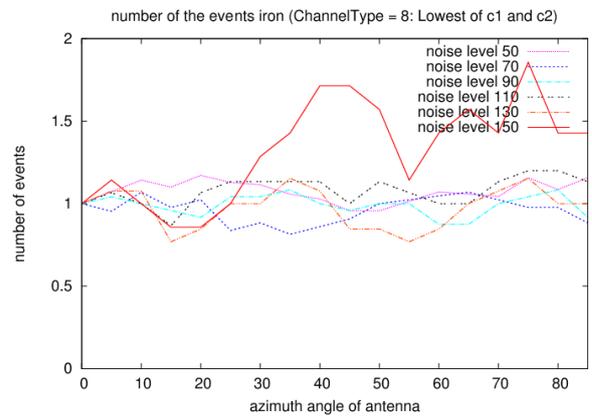
б)



в)



г)



д)

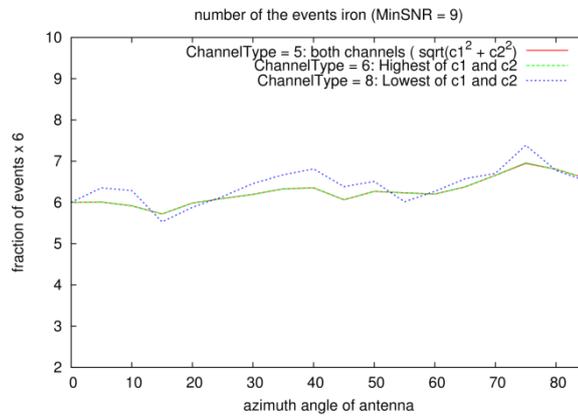


Рис. 2.13. Количество восстановленных событий и нормированное количество событий в случае 1-го критерия (а, в) и 3-го критерия (б, г) для шести уровней шумов. Суммированное по всем уровням шумов, нормированное количество событий для всех трех критериев (д). В качестве первичной частицы рассматривается ядро железа.

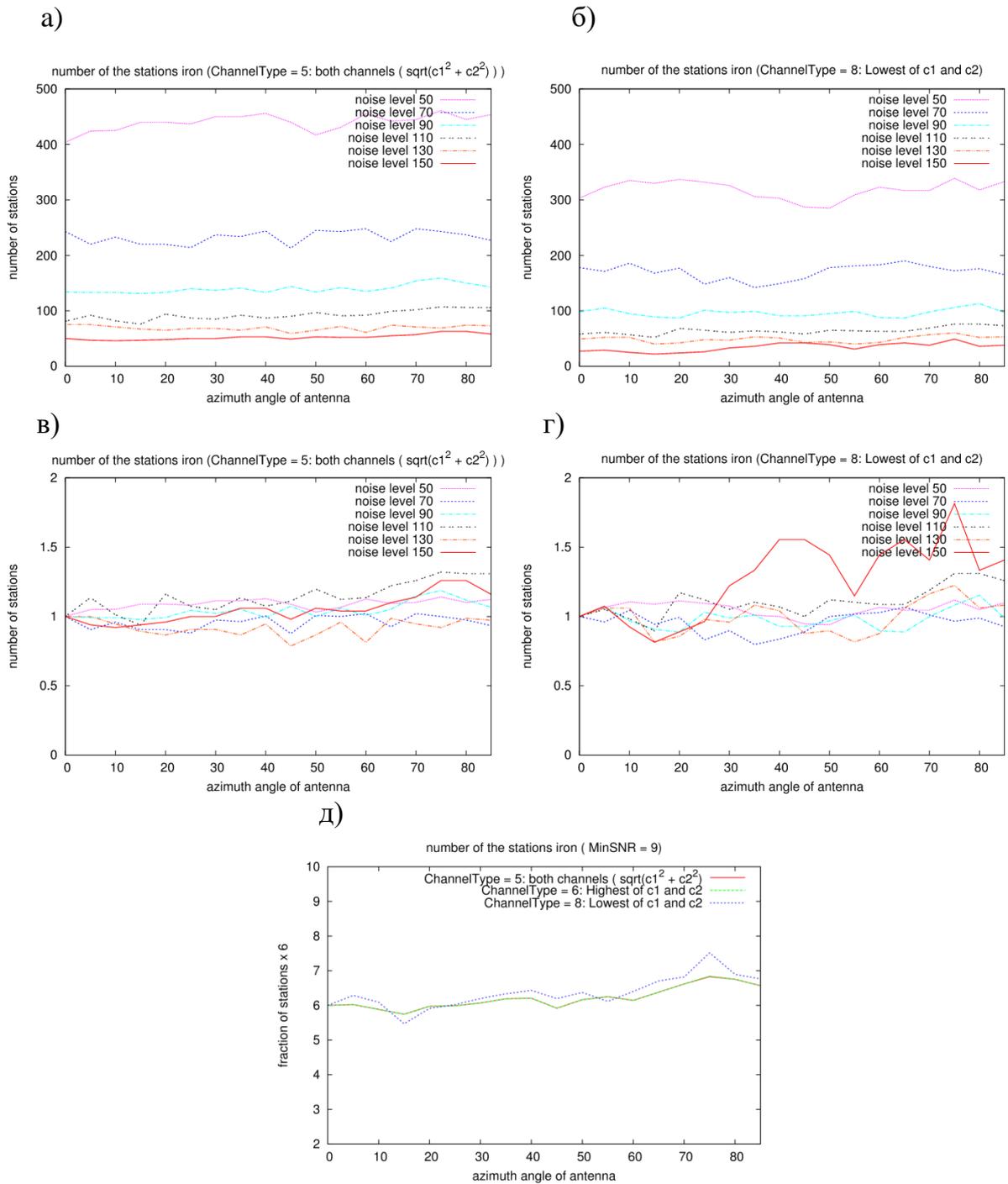
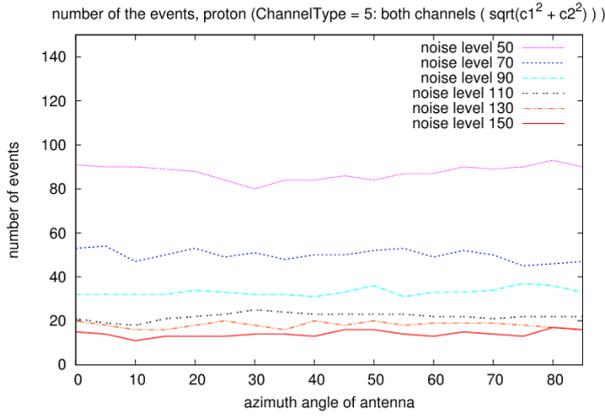
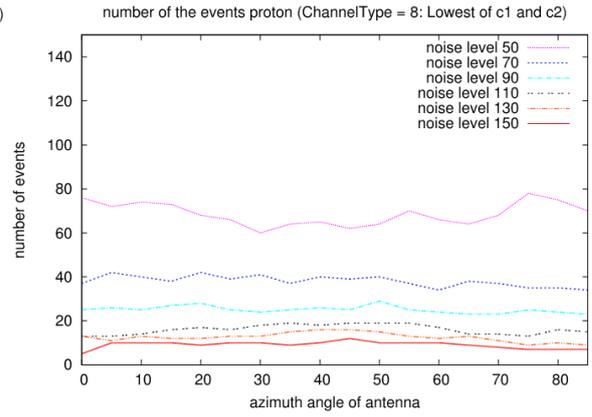


Рис. 2.14. Количество сработавших антенн и нормированное количество антенн в случае 1-го критерия (а,в) и 3-го критерия (б, г) для шести уровней шумов. Суммированное по всем уровням шумов, нормированное количество антенн для всех трех критериев (д). В качестве первичной частицы рассматривается ядро железа.

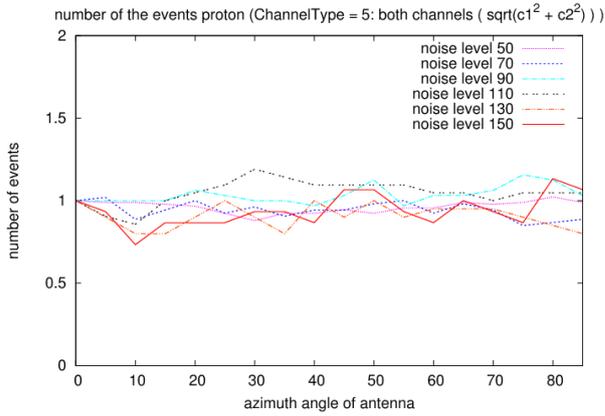
а)



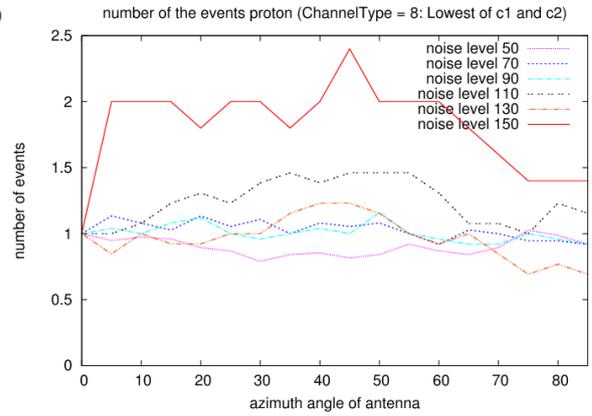
б)



в)



г)



д)

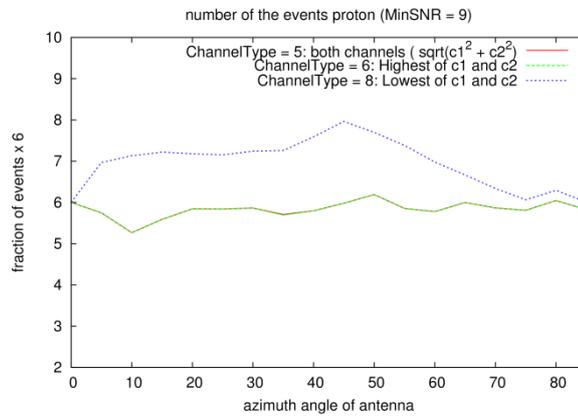
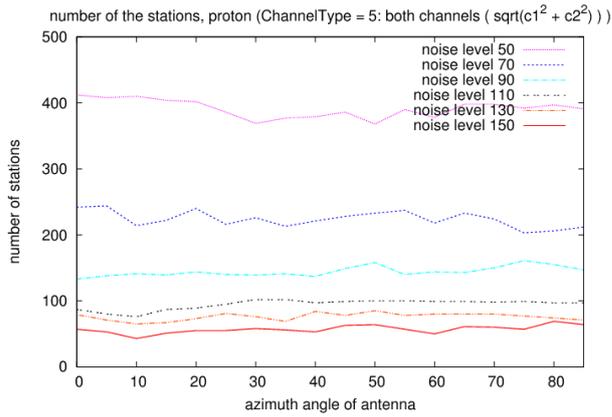
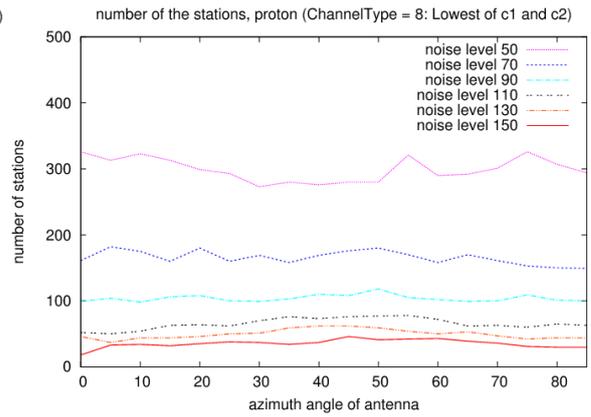


Рис. 2.15. Количество восстановленных событий и нормированное количество событий в случае 1-го критерия (а,в) и 3-го критерия (б, г) для шести уровней шумов. Суммированное по всем уровням шумов, нормированное количество событий для всех трех критериев (д). В качестве первичной частицы рассматривается протон.

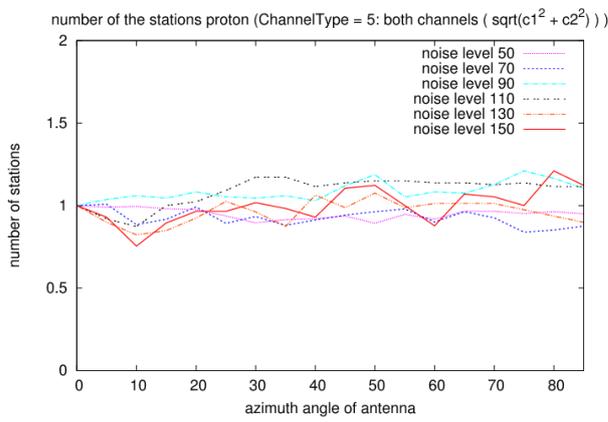
a)



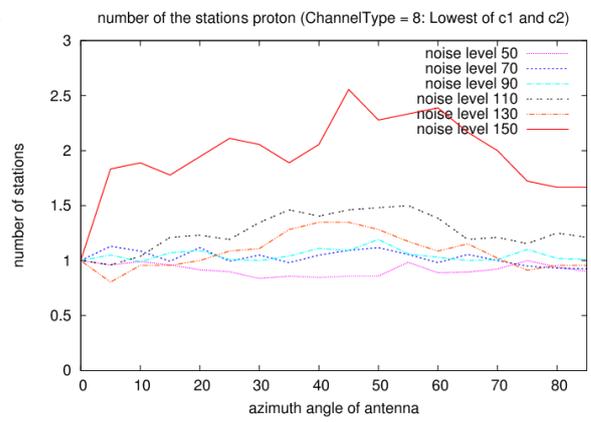
б)



в)



г)



д)

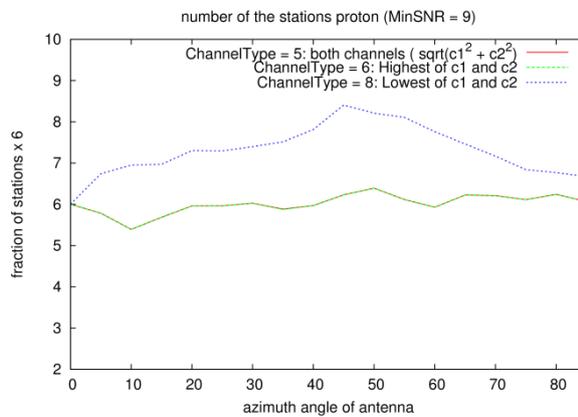


Рис. 2.16. Количество сработавших антенн и нормированное количество антенн на в случае 1-го критерия (а,в) и 3-го критерия (б, г) для шести уровней шумов. Суммированное по всем уровням шумов, нормированное количество антенн для всех трех критериев (д). В качестве первичной частицы рассматривается протон.

2.4 Выбор диаграммы направленности антенны

Используя простые аналитические расчеты, исследуем чувствительность детектора, т.е. определим при каких зенитных углах ШАЛ θ мы можем наиболее эффективно измерять сигнал. Другими словами, рассмотрим с какого направления приходит сигнал с наибольшей амплитудой, учитывая только геомагнитный механизм радиоизлучения [97]. Для этого, используя (2.1) и (2.2), берем интеграл от общей мощности, полученной на антенной системе конфигурации «А» (поскольку берется квадрат мощности, поэтому в этом случае конфигурация антенн не имеет значения), используя только величину магнитного поля местности, где расположены эксперименты Tunka-Rex, AERA и LOFAR (Табл. 2.1).

$$E_A^2 = (\vec{E}, \vec{A}_1)^2 + (\vec{E}, \vec{A}_2)^2 \quad (2.5)$$

Если рассмотреть интеграл мощности радиосигнала по всем направлениям прихода ШАЛ в зависимости от зенитных углов ШАЛ:

$$\int_0^{2\pi} E_A^2(\theta, \varphi) d\varphi = B^2 \pi (1 - \cos(2\theta_B) \cos(2\theta)) \quad (2.6)$$

то можно увидеть, что в случае наклонных ливней для эксперимента Tunka-Rex радиоизлучение ШАЛ, вызванное геомагнитным механизмом, особенно мощное (Рис. 2.17), поэтому в Тункинской долине более эффективным будет детектор для регистрации наклонных ливней. В эксперименте Tunka-Rex используется тип антенны SALLA, диаграмма направленности которой направлена преимущественно вверх, а также не зависит от подстилающей поверхности, и таким образом, к наклонным ливням данный тип антенны слабо чувствителен. Выбор данной антенны связан с тем, что в данный момент Tunka-Rex калибруется относительно установки Тунка-133, которая в силу конструкции детектора имеет ограничение для зенитного угла ШАЛ $\theta \leq 50^\circ$. Из рис. 2.19 можно также увидеть, что для эксперимента AERA зависимость мощности радиоизлучения от зенитного угла ШАЛ практически отсутствует, а радиоизлучение намного слабее, так как величина магнитного поля в месте расположения AERA значительно ниже (см. Табл. 2.1). Поэтому для эксперимента AERA может быть использована антенна с различной диаграммой направленности. Таким образом, для выбора диаграммы направленности антенны в будущих экспериментах, регистрирующих

радиоизлучение ШАЛ, важно знать не только величину магнитного поля, но также и его направление.

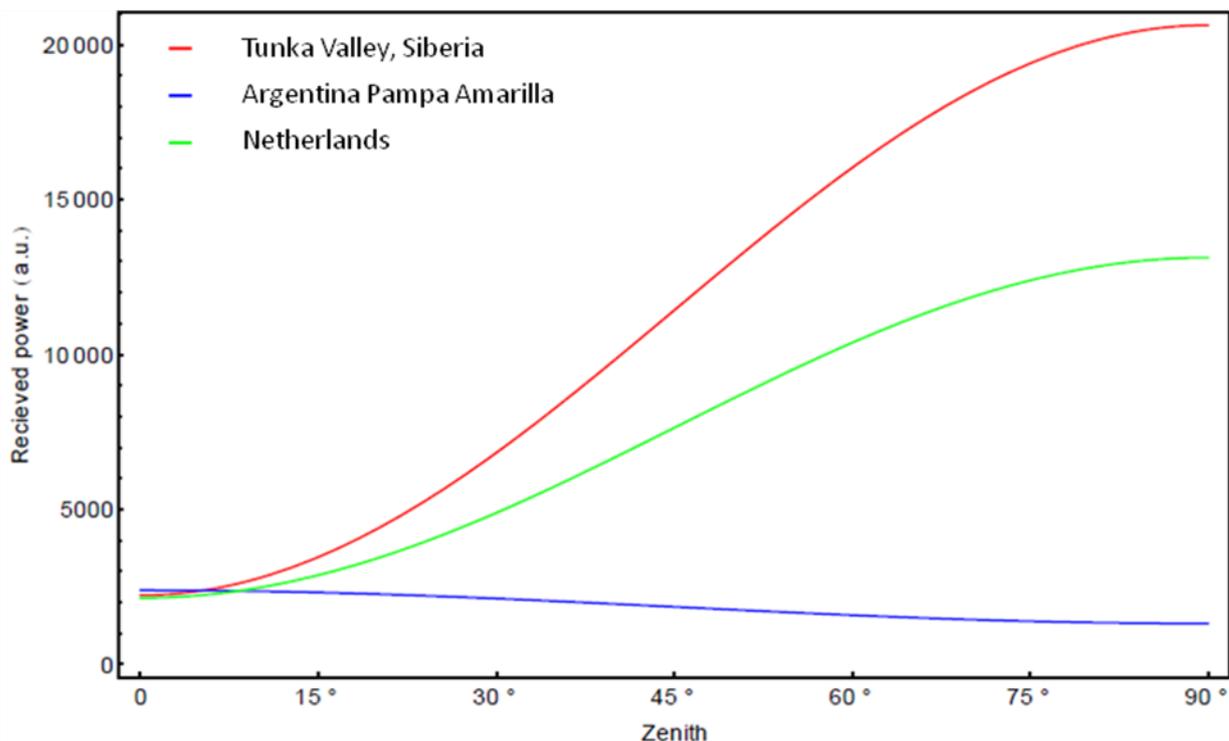


Рис. 2.17. Зависимость мощности радиоизлучения ШАЛ от зенитного угла для экспериментов Tunka-Rex, AERA и LOFAR: по оси x - зенитный угол ШАЛ, по оси y – интеграл мощности радиоизлучения ШАЛ.

С целью поиска перспективных методических и технических решений для дальнейшего развития метода регистрации радиоизлучения ШАЛ и использования полученных результатов для развития астрофизических исследований как на базе Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ, так и в других крупномасштабных экспериментах были исследованы новые варианты антенно-фидерных устройств детекторов радиоизлучения ШАЛ.

Разработаны пути модификации конструкции применяемой в эксперименте Тунка-Rex антенны SALLA (Рисунок 2.18), направленные на улучшение широкополосности антенны без ухудшения чувствительности, обусловленной применением балластного сопротивления. Проведено численное моделирование альтернативных антенн конструкций (Рисунок 2.19, Рисунок 2.20).

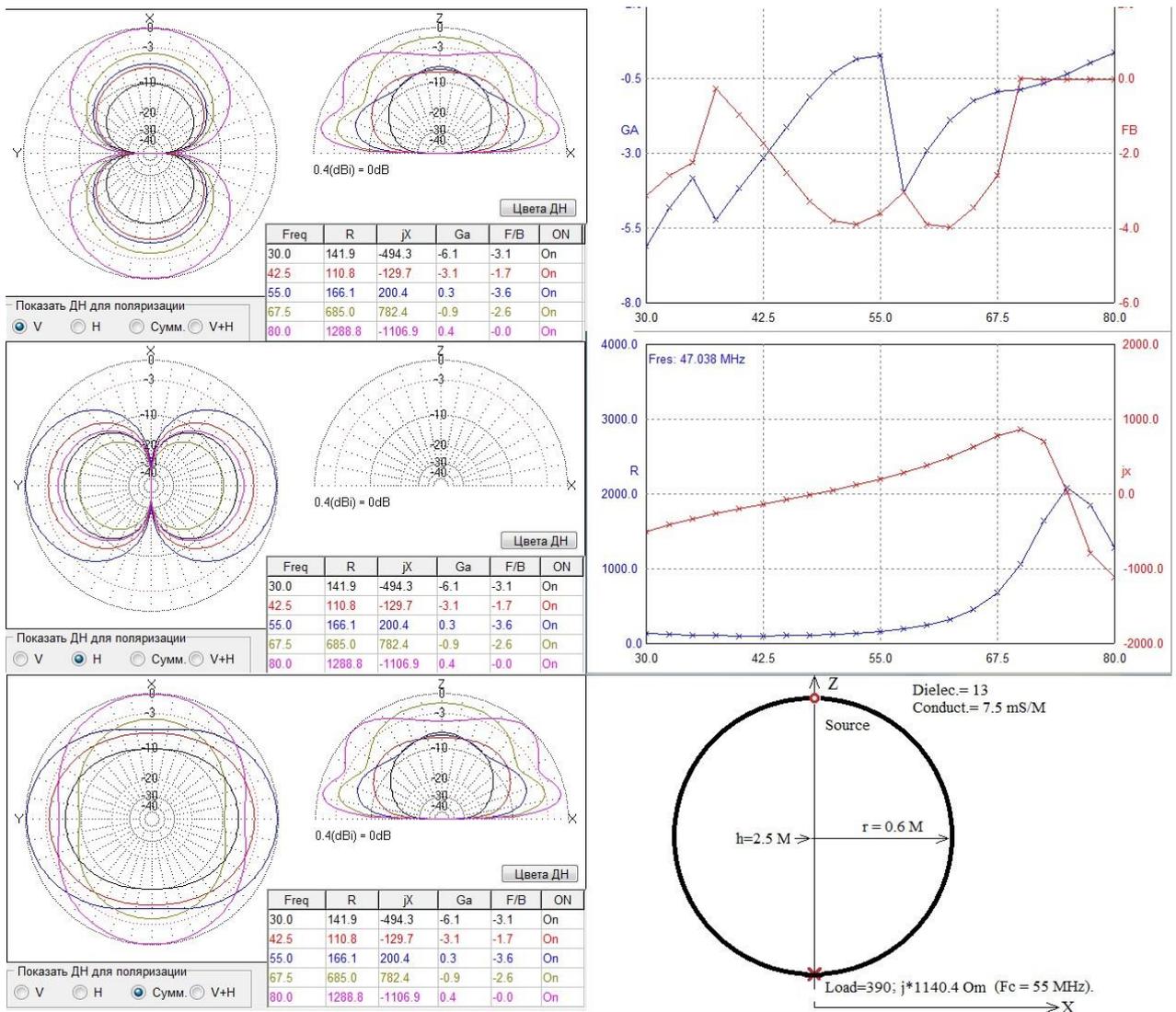
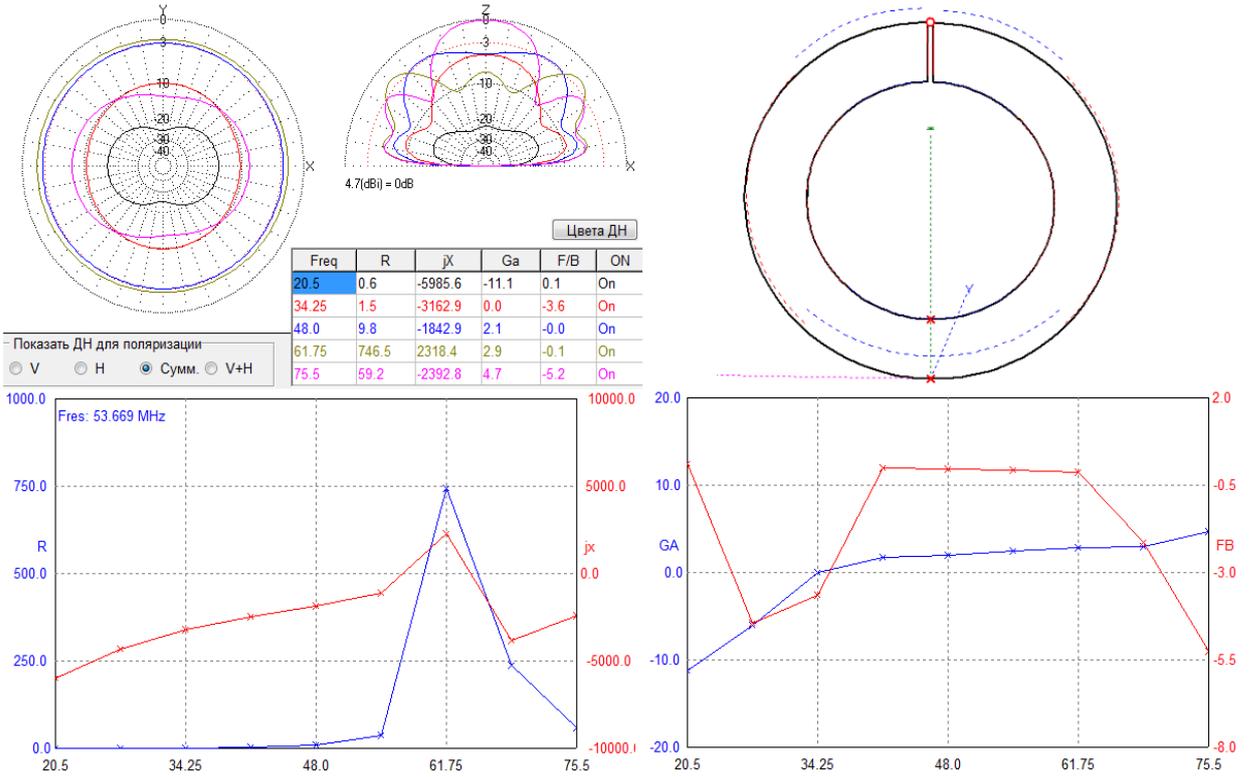


Рисунок 2.18. Результаты моделирования антенны SALLA

Результаты моделирования показали, что используемый в эксперименте Tunka-Rex тип антенны SALLA является наиболее оптимальным в сравнении с альтернативными антеннами.

a)



б)

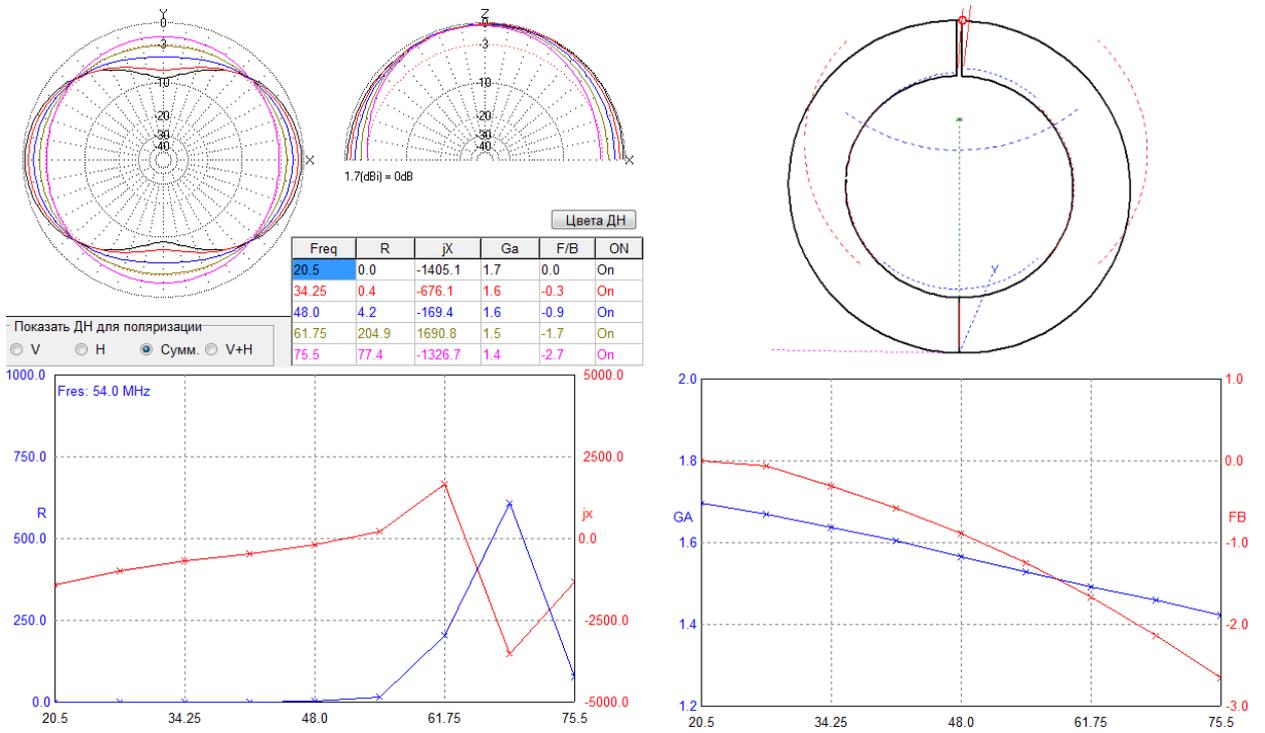
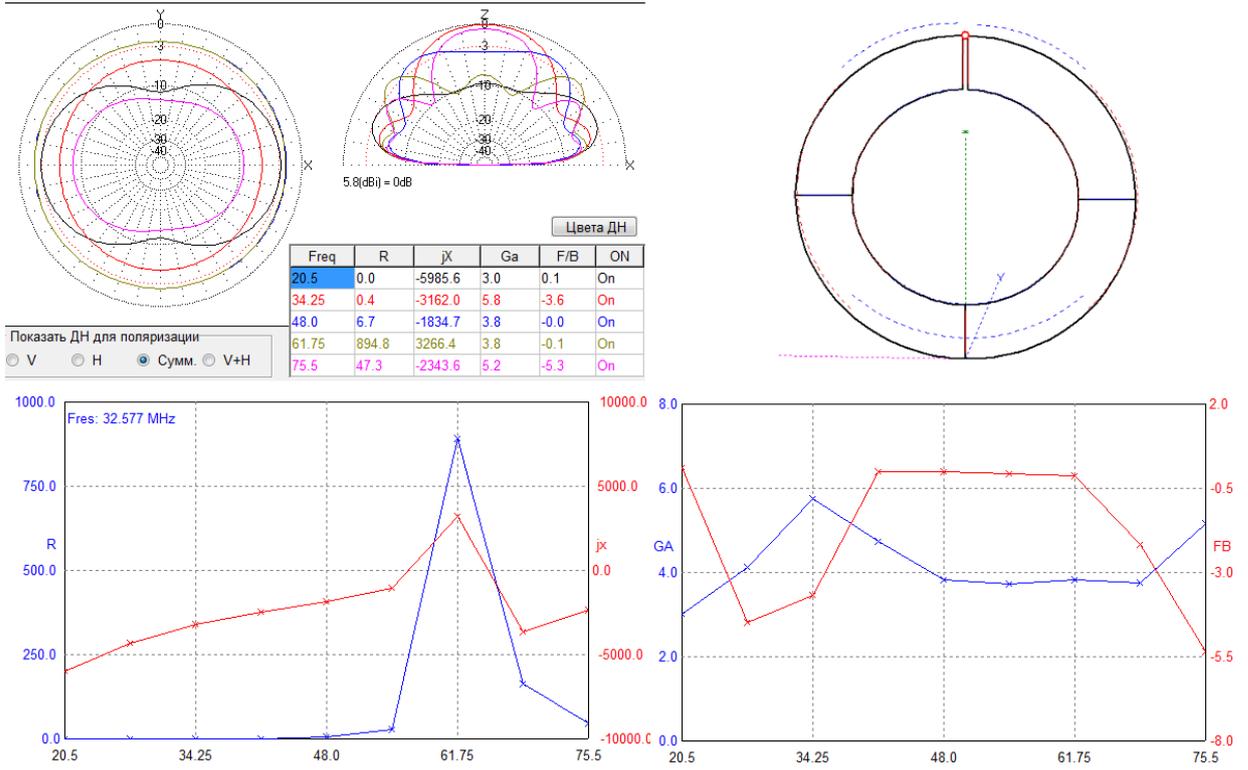


Рисунок 2.19. Результаты моделирования альтернативных антенн.

a)



б)

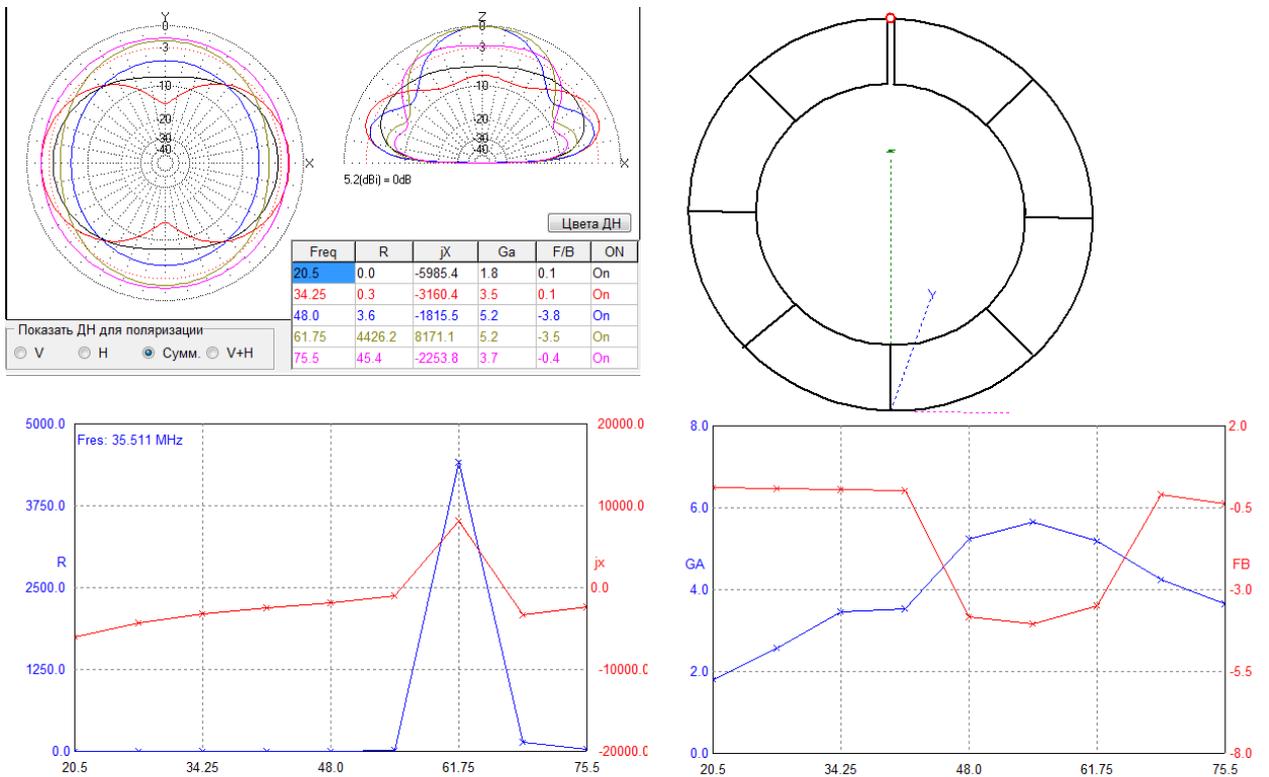


Рисунок 2.20. Результаты моделирования альтернативных антенн.

2.5 Анализ фона для регистрации радиоимпульсов ШАЛ в Тункинской долине

Одной из важных задач является увеличение статистики, т.е. количества полезных событий. Близкие к порогу регистрации события всегда будут содержать антенны с низким отношением сигнал-шум, поэтому необходимо стремиться с помощью различных методов фильтрации уменьшать амплитуду шума. Для этого необходимо исследовать помеховую обстановку, найти источники шумов, определить уровень шума самой аппаратуры регистрации, отсечь шумы системы сбора данных, выделить возможные внешние источники помех [98]. Исследовав характер шумов и помех можно применить соответствующие методы цифровой фильтрации сигналов.

Совместно с Паньковым Л.В. и Миргазовым Р.Р. проводились измерения электромагнитной шумовой обстановки в Тункинской долине в месте размещения комплексной установки Тунка-133. Для проведения измерения фоновых условий использовался многофункциональный измерительный прибор FSH4 [99] и измерительная антенна НК116 [100] (Рис. 2.21).



Рис. 2.21. Измерение шумов с помощью измерительной антенны НК116 с сертифицированной характеристикой в диапазоне 20 – 300 МГц.

Многофункциональный измерительный прибор FSH4 позволяет проводить измерения спектров, снятие амплитудно- и фазочастотных характеристик четырехполюсников, отыскивать повреждения в антенно-фидерных системах и многое другое в зависимости от приобретенных программных продуктов.

Для получения качественных представлений о помеховой обстановке с минимальным влиянием местных источников хорошо использовать режим измерения спектров с усреднением. Далее, в основном представлены данные измерения спектров в режиме усреднения по 100 спектрам с использованием детектора среднеквадратичных значений. На рис. 2.22 представлена реализация спектров помех сеанса измерений с 01 по 03 мая 2013 года (в нашем случае, помехами считаются как естественные шумы, так и излучение радиотехнических систем различного назначения). Для обработки данных спектроанализатора использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

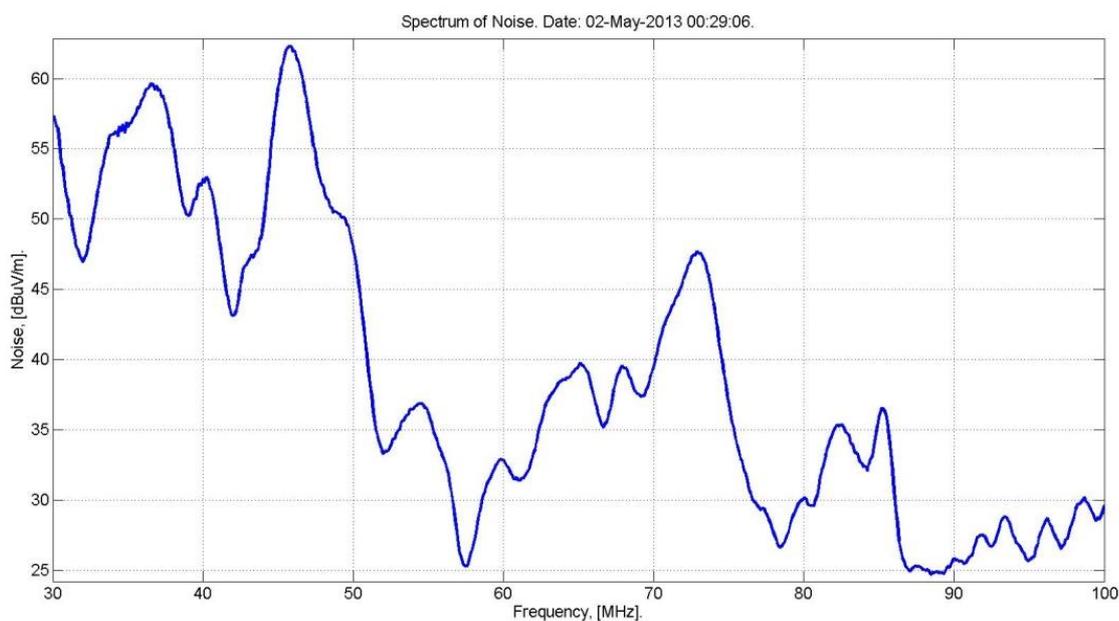


Рис. 2.22. Усредненный спектр шумов. Антенна НК116 (E-W).
(Усреднение: 100 спектров).

Измерения проводились на выходе измерительной антенны НК116, ось которой была ориентирована в направлении Запад-Восток. Таким образом, максимальное усиление сигнала соответствовало источникам, расположенным в северном и южном направлениях. На представленном графике просматривается

наличие широкополосных источников излучения, диапазон изменения уровня напряженности поля, которых в частотном интервале 30 – 100 МГц достигает величины более 35 дБ.

На рис. 2.23 представлена трехмерная спектрограмма, полученная за время данного цикла измерений (с 16:10 01.05.13 по 12:23 03.05 13). Здесь видно, что в течение суток поле в указанном диапазоне частот может изменяться более чем на 50 дБ.

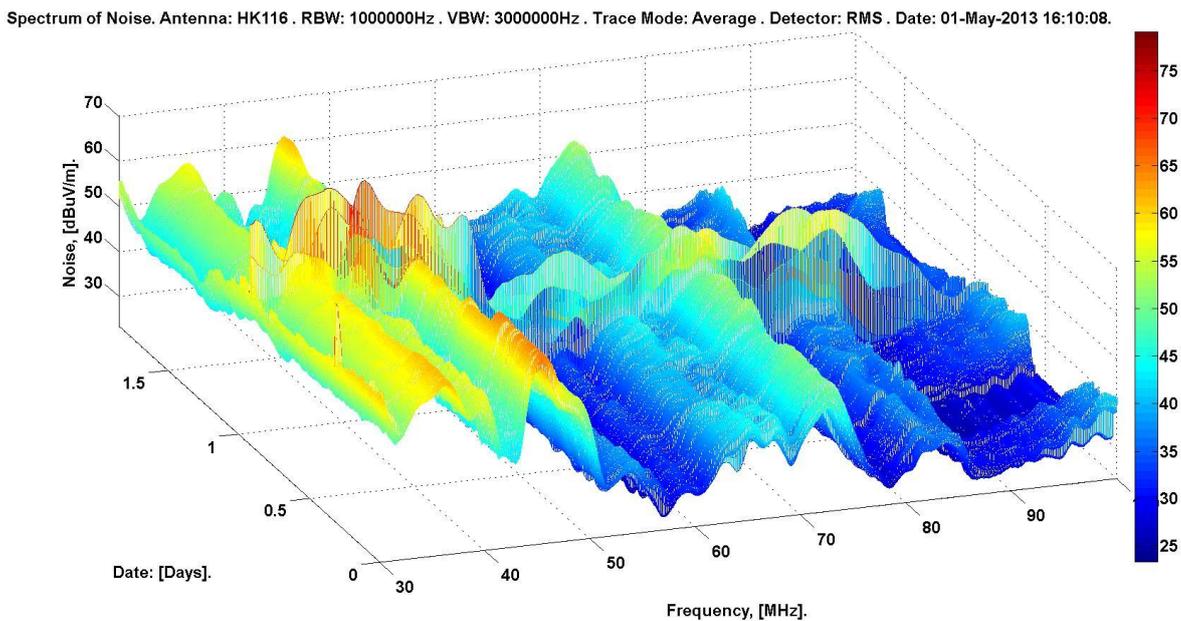


Рис. 2.23. Спектрограмма шумов. Антенна НК116 (Е-W). (Усреднение: 100 спектров).

На рис. 2.24 представлены зависимости оценок среднеквадратичного значения шумов в полосе 10 МГц и во всей полосе сканирования (30 - 100 МГц). Как и следовало ожидать, усредненные оценки шумов в отдельных полосах претерпевают меньшие по уровню колебания, хотя и проявляются выбросы и провалы, скорее всего техногенной природы.

На рис. 2.25 представлена реализация спектра для вертикальной ориентации оси измерительной антенны. Видно, что источники шумов с вертикальной поляризацией вектора ЭМП помех заметно превышают источники с горизонтальной поляризацией.

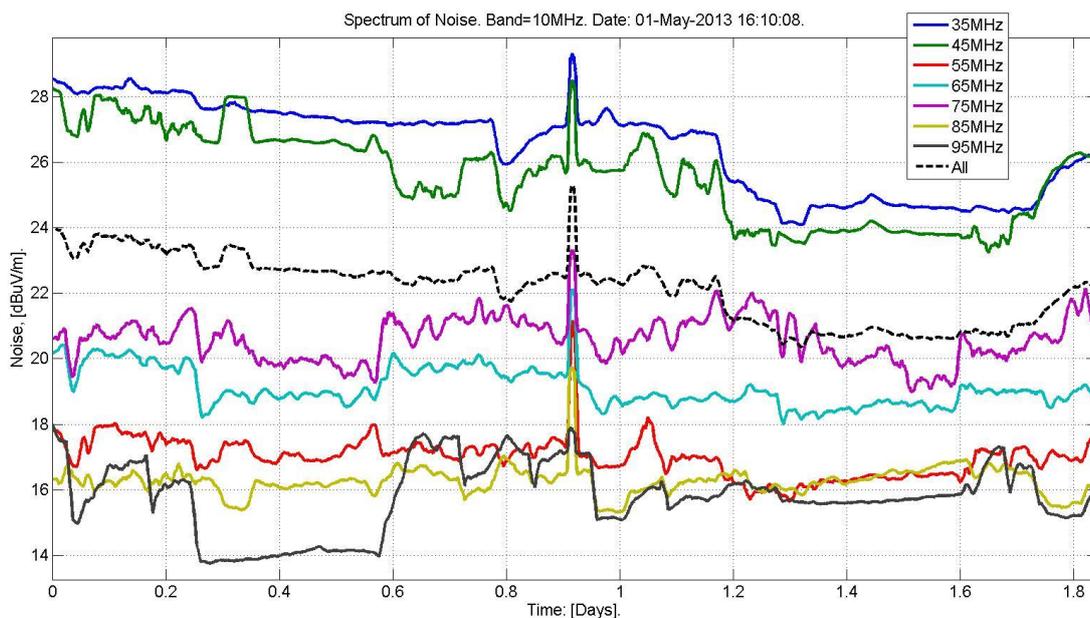


Рис. 2.24. Шумы в отдельных полосах частот по 10МГц. Антенна НК НК116 (E-W). (Усреднение: 100 спектров).

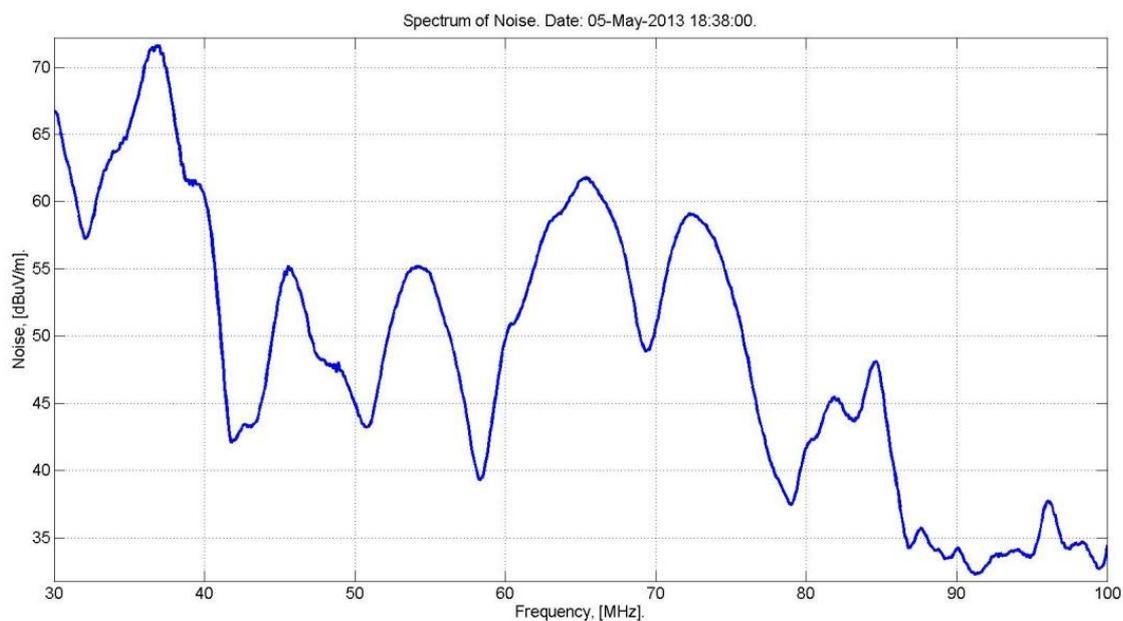


Рис. 2.25. Усредненный спектр шумов. Антенна НК НК116 (Верт). (Усреднение: 100 спектров).

Изменения в течение цикла измерений такие же, как и для предыдущих сеансов. Эта же тенденция просматривается на графиках оценок шумов в отдельных 10 МГц полосах (Рис. 2.26). Здесь можно проследить и наличие

суточных вариаций уровня и хотя их величина редко превышает 2 дБ, оценки можно считать представительными, поскольку оценки исходных спектров получены усреднением по 100 реализациям и дисперсия оценок спектров достаточно мала. На рис. 2.27 представлены шумы в отдельных полосах частот по 10МГц.

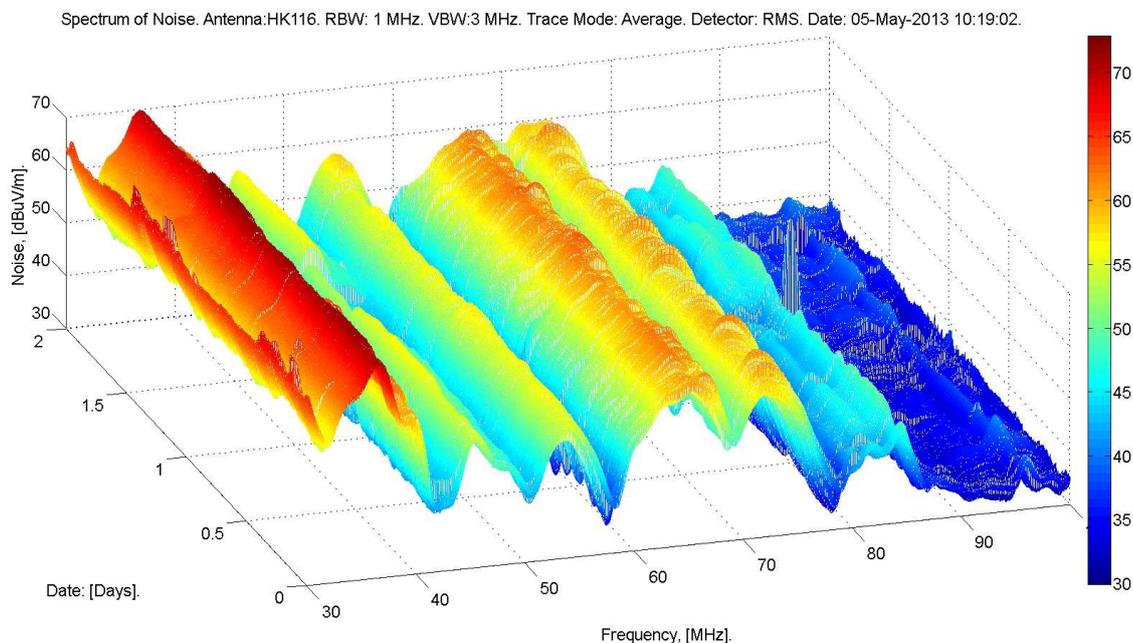


Рис. 2.26. Спектрограмма шумов. Антенна НК116 (Верт).
(Усреднение: 100 спектров).

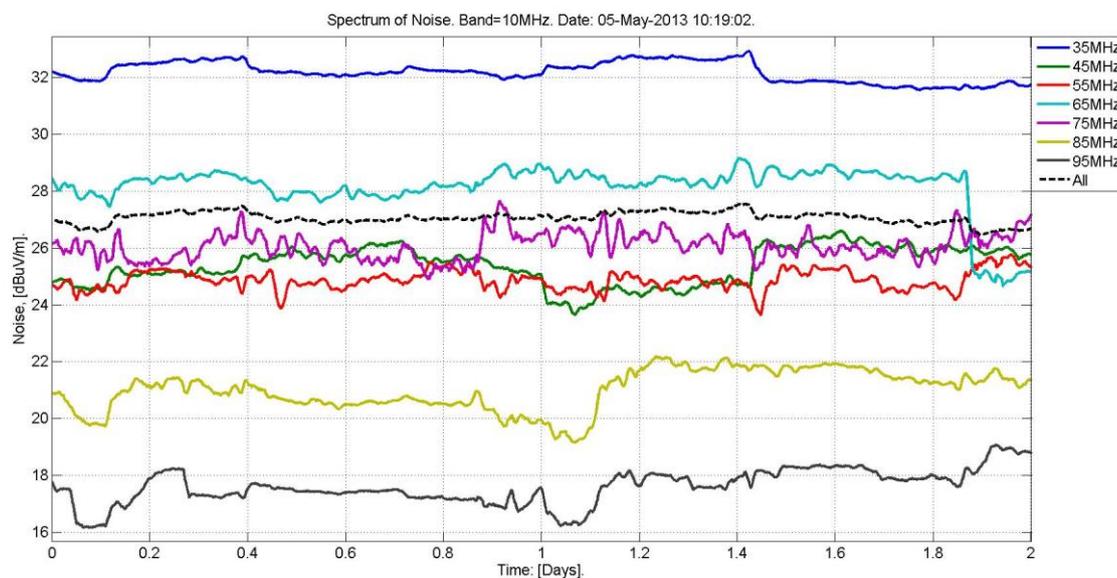


Рис. 2.27. Шумы в отдельных полосах частот по 10МГц. Антенна НК116
(Верт). (Усреднение: 100 спектров).

На рис. 2.28 представлены отдельные спектры, взятые в течение суток с шестичасовым интервалом для трех ориентаций измерительных антенн. Видно, что суточные изменения уровня не превышают 3 дБ для всех направлений. На рис. 2.29 предыдущие данные представлены в другом виде получения представления о различии помех источников с различной поляризацией поля.

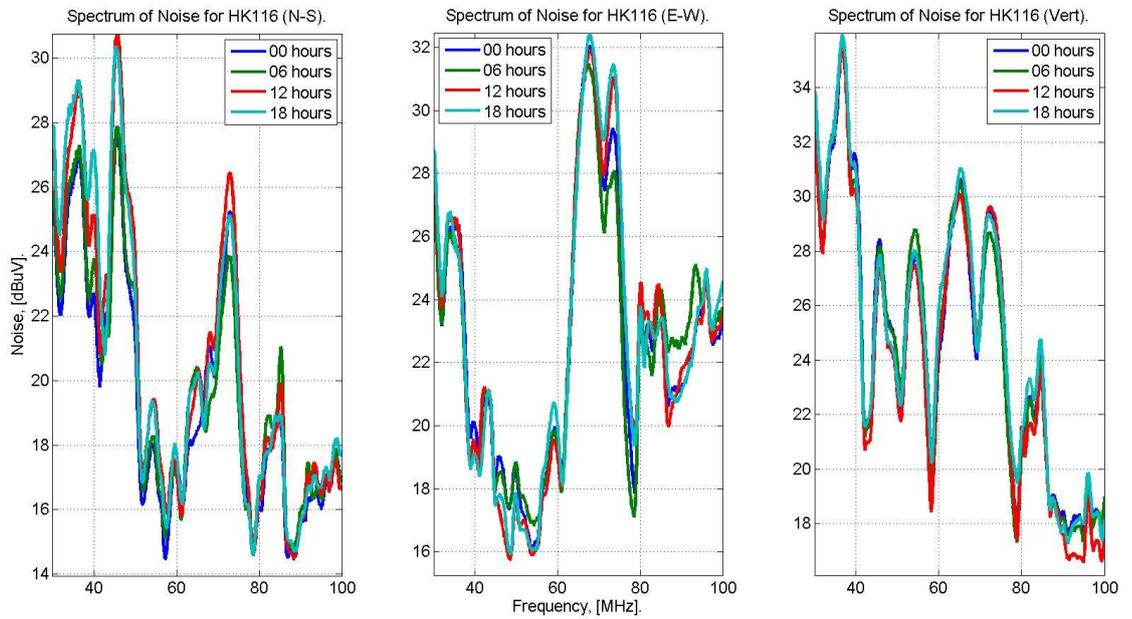


Рис. 2.28. Спектры в разное время суток для трех положений НК116.

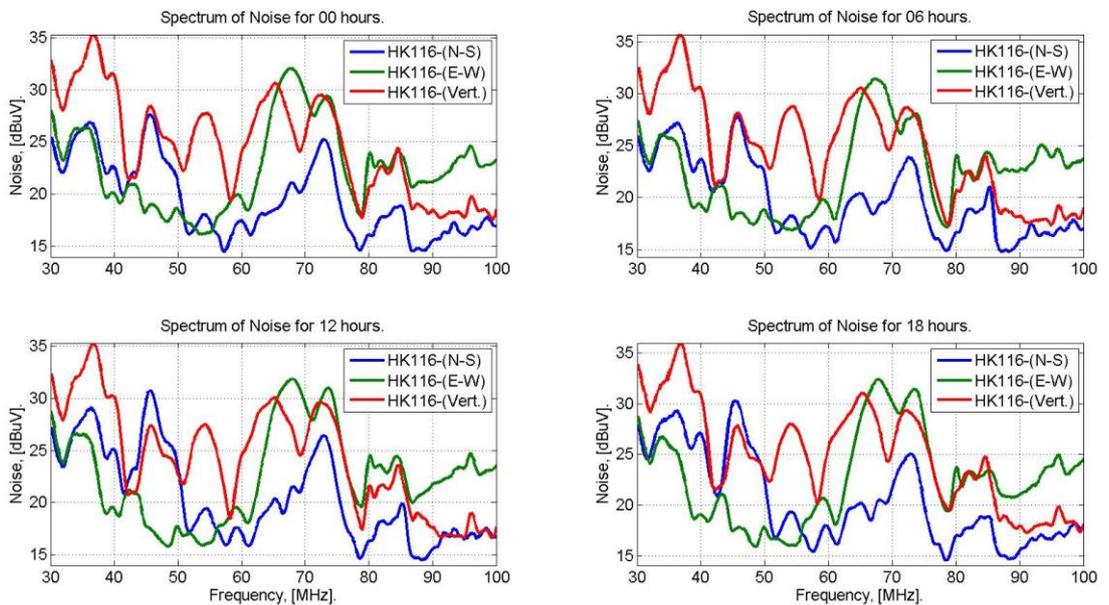


Рис. 2.29. Спектры для различного положения НК116 (выборки через 6 часов).

Проведенный анализ подтверждает возможность регистрации радиоизлучения ШАЛ. Это делает эксперимент Tunka-Rex одним из перспективных и надежных инструментов регистрации космических лучей, несмотря на простоту оборудования.

На рис. 2.30 представлены среднеквадратичные уровни ЭДС шумов в диапазоне 10 – 3600 МГц, снятые с выхода антенны НК116. Рассмотрение поля помех в данном диапазоне показывает, что на высоких частотах возможны более благоприятные условия регистрации радиосигналов ШАЛ. В то же время на более высоких частотах радиоизлучение ШАЛ теряет свойство когерентности, следовательно, сигнал становится слабее. Тем не менее, на сегодняшний день существуют установки, успешно регистрирующие ШАЛ в более высокочастотном диапазоне (LOFAR, Chrome, CODALEMA). В дальнейшем при рассмотрении возможности регистрации радиоизлучения ШАЛ в диапазоне высоких частот необходимо будет провести более детальные исследования, так как антенна НК116 не сертифицирована для измерений выше 300 МГц.

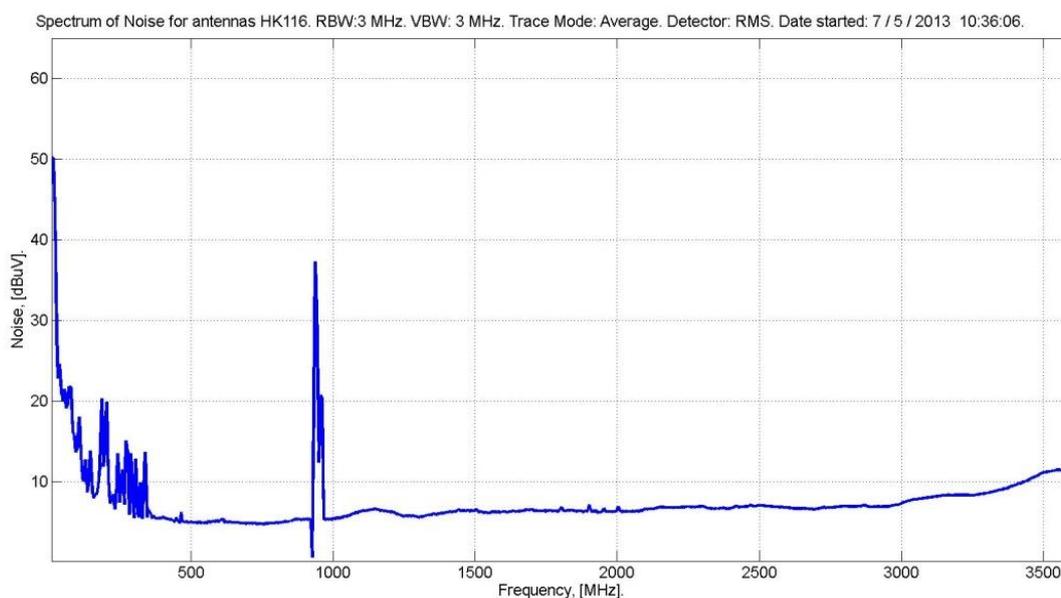


Рис. 2.30. Шумы в диапазоне 10 – 3600 МГц.

На рис. 2.31 и рис. 2.32 представлен шум, принимаемый НК116 и SALLA в диапазоне 10-100 МГц.

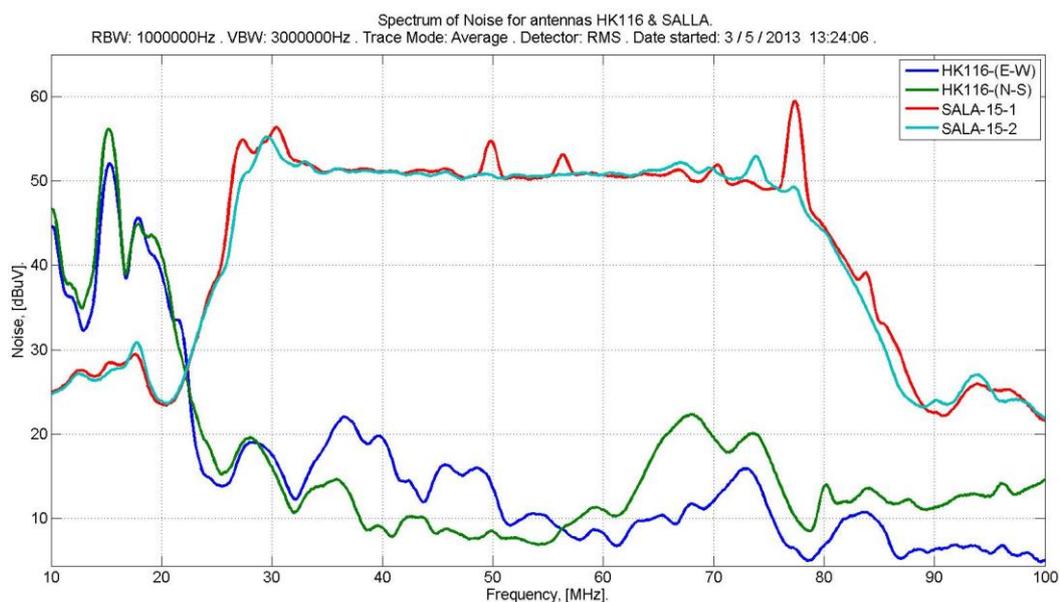


Рис. 2.31. Шумы, принимаемые НК116 и SALLA. (Среднеквадратичные).

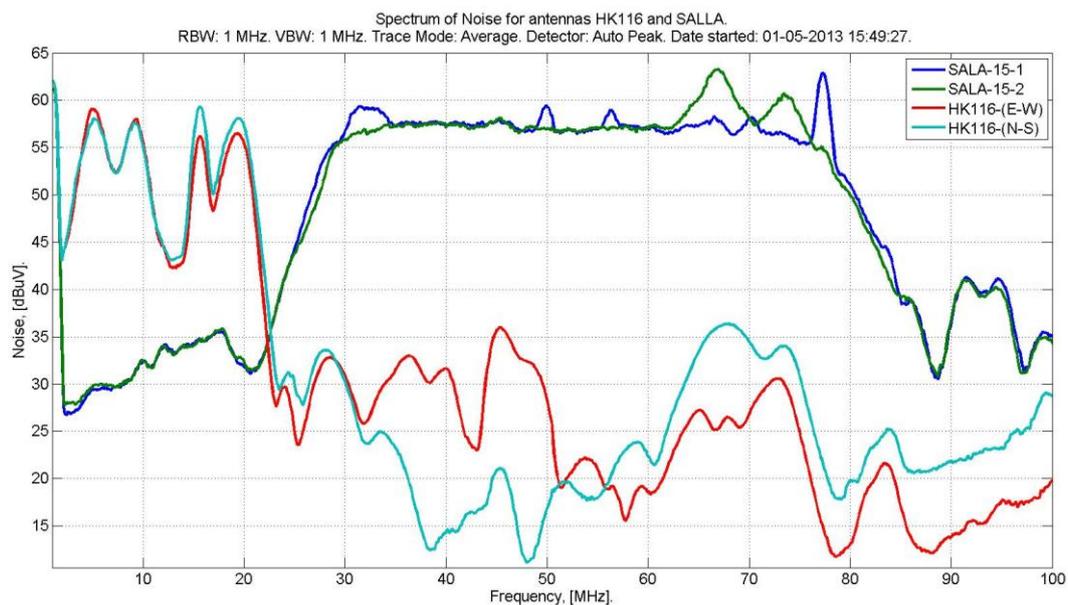


Рис. 2.32. Шумы, принимаемые НК116 и SALLA. (Пиковые).

Установка по регистрации радиоизлучения ШАЛ Tunka-Rex использует единую с установкой Тунка-133 систему сбора данных, что соответственно приводит к влиянию одной системы на другую. В процессе проектирования радиоустановки уделялось максимальное внимание минимизации этого влияния. Для этого приемные антенны расположены в местах наиболее оптимальных с одной стороны в смысле удаления от токоведущих элементов установки Тунка-133 и минимизации длины кабелей для уменьшения затухания сигнала и уменьшения

амплитуды помех. Тем не менее, излучение измерительных и системных блоков неизбежно регистрируется радиоизмерительным трактом. В результате исследования возможного влияния электронного оборудования и систем электропитания установок и инфраструктуры Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ на регистрацию радиоизлучения ШАЛ на измеряемых радиоустановкой спектрах (Рис 2.33) можно четко выделить линии следующих источников помех:

- Линия 20МГц соответствует задающему генератору контроллеров обогрева центров кластеров. Это линия проявляется по-разному в разных кластерах. Это, видимо, обусловлено разным взаимным расположением корпусов контроллера и сигнальных кабелей радиоустановки;

- На частоте 25МГц работают задающие генераторы системы сбора данных установок. Они дают четкие линии на основной и 3-ей гармонике – 75 МГц. Это обусловлено формой сигнала генератора – меандр.

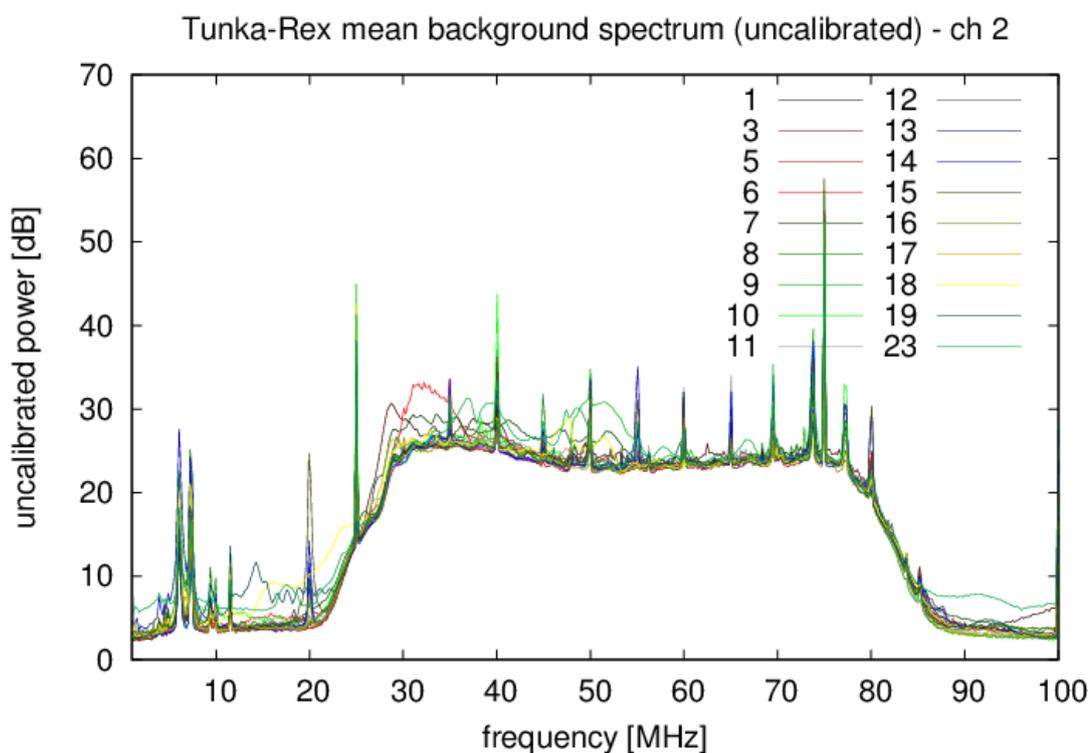


Рис. 2.33 Спектры радиосигналов, полученные в одном из сеансов радиоизмерений на установке Tunka-Rex.

Непосредственное проникание измерительных импульсов сигналов фотоумножителей установки Тунка-133 не отмечено. Сигналы радиоимпульсов

имеют четкую временную селекцию с импульсами ФЭУ благодаря разным длинам кабелей.

2.6 Система мониторинга состояния установки Tunka-Rex

Так как эксперименты Тунка-133 и Tunka-Rex находятся в суровых полевых условиях, при которых возможно изменение множества независимых от человека факторов (например, температура, влажность, уровень оптического шума и радишума), крайне важным является создание системы утилит для мониторинга и диагностики детекторов. Самыми вероятными вещами, мешающими проведению измерений, являются появление внешних и внутренних шумов и наводок, а также выход отдельных компонентов детектора из строя. Для того, чтобы максимально оперативно получать информацию о каких-то неполадках, необходимо построить систему, которая сможет получать мониторинговую информацию в режиме реального времени. С учетом того, что измерения на детекторе Тунка-133, а, соответственно, и на Tunka-Rex идет не непрерывно, а только в ночное время, коллаборацией Tunka-Rex было принято решение собирать статистику после каждого запуска детекторов. Главной характеристикой состояния антенны является спектр шумов.

Для того чтобы оценить шумовой вклад каждой составляющей тракта был проведен эксперимент где последовательно обрезался тракт, то есть по шагам отключалась антенна, предусилитель и т.д. На рис. 2.34 показаны результаты измерения спектра шумов при различных конфигурациях тракта:

Step 1. Стандартная конфигурация.

Step 2. Шум предусилителя с отключенной антенной.

Step 3. Шум с отключенным предусилителем (кабели, ведущие от антенны к фильтру, остаются подключенными).

Step 4. Кабели антенны к фильтру отключены.

Step 5. Шум АЦП с кабелями, ведущими к фильтру (фильтр отключен).

Step 6,7. Контрольные измерения со стандартной конфигурацией.

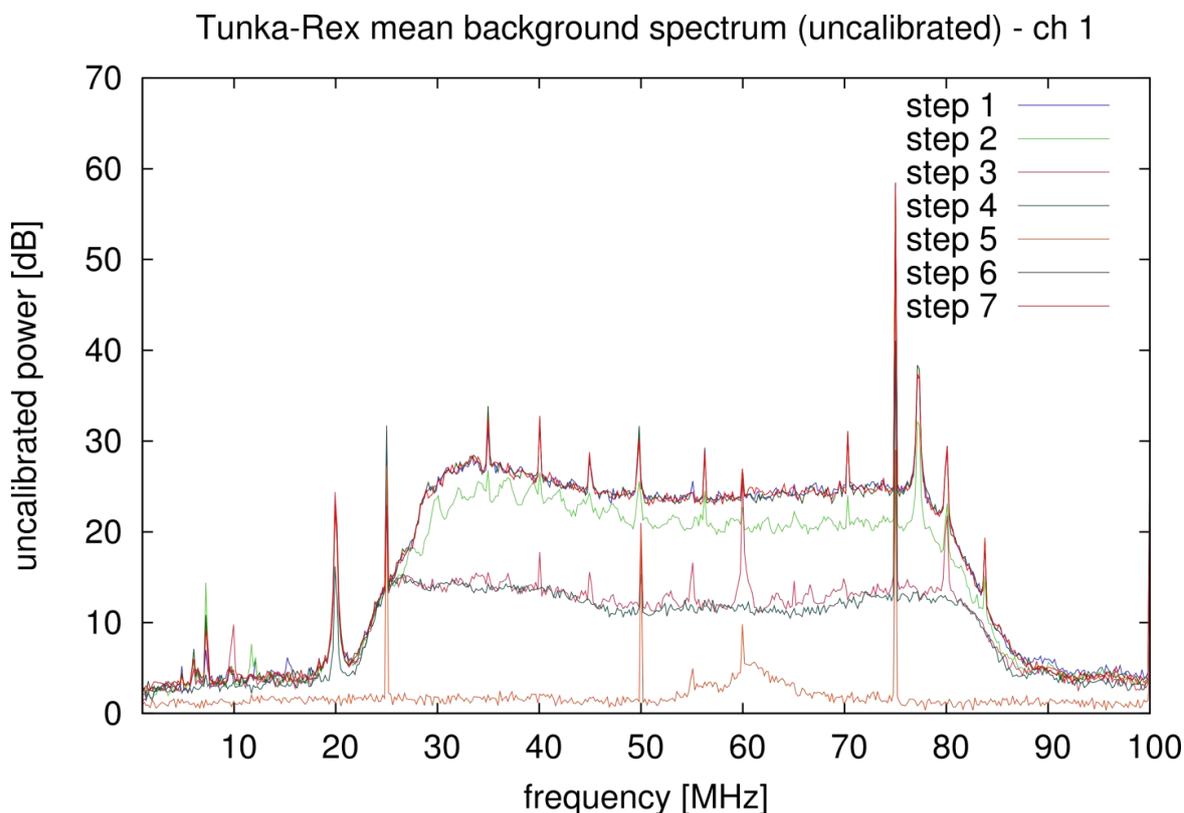


Рис. 2.34. Шум, измеренный для различных конфигураций антенны.

Основываясь на данной характеристике, можно сделать вывод о текущем состоянии антенны.

При выявлении каких-либо неполадок непосредственно сразу после сеанса измерений (ночного запуска), у дежурного остается время, чтобы устранить эти неполадки (например, повреждение элемента цепи вследствие перепада температур).

Следующим элементом мониторинга шума является непосредственное исследование среднего отклонения на записанных треках. Исходя из предположения, что распределение шума описывается нормальным распределением, возможно определение среднего уровня шума на антенне и поиск дополнительных источников шума (Рис. 2.35). Можно увидеть, что данное распределение превосходно описывается нормальным распределением и можно получить среднее значение и разброс шума с помощью фитирования функцией Гаусса. По результатам данного вида исследования было определено, что среднее значение шума на всех антеннах является достаточно стабильным.

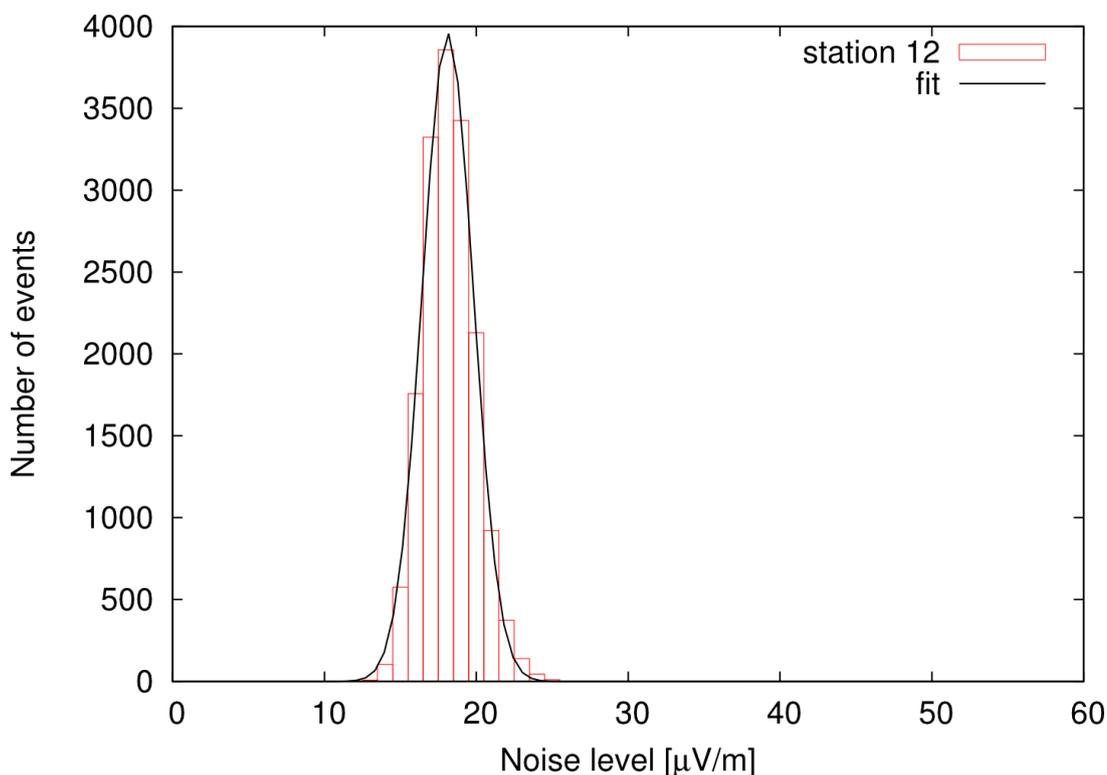


Рисунок 2.35. Распределение среднего уровня шума на антенне 12.

2.7 Резюме

В результате дополнения установки Тунка-133 новыми детекторами радиоизлучения и заряженной компоненты ШАЛ Тункинский Астрофизический центр коллективного пользования ИГУ стал единственной в мире «плотной» установкой, которая позволяет регистрировать максимально возможное количество компонент излучения ШАЛ, что тем самым дает возможность получать наиболее точные данные о первичных частицах.

Проведенный анализ помеховой обстановки в Тункинской долине подтверждает возможность регистрации радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц, что делает эксперимент Tunka-Rex, детектирующий радиоизлучение, одним из перспективных и надежных методов регистрации космических лучей, несмотря на простоту оборудования.

Разработана программа мониторинга за состоянием установки Tunka-Rex и изучено влияние электронного оборудования и систем электропитания установок и инфраструктуры Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ на регистрацию радиоизлучения ШАЛ. Проведена калибровка приемного тракта установки Tunka-Rex.

Впервые теоретически и с помощью моделирования исследовано влияние расположения антенн на прием радиосигнала от ШАЛ. Показано, что ориентация антенн в случае Tunka-Rex важна только для вертикальных ливней. Аналитически рассчитана зависимость мощности радиоизлучения от величины и от направления магнитного поля в месте расположения эксперимента. Приведены рекомендации выбора диаграммы направленности антенн для будущих экспериментов, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ. Рассмотрены альтернативные варианты антенн для регистрации радиоизлучения ШАЛ.

Глава 3

Методики обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex

В настоящей главе разработана методика выделения радиосигналов ШАЛ из экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex. Предложена методика восстановления основных характеристик первичной космической частицы по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков от ШАЛ. Предложен метод оптимизации функции пространственного распределения радиоизлучения ШАЛ. Представлены результаты работы установки Tunka-Rex. Выполнена кросс калибровка установок Тунка-133 и Tunka-Rex. Сделана оценка точности восстановления энергии и глубины максимума ШАЛ по радиоданным.

3.1 Сбор данных установки Tunka-Rex и разработка методики выделения радиосигналов ШАЛ

К настоящему времени установка Tunka-Rex проработала три полных сезона измерений – за 2012/2013 г., 2013/2014 г. и 2014/2015 г. Эффективное время измерений для одного сезона порядка 300 ч. Для анализа данных используется модифицированный радиомодуль программного обеспечения Offline, разработанный коллаборацией Pierre Auger. На основе данных первого сезона были разработаны методы обработки данных с антенн детектора Tunka-Rex, а также проведена калибровка методов регистрации черенковского излучения и радиоизлучения. Для анализа радиоданных первого сезона в качестве входных параметров использовалась полная информация о ливне, полученная детектором Тунка-133: положение оси ШАЛ, энергия первоначальной частицы, глубина максимума ШАЛ. В дальнейшем методы, использованные для интерпретации радиоданных первого сезона, планируется применить «вслепую» для анализа данных последующих сезонов. То есть информация с установки Тунка-133 об энергии и глубине максимума ливня не будет учитываться при интерпретации

радиоизлучения ШАЛ. После «раскрытия» данных Тунка-133 за соответствующий сезон измерений можно будет окончательно оценить качество данных установки Tunka-Rex и методов их обработки. Установки Тунка-133 и Tunka-Rex имеют общую систему сбора данных, поэтому сбор данных и распознавание событий происходит следующим образом (Рис. 3.1) [101]:

- ✓ Каждый кластер установки Тунка-133 формирует собственный триггер
- ✓ Событие регистрируется, если в течение заданного временного интервала фиксируется более трех сигналов ФЭУ, превышающих установленный порог.
- ✓ Время каждого сигнала синхронизируется с учетом задержки в оптических волокнах: $T = \text{local time} + \text{fiber delay}$.
- ✓ Затем объединяются отдельные события с $\Delta T \leq 7000$ нс.

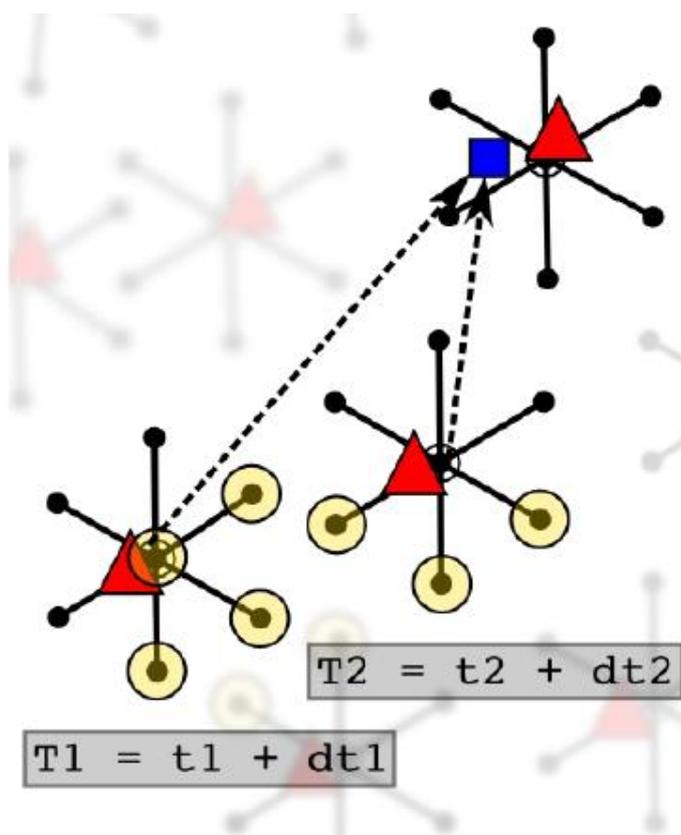


Рис. 3.1. Сбор данных и объединение событий.

Разница времени прихода сигналов используется для восстановления направления прихода ШАЛ с использованием модели плоского фронта

(минимальное количество антенн – 3).

Для обнаружения сигнала используется феноменологический подход. Временное окно для каждой антенны одинаково, так как все антенны имеют идентичную конфигурацию. Поскольку задержки в цепи антенны идентичные для всех антенн, окно, в котором производится поиск сигнала, можно определить по формуле:

$$t = \frac{N_{FADC}}{2} T_{BW} + \frac{L_R - L_C}{\epsilon c} - \frac{d}{\sqrt{2}c} - \tau \pm \Delta t \quad (3.1)$$

где $N_{FADC} = 1024$ – количество отсчётов АЦП в одной дорожке;

$T_{BW} = 5$ нс – длительность одного отсчёта;

$L_R \approx 30$ м, $L_C \approx 90$ м – длины кабелей от центра кластера до антенн и ФЭУ соответственно;

$c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света;

$\epsilon c \approx (2/3)c$ – скорость передачи сигнала в кабеле;

$d \approx 80$ м – типичное расстояние от центра кластера до окружающих его ФЭУ;

$\tau \approx 50$ нс – ширина сигнала ФЭУ;

$\Delta t \approx d / (1.41c) = 200$ нс – границы окна поиска радиосигнала.

Первый член в (3.1) определяет середину дорожки (приблизительное расположение сигнала с последнего сработавшего ФЭУ); второй член описывает задержку из-за разной длины кабелей (сигнал с антенны приходит раньше, чем с ФЭУ) в приближении того, что источник как черенковского излучения, так и радиоизлучения находится в одной точке (на высоте максимума ШАЛ); третий член описывает задержки, связанные с геометрией детектора (для типичного зенитного угла ШАЛ 45°); четвертый член описывает возможные задержки, между временем прихода ливня и срабатыванием триггера на ФЭУ (превышением порога для амплитуды). Наконец, выбрано $\Delta t = 200$ нс для того, чтобы учесть все возможные направления прихода ливня. Таким образом, оценка для временного отрезка на дорожке, в котором производится поиск сигнала, составляет 2000 ± 200 нс. Амплитуда сигнала определяется вычислением огибающей сигнала. Для определения уровня шума, берется среднеквадратичное отклонение в той части временного окна, где появление ложных импульсов наименее вероятно. Определение сигнал/шум = амплитуда² / шум².

На рис.3.2 представлен пример восстановленного события. Сверху слева: направление прихода ШАЛ с обозначенной осью ливня и сработавшими антеннами, цвет показывает время прихода сигнала, размер – амплитуду на различных каналах. Сверху справа - функция продольного распределения. Серые точки – антенны, не прошедшие необходимый порог сигнал/шум. Снизу - восстановленная напряженность электрического поля на антенне (на рисунке изображены две ортогональные поляризации в плоскости фронта ШАЛ). Область определения уровня шума заштрихована красным цветом, область нахождения сигнала - центральная, заштрихована зеленым цветом.

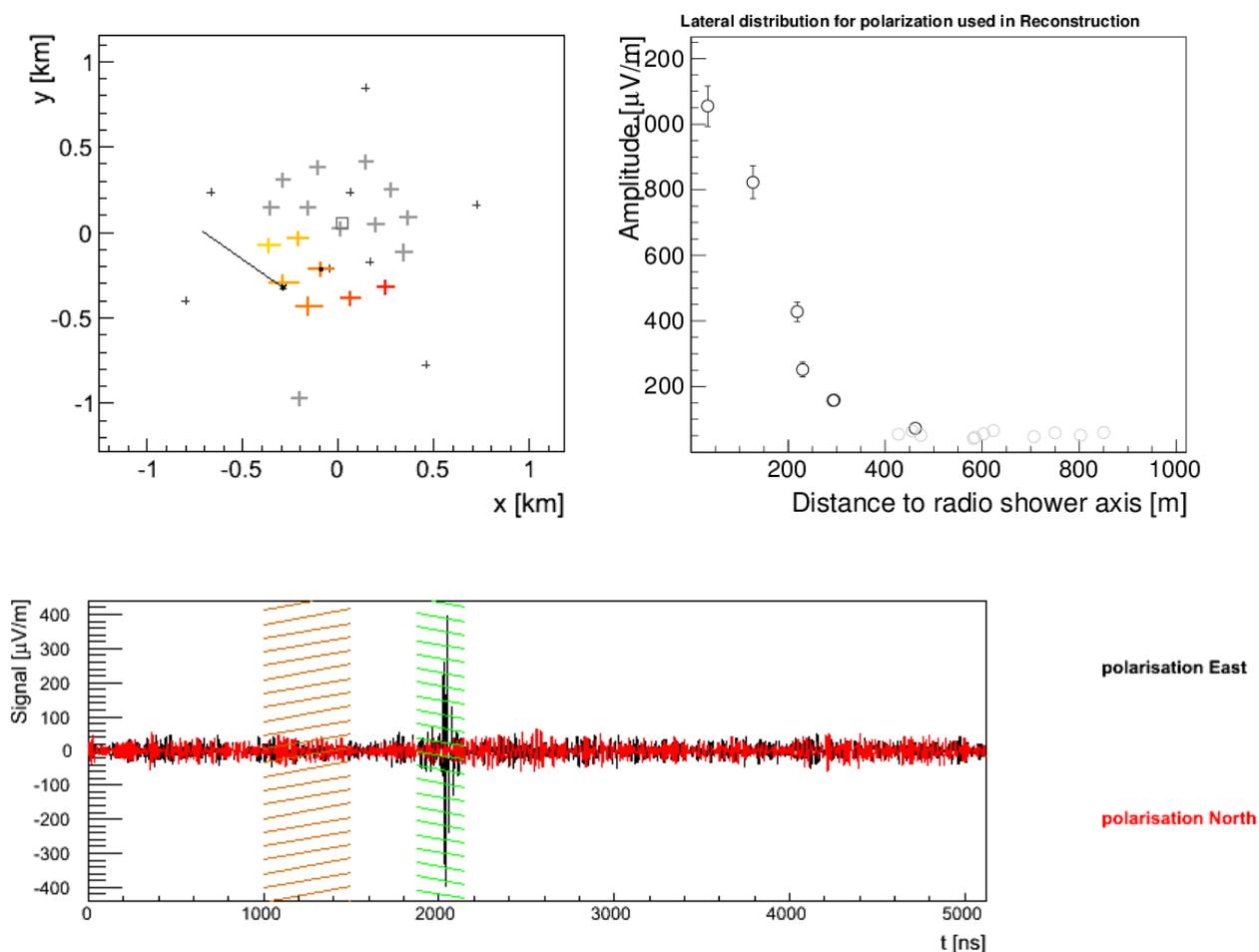


Рис. 3.2. Пример восстановленного события.

Восстановление событий состоит из нескольких шагов:

Первым шагом производится цифровая фильтрация дорожек. Для подавления узкополосного шума применяются прямоугольные фильтры для частот, на которых наблюдается известный постоянный шум. Поскольку радиоизлучение ШАЛ

широкополосное, влияние фильтра значительно меньше, чем узкополосный шум, который подавляется фильтром. Шумовой фон, оставшийся после фильтрации, в среднем увеличивает амплитуду измеренного радиоимпульса относительно его действительной амплитуды. Таким образом, необходимо применить коррекцию среднего шума:

$$\varepsilon_{true} = \varepsilon_{measured} \cdot \sqrt{1 - \frac{k}{SNR}} \quad (3.2)$$

где $k = 4.3$ - коэффициент нормировки, полученный в моделировании CoREAS. Критерием присутствия сигнала является соотношение сигнал-шум SNR большее, чем 10. В результате отбираются события с числом антенн не менее 3. Количество данных событий порядка 200.

Следующим этапом производится сравнение восстановленного направления ШАЛ, зарегистрированного по радиоизлучению и по черенковскому излучению. Для восстановления оси ливня, зарегистрированного Tunka-Rex, используются модели плоского фронта. Далее восстановленная ось сравнивается с осью, полученной черенковским детектором. Если угол между этими двумя осями более 5° , данное событие выбрасывается. Также выбрасываются события с зенитным углом более 50° , так как детекторы установки Тунка-133 расположены внутри корпусов, представляющих из себя металлические цилиндры, покрытые сверху прозрачным плексигласом, поэтому зенитный угол детектора ограничен 50° [80]. Но если использовать отраженный от внутренних поверхностей корпусов свет, то для установки Тунка-133 можно расширить диапазон регистрации ШАЛ с зенитными углами до 70° . Используя данный триггер, было доказано, что радиоустановка Tunka-Rex способна также к детектированию горизонтальных событий. Таким образом, все события, зарегистрированные Tunka-Rex, можно условно поделить на две категории:

1. «Вертикальные» события с зенитным углом меньше 50° с восстановленными из данных черенковских детекторов геометрией, энергией и максимумом ливня; такие события являются лучшими вариантами для калибровки, но, к сожалению, по ним, имеется не так много статистики и отдельное событие регистрируется небольшим числом антенн в силу крутизны пространственного распределения радиоизлучения.

2. «Горизонтальные» события с зенитным углом более 50° , но с надежным восстановлением направления ливня от детекторов установки Тунка-133. Для таких событий остальные параметры по данным черенковских измерений невозможно восстановить. Однако если восстанавливать энергию и максимум ливня, исходя только из радиоизмерений, эти события можно включить в общую статистику событий.

Угловое распределение событий представлено на рис. 3.3. На рисунке слева распределение направлений прихода по сторонам света. Хорошо видно асимметрию север-юг, обусловленную геомагнитным эффектом. На рисунке справа - количество зарегистрированных событий в зависимости от зенитного угла ШАЛ. Обрезание слева обусловлено чувствительностью радиодетектора Tunka-Rex, обрезание справа – чувствительностью триггера (Тунка-133). Данное распределение направлений прихода ШАЛ по сторонам света, зарегистрированных установкой Tunka-Rex, экспериментально подтверждает то, что ориентация антенн на эффективность детектора Tunka-Rex совершенно не влияет, так как вертикальные события на этой установке практически не наблюдаются. Но поскольку радио детектирование ШАЛ является достаточно новым методом, было сложно предсказать заранее эффективность детектора.

После данного отбора из 200 событий, зарегистрированных радиодетектором, остается порядка 100.

Последним этапом является применение высокоуровневого отбора событий: совершается исключение из обработки антенн с ложными сигналами, фитирование функции пространственного распределения (ФПР). После высокоуровневого отбора остается 91 событие, которые могут быть использованы при отработке методик восстановления параметров ливня [102].

Хиллером Р. (коллаборация Tunka-Rex) было проведено сравнение измеренной амплитуды радиоизлучения ШАЛ и смоделированной в CoREAS (Рис. 3.4). Для моделированного ШАЛ использовались данные (направление, энергия, глубина максимума ливня), взятые из эксперимента Тунка-133. Данное сравнение показывает хорошее согласие экспериментальных данных и моделирования [103].

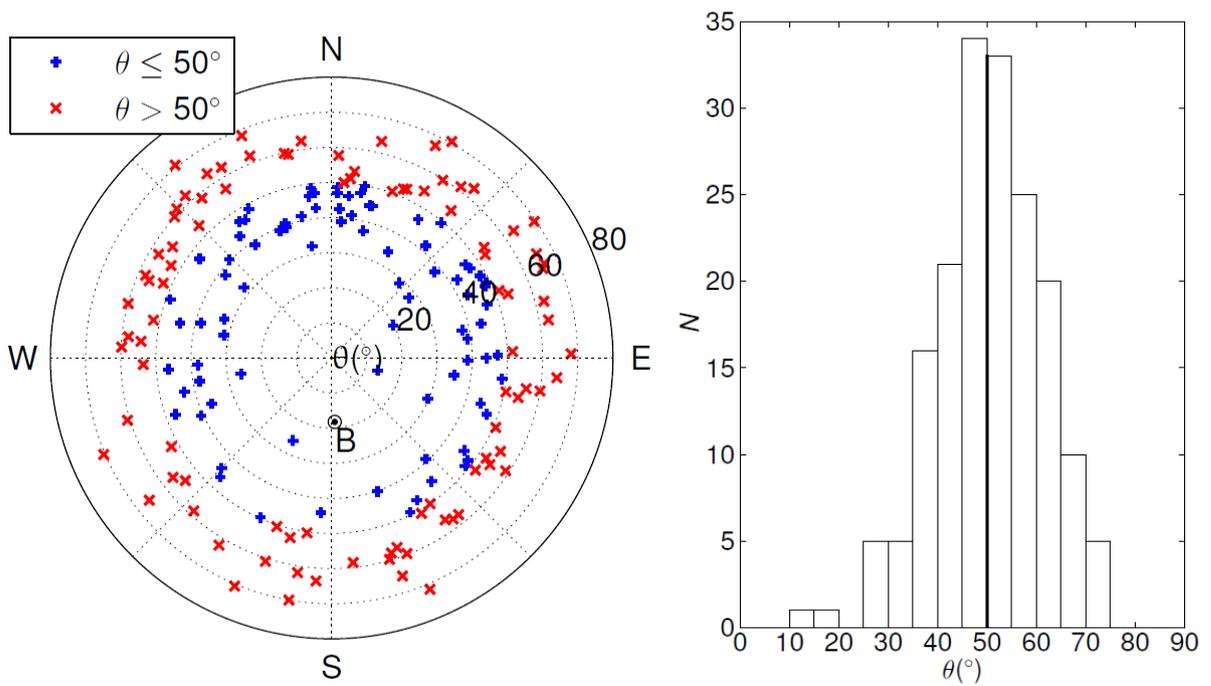


Рис 3.3. Распределение направлений прихода ШАЛ, зарегистрированных установкой Tunka-Rex. Слева: распределение направлений прихода по сторонам света. Справа: количество зарегистрированных событий в зависимости от зенитного угла ШАЛ.

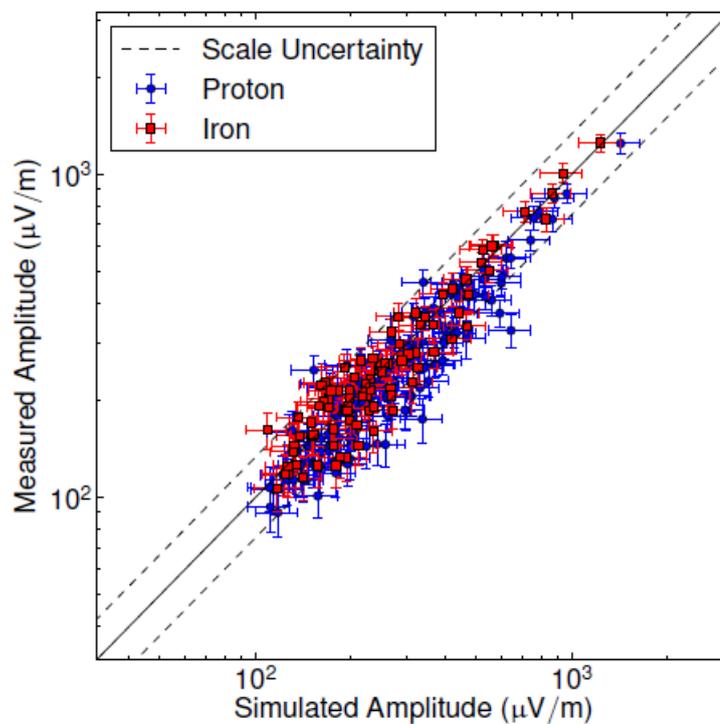


Рис. 3.4. Сравнение измеренной амплитуды радиоизлучения и смоделированной в CoREAS.

3.2 Разработка методик восстановления основных характеристик первичной космической частицы по радиосигналам ШАЛ

Функция пространственного распределения

Для восстановления параметров ливня используется функция пространственного распределения (ФПР) радиосигнала ШАЛ, которая показывает распределение амплитуды радиоизлучения в зависимости от расстояния до оси ливня. Ранее в других экспериментах было показано, что ФПР связана с такими параметрами ШАЛ как энергия и X_{\max} [104, 105]. Особенности ФПР могут быть описаны следующим образом:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_{r_0} \sin \alpha_g \exp[f_\eta(r - r_0)],$$
$$f_\eta(x) = \sum_{k=1}^N a_k x^k \quad (3.3)$$

где ε_{r_0} - амплитуда на детекторе на расстоянии r от оси ливня, α_g - геомагнитный угол, то есть угол между направлением действия магнитного поля и осью ливня, r_0 – свободный параметр.

В современных экспериментах и теоретических оценках, полученных из моделирования, уже было показано, что пространственное распределение амплитуд является более сложным и содержит азимутальную асимметрию, связанную с интерференцией геомагнитного эффекта и эффекта Аскарьяна [106]. Кроме того особенности распространения радиосигнала в среде с индексом преломления $n > 1$ приводят к тому что в ФПР содержатся особенности, обусловленные черенковским эффектом. Для коррекции асимметрии ФПР может быть использовано фитирование двумерной функцией. Такой подход дает хорошие результаты в случае плотного массива антенн, такого как LOFAR [107]. В случае установки Tunka-Rex применение этого метода не даст соответствующих результатов, так как большинство событий имеют лишь 3-5 антенн. Костюниным Дмитрием (коллаборация Tunka-Rex) были разработаны соответствующие методы описания ФПР с учетом всех особенностей пространственного распределения радиосигнала ШАЛ [108]. Исследование было основано на моделировании CoREAS. Была предложена простая аппроксимация ФПР и параметризация одномерной функцией, что уменьшает количество свободных параметров. Идея метода состоит в том, что вклад от эффекта Аскарьяна параметризован постоянной

величиной в 8.5 %, таким образом, азимутальная симметрия восстанавливается без введения свободных параметров и проведения сложного фитирования. Метод коррекции азимутальной асимметрии был применен ко всем данным, полученным на отдельных антеннах установки Tunka-Rex.

Метод оптимизации ФПР

Осуществить фитирование ФПР можно различными способами, из которых можно выделить экспоненциальную функцию, подставляя в уравнение (3.1) $N=1$ и функцию Гаусса, подставляя в уравнение (3.1) $N=2$, которая в общем случае дает большую точность, но требует данные как минимум четырех детекторов, в то время как экспоненциальная функция позволяет работать уже с тремя антеннами [109]. С помощью моделирования CoREAS Безъязыковым П. (коллаборация Tunka-Rex) было оценено соотношение качества фитирования ФПР. В результате данной оценки было определено, что параметризация с помощью функции Гаусса дает значительно лучший результат. Согласно теоретическим предсказаниям фитирование с функцией Гаусса дает точность для восстановления глубины максимума ливня X_{max} около 25 г / см^2 . Таким образом, для фитирования ФПР мы используем простую функцию Гаусса, которая в свою очередь может описать и черенковские эффекты:

$$\varepsilon = \varepsilon_{r_0} \exp[a_1(r - r_0) + a_2(r - r_0)^2] \quad (3.4)$$

где параметр a_1 определяет наклон экспоненциального спада ФПР, а параметр a_2 связан с шириной черенковского кольца. Свойства функции Гаусса:

$$\mu = r_0 - \frac{a_1}{2a_2} \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{-2a_2}} \quad (3.5)$$

Проблема данной параметризации в том, что параметры a_1 и a_2 очень сильно коррелируют между собой, тем самым усложняя восстановление X_{max} , что может привести к большим погрешностям в случае событий с малым количеством антенн. Вследствие регистрации установкой Tunka-Rex большого количества событий, близких к порогу регистрации, был разработан метод оптимизации ФПР, заключающийся в уменьшении свободных параметров. Для этого необходимо было зафиксировать один из параметров. С помощью смоделированных в программе

CoREAS событий были исследованы параметры a_1 и a_2 и выбран наиболее подходящий параметр для фиксирования.

В [108] было показано, что параметр a_2 слабее зависит от глубины максимума ливня X_{max} , чем параметр a_1 (Рис. 3.5).

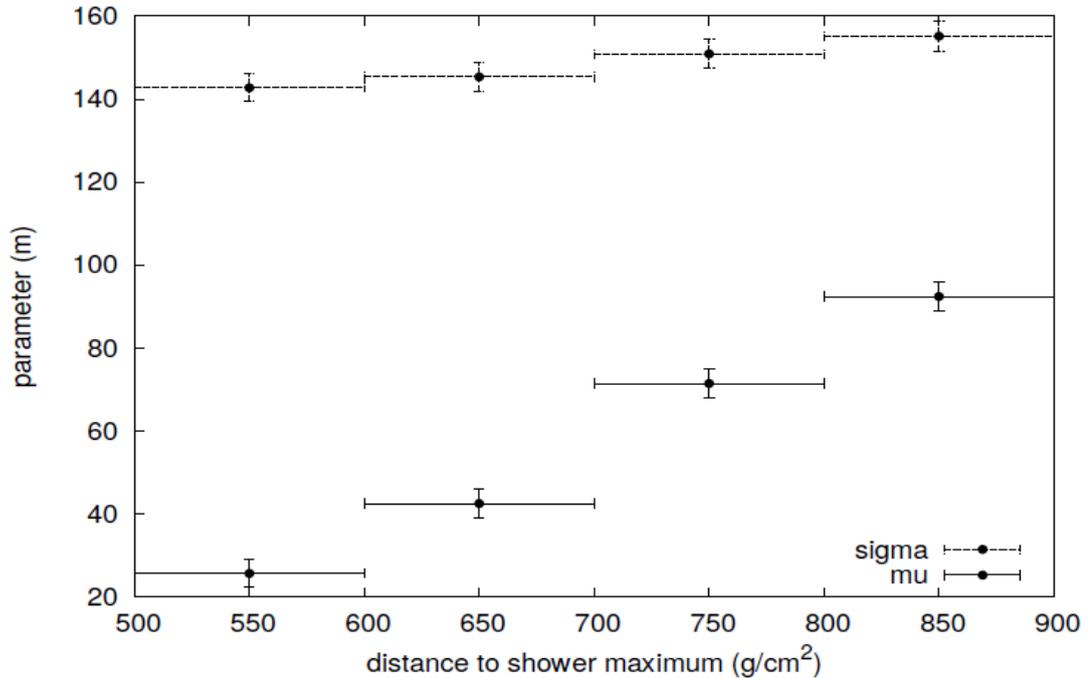


Рис. 3.5. Корреляция параметров функции Гаусса (3.4) в зависимости от расстояния до глубины максимума ливня X_{max} .

На рис. 3.6. показана зависимость параметров a_1 и a_2 от зенитного угла ШАЛ (расстояние от оси ливня 120 м). Для параметра a_1 фитирование происходит следующей функцией:

$$a_1(\theta) = k_0 + k_1 \cdot \cos(\theta) \quad (3.6)$$

где $\langle k_0 \rangle = (23 \pm 0.56) \cdot 10^{-3}$, $\langle k_1 \rangle = (354 \pm 0.73) \cdot 10^{-3}$ – получены из моделирований CoREAS.

Для параметра a_2 фитирование выглядит следующим образом:

$$a_2(\theta) = k_0 + k_1 \cdot \cos(\theta) \quad (3.7)$$

где $\langle k_0 \rangle = (6.69 \pm 1.62) \cdot 10^{-6}$, $\langle k_1 \rangle = (21.52 \pm 2.24) \cdot 10^{-6}$ – получены из моделирований CoREAS.

Из рисунка можно сделать вывод, что для параметра a_1 зависимость от зенитного угла сильнее и это могло бы использоваться для отбора некачественных

событий. Но так как параметр a_2 слабее зависит от глубины максимума ливня X_{max} , а также от зенитного угла ШАЛ, то фиксируется этот параметр. Далее параметр a_2 выражается как функция зенитного угла и энергии первичной частицы:

$$\begin{aligned} a_2(\theta, E_{pr}) &= a_{21}(E_{pr}) - a_{22}(E_{pr}) \cos\theta, \\ a_{21} &= a_{200} + a_{201}E_{pr}, \\ a_{22} &= a_{210} + a_{211}E_{pr} \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $a_{200}=1.94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$, $a_{201}=-0.16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}/\text{ЭэВ}$, $a_{210} = -0.35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$, $a_{211} = 0.24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}/\text{ЭэВ}$ – параметры, полученные при моделировании CoREAS.

Для восстановления параметров первичной частицы по радиоизлучению, зарегистрированному на установке Tunka-Rex, используются формулы, аналогичные формулам, полученным для черенковской установки Тунка-133.

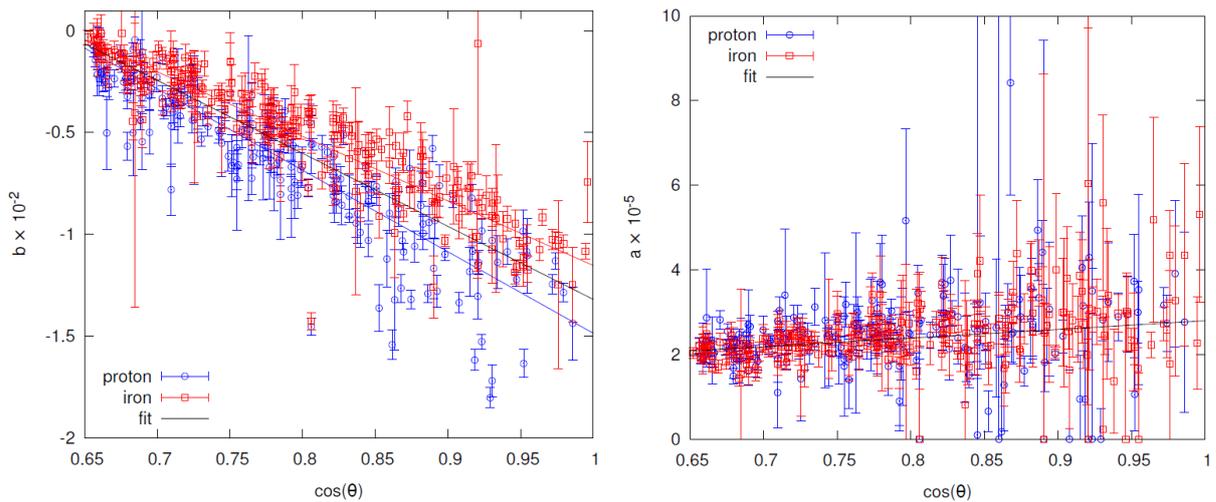


Рис. 3.6. Слева зависимость параметра a_1 от зенитного угла ШАЛ, справа зависимость от зенитного угла ШАЛ для параметра a_2 .

Энергия

В общем виде формула для восстановления энергии выглядит таким образом:

$$E_{pr} = k \left(\frac{\varepsilon(r_e)}{\mu V / m} \right)^y \quad (3.9)$$

где k – показатель наклона калибрационной кривой, $\varepsilon(r_e)$ – скорректированная на асимметрию амплитуда, и y – свободный параметр.

Энергия может быть восстановлена путем измерения амплитуды сигнала на определенном расстоянии r_e . Так как на разных дистанциях мы получаем разное распределение, корреляция амплитуды событий относительно рассчитанной энергии первичной частицы значительно разнится от случая к случаю. По теоретическим предсказаниям, полученным в [108], определено, что оптимальным расстоянием измерением амплитуды для восстановления энергии является $r_e = 120$ м, так как на этом расстоянии наблюдается максимальная корреляция логарифма амплитуды радиоизлучения ШАЛ и энергии, и точности восстановления энергии (Рис. 3.7.)

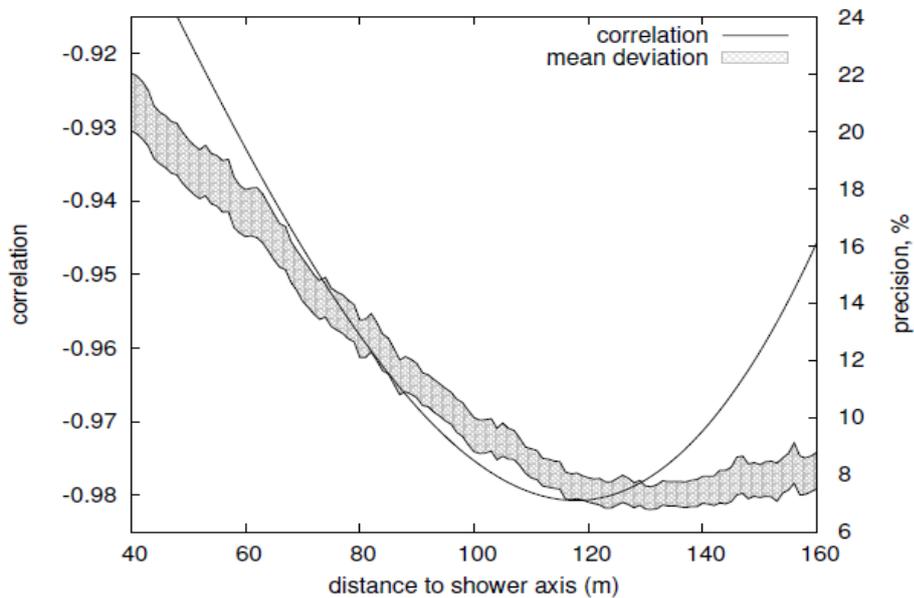


Рис. 3.7. Корреляция логарифма амплитуды радиоизлучения ШАЛ и энергии, и точности восстановления энергии в зависимости от расстояния до оси ливня.

Данную формулу можно упростить, положив $y = 1$ в приближении полностью когерентного излучения:

$$E_{pr} = k_L \varepsilon(r_e = 120\text{м}), \quad (3.10)$$

где $k_L = 884 \text{ EeV}/(\text{V}/\text{m})$ - константа, определенная моделированием CoREAS.

X_{\max}
Глубина максимума ШАЛ связана с наклоном ФПР:

$$X_{\max} = X_0 / \cos\theta - (A + B \log(\eta + \bar{b})) \quad (3.11)$$

$$\eta = \frac{df_\eta}{dr} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Для восстановления глубины максимума ливня X_{max} используется следующая параметризация:

$$X_{max} = X_{det} / \cos\theta - (A + B \log(a_1 + \bar{b})) \quad (3.13)$$

где $X_{det} = 955 \text{ г/см}^2$ - атмосферная глубина детектора, и параметры определенные моделированием CoREAS: $A = -1864 \text{ г/см}^2$, $B = -566 \text{ г/см}^2$, $\bar{b} = 0.005 \text{ м}^{-1}$.

3.3. Оценка точности восстановления энергии первичной частицы и глубины максимума ШАЛ

Для кросс калибровки установок Тунка-133 и Tunka-Rex используются 88 событий, оставшихся после качественного отбора событий. Преимущество черенковского метода регистрации ШАЛ, используемого в установке Тунка-133, заключается в возможности восстановления энергии с точностью 15% и глубины максимума ливня 28 г/см^2 [110]. Установка Tunka-Rex регистрирует радиосигналы для тех же событий. Используя данные по восстановлению энергии и максимума ливня от установки Тунка-133, можно построить зависимость величины электрического поля на антенне от энергии первоначальной частицы. Коллаборацией Tunka-Rex было получено данное сравнение (Рис. 3.8). Можно увидеть, что существует сильная корреляция между этими величинами и точность восстановления энергии с помощью радио достигает 20%, что сравнимо с современными экспериментами по регистрации космических лучей.

Восстановление глубины максимума ливня связано с наклоном ФПР. Плотный детектор имеет хорошую чувствительность к глубине максимума ливня, но восстановление детектором с более редким расположением антенн, таким как Tunka-Rex, намного сложнее. События с малым количеством антенн могут использоваться для восстановления X_{max} , только в случае когда наклон, определяемый параметром a_1 , после фитирования имеет малую погрешность. Однако малое количество антенн означает, что ФПР имеет точки близкие друг к другу, которые ведут к неправильной оценке расстояния до X_{max} . Поэтому для определения наклона использовались данные с антенн, расположенных не далее 200 м от оси ливня, что таким образом исключило из обработки еще 27 событий. Погрешность фитирования параметра a_1 определяет погрешность восстановления

X_{max} $\sigma_{X_{max}}$. В данном анализе после установления $\sigma_{X_{max}} < 50$ г / см² осталось 25 событий [111, 112].

На Рис. 3.9. показана корреляция между глубиной максимума ливня, восстановленной установкой Тунка-133 и Tunka-Rex для первого года измерений.

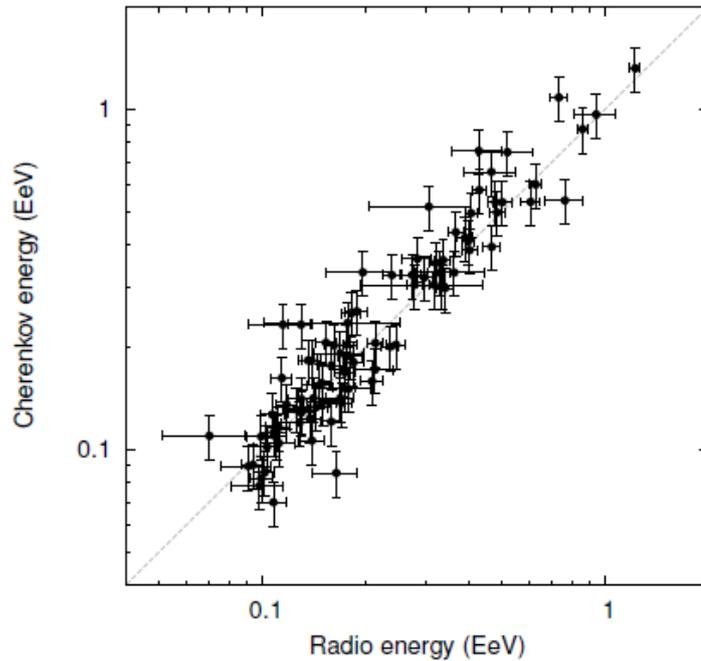


Рис. 3.8. Корреляция между энергией ШАЛ, восстановленной установкой Тунка-133 и нормированной амплитудой радиоизлучения для первого года измерений.

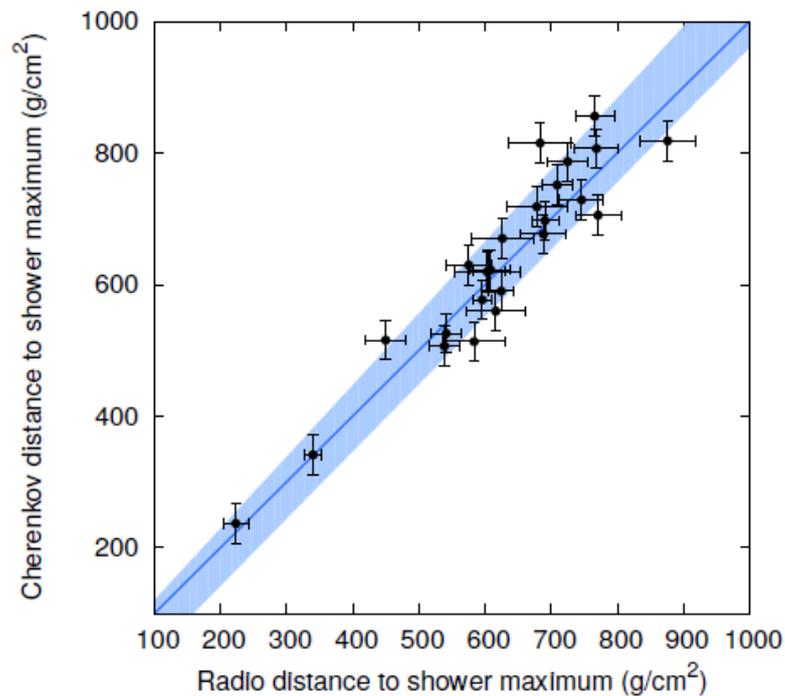


Рис. 3.9. Корреляция между глубиной максимума ливня, восстановленной установкой Тунка-133 и Tunka-Rex для первого года измерений.

3.4. Резюме

Описана система сбора данных с установок Тунка-133 и Tunka-Rex, произведен сбор данных за первые три года работы установки Tunka-Rex. Разработана методика выделения радиосигналов ШАЛ из экспериментальных данных с установки Tunka-Rex. Приведен пример восстановленного с помощью программного обеспечения Offline события. Получено распределение направлений прихода ШАЛ, зарегистрированных установкой Tunka-Rex. Показано, что сравнение моделированной в CoREAS амплитуды радиоизлучения ШАЛ и измеренной на установке Tunka-Rex дает хорошее согласие. Описаны критерии отбора событий для дальнейшей кросс калибровки установок Тунка-133 и Tunka-Rex. После применения данного отбора остается 91 событие за первый год работы установки.

Представлены методики восстановления основных характеристик первичной космической частицы по данным о радиоизлучении ШАЛ, зарегистрированных на установке Tunka-Rex. Для восстановления энергии первичной частицы и глубины максимума ливня применяется метод, основанный на свойствах функции пространственного распределения. Для улучшения качества данных был предложен метод оптимизации ФПР.

Представлены первые результаты энергетической кросс калибровки между двумя различными методами регистрации ШАЛ в совместных экспериментах, выполненных на радиоустановке Tunka-Rex и черенковской установке Тунка-133. Точность восстановления энергии установки Tunka-Rex составляет 20 %, а точность восстановления глубины максимума ливня 50 г / см^2 , что не уступает ведущим экспериментам по регистрации космических лучей и подтверждает перспективность и целесообразность установки Tunka-Rex.

Заключение

Диссертация посвящена исследованию основных характеристик ШАЛ по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков, регистрируемых с помощью установки Tunka-Rex.

Сформулируем основные результаты, полученные в диссертации:

1. Впервые проведен анализ шумовой обстановки в месте расположения эксперимента Tunka-Rex, подтверждающий возможность исследования космических лучей с энергетическим порогом 10 ТэВ путем детектирования радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц.

2. Исследовано влияние электронного оборудования и систем электропитания установок и инфраструктуры Тункинского Астрофизического полигона на регистрацию радиоизлучения ШАЛ. Разработана программа мониторинга состояния установки Tunka-Rex.

3. Аналитически и с помощью моделирования впервые исследовано влияние расположения антенн на прием радиосигнала ШАЛ. Показано, что в зависимости от направления магнитного поля в месте расположения детектора, ориентация антенн может влиять на его эффективность. В месте расположения установки Tunka-Rex ориентация антенн наиболее существенна для вертикальных ливней. Аналитически рассчитана мощность радиоизлучения в зависимости от величины и направления магнитного поля в месте расположения эксперимента. Сделаны рекомендации для выбора диаграммы направленности антенн в будущих экспериментах, предназначенных для регистрации радиоизлучения ШАЛ.

4. Разработана методика выделения радиосигналов ШАЛ из экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex. Разработаны методики восстановления основных характеристик первичной космической частицы по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков от ШАЛ, регистрируемых с помощью установки Tunka-Rex. Впервые реализована энергетическая кросс калибровка между двумя различными методами регистрации ШАЛ в совместных экспериментах, выполненных на радиоустановке Tunka-Rex и черенковской установке Тунка-133. Разработан метод оптимизации функции пространственного распределения, позволяющий увеличить статистику для событий с энергиями близкими к порогу регистрации.

В заключении автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю профессору Афанасьеву Николаю Тихоновичу за внимание к работе и ценные советы при ее написании, профессору Будневу Николаю Михайловичу за неоценимую помощь в освоении исследовательского подхода в интересном и непростом пути научного познания, основателю и руководителю коллаборации Tunka-Rex Франку Шредеру за создание свободной плодотворной рабочей атмосферы внутри коллектива, чья энергия и трудолюбие служили примером для подражания, Дмитрию Костюнину за бесчисленное множество полезных советов и дискуссий. Также автор выражает большую благодарность членам коллаборации Tunka-Rex: О.А. Грессу, Л.А. Кузьмичеву, Р.Р. Миргазову, Л.В. Панькову, В.В. Просину, Г.И. Рубцову, Е.Н. Константинову, Е.Е. Коростелевой, А.Загородникову, П.А. Безъязыкову A. Naungs, R.Hiller, T. Huege, M. Kleifges, O. Krömer, , C. Rühle, F.G. Schröder, R. Wischnewski.

Автор благодарен коллективам НИИПФ ИГУ и кафедры радиофизики ИГУ за полезные советы и замечания, высказанные при обсуждении настоящей работы.

Литература

1. Fermi E. On the Origin of Cosmic Radiation / E. Fermi // *Physical Review*.-1949.- 75(8). - P. 1169.
2. Славатинский С.А. Космические лучи и их роль в развитии физики высоких энергий и астрофизики / С.А. Славатинский // *Соровский образовательный журнал*.-1999.- № 10. - С. 68-74.
3. Hillas A. M. The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays / A. M. Hillas // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*.-1984.- № 22.- P. 425–444.
4. Гинзбург В.Л. Происхождение космических лучей / В.Л. Гинзбург // *Журнал "Успехи физических наук"*.- 1957.- Т. 62., № 2. - С. 37-98.
5. Greisen K. End to the Cosmic-Ray Spectrum / K. Greisen // *Physical Review Letters*.- 1966.-№ 16.- P. 748–750.
6. Зацепин Г.Т. Верхний предел спектра космических лучей / Г.Т. Зацепин, В.А. Кузьмин // *ЖЭТФ*.- 1966.- Т. 4., № 3.- С. 114–117.
7. Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей / В.Л. Гинзбург // *Журнал "Успехи физических наук"*.- 1996.- Т. 166., № 2.- С. 169 – 183.
8. Бережко Е.Г. Ускорение космических лучей ударными волнами / Е.Г. Бережко, Г. Ф. Крымский // *"Успехи физических наук"*.- 1988.- Т. 154., №1.- С. 49 – 91.
9. Урысон А. В. Космические лучи сверхвысоких энергий: возможное происхождение и спектр / А. В. Урысон // *ЖЭТФ*.- 1998.-Т. 113, № 1.- С. 12-20.
10. Apel W. D. et al. (KASCADE Collaboration). Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: Update on the KASCADE unfolding analysis / W. D. Apel et al. (KASCADE Collaboration) // *Astroparticle Physics*.- 2009.- 31(2).- P. 86 – 91.
11. Haungs A. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays / A. Haungs, H. Rebel., M. Roth. // *Reports on Progress in Physics*.-2003.- 66(7).- P. 1145-1206.
12. Blümer J. Cosmic rays from the knee to the highest energies / J. Blümer, R. Engel, J. R. Hörandel // *Progress in Particle and Nuclear Physics*.- 2009.-63.- P. 293–338.

13. Abraham J. Anisotropy studies around the galactic centre at EeV energies with the Auger Observatory / J. Abraham et al. (Pierre Auger Observatory) // *Astroparticle Physics*.-2007.- 27.- P. 244–253.
14. Garyaka A.P. Rigidity-dependent cosmic ray energy spectra in the knee region obtained with the GAMMA experiment / A.P. Garyaka, R.M. Martirosov // *Astroparticle Physics*.-2007.- 28, issue 2.- P. 169.
15. Бедняков В.А. Почему исследования космических лучей сверхвысоких энергий следует проводить на околоземной орбите / В.А. Бедняков // *Физика элементарных частиц и атомного ядра ОИЯИ*.-2002.- Т.33., №. 5.- С. 1146-1176.
16. Linsley J. Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 1020 eV / J. Linsley // *Physical Review Letters*. – 1963.- 10(4).- P. 146–148.
17. Abreu P. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter / P. Abreu et al. (Pierre Auger Observatory) // *Astroparticle Physics*.-2010.-№ 34.-P. 314–326.
18. Allard D. UHE nuclei propagation and the interpretation of the ankle in the cosmic-ray spectrum / D.Allard, E.Parizot, A. V. Olinto et al. // *Astronomy & Astrophysics*.- 2005.-443(3).- P. 29–32.
19. Царев В.А. Регистрация космических лучей ультравысоких энергий радиометодом / В.А. Царев // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. - 2004. - Т. 35, № 1. - С. 186-247.
20. Кочаров Г.Е. Космические лучи ультравысокой энергии и реликтовое излучение во Вселенной / Г.Е. Кочаров // *Соровский образовательный журнал*.-2001.- Т. 7.- №7 .- С. 83-87.
21. Auger P. Extensive Cosmic-Ray Showers / P.Auger, P.Ehrenfest, R. Maze et al // *Reviews of Modern Physics*.-1939.-№ 11.- P. 288–291.
22. Добротин И. А. Широкие атмосферные ливни космических лучей / И. А.Добротин, Г. Т. Зацепин // *Журнал "Успехи физических наук"*.- 1953.- Т. XLIX, № 2.- С. 185 – 242.
23. Гаряка А.П. Исследование основных характеристик первичного космического излучения сверхвысоких энергий в эксперименте ГАММА / А.П. Гаряка, Р.М. Мартиросов, С.О. Сохоян // *Известия НАН Армении, Физика* .- 2013.- Т.48, №2.- С.79-94.

24. Денисов С.П. Излучение «сверхсветовых» частиц (эффект Черенкова) / С.П. Денисов // Соревновательный общеобразовательный журнал.-1996.- №2.-С. 89 – 97.
25. Буднев Н.М. Экспериментальные исследования первичных космических лучей высоких и сверхвысоких энергий на установке «Тунка» / Н.М. Буднев // Лекции БШФФ. - 2005. - С. 3-8.
26. Аскарьян Г.А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное радиоизлучение от него / Г.А. Аскарьян // ЖЭТФ. -1961. -Т. 41. -С. 616-618.
27. Kahn F. D. Radiation from cosmic ray air showers / F. D. Kahn, I. Lerche // Proc. Phys. Soc.-1966.- Sect. A 289. 206.
28. Вернов С.Н. Исследование радиоизлучения широких атмосферных ливней на комплексной установке МГУ. Пространственное распределение радиоизлучения и его поляризация / С.Н. Вернов, Г.Б. Христиансен, А.Т. Абросимов, В.Б. Атрашкевич, О.В. Веденеев, К.Ф. Нит // журнал Известия АН СССР. Серия физическая .- т. 34, №9 .- 1970 г. - с. 1996-1999.
29. Allan H.R. Radio Pulses from Extensive Air Showers / H. R. Allan and R. W. Clay // Nature .- V. 227.- 1970.- P. 1116–1118.
30. Knurenko S. Radio signal correlation at 32 mhz with extensive air showers parameters / S. Knurenko and I. Petrov //Journal of Physics: Conference Series.-2015.- 632(1):012100.
31. Prosin V.V. Tunka-133: Main Experimental Results of 3 Year Operation/ V.V. Prosin for the Tunka collaboration. // In Proceedings of the 33rd international cosmic ray conference, Rio de Janeiro, 2013.
<http://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0617.pdf>
32. Anderson Carle D. The positive electron / Carle D. Anderson // Physical Review.-1933.- Volume 43.- P. 491-493.
33. Jelley J. V. Radio Pulses from Extensive Cosmic-Ray Air Showers / J. V. Jelley, J. H. Fruin, N. A. Porter et al. // Nature.-1965.- V. 205.- P. 327–328.
34. Ender M. Radio Emission of Extensive Air Showers during Thunderstorms/ M. Ender et al. (LOPES Collaboration) // In Proceedings of the 31st ICRC, Poland, number 0405, 2009.
<http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/>.

35. Huege T. The renaissance of radio detection of cosmic / T. Huege // In Proceedings of the 33rd international cosmic ray conference.- Rio de Janeiro.- 2013.
36. Scholten, O. A macroscopic description of coherent geo-magnetic radiation from cosmic-ray air showers / O. Scholten, K. Werner and F. Rusydi // *Astroparticle Physics*. – 2008. – V. 29.- P. 94–103.
37. Калмыков Н.Н. Моделирование черенковского и геосинхротронного радиоизлучения атмосферных ливней с энергией 1 и 10 ТэВ / Н.Н. Калмыков, А.А. Константинов, Р. Энгель // *Вестник Московского Университета*. - 2006. - № 5. - С. 14-17.
38. Huege T. Simulating radio emission from air showers with CoREAS / T. Huege, M. Ludwig, C. W. James // *AIP Conference Proceeding*.- 2013.- V. 1535. - P. 128-132.
39. Sciutto S. J. AIRES: A system for air shower simulations (Version 2.2.0). / S. J. Sciutto // *ArXiv Astrophysics e-prints*.- 1999.- astro-ph/9911331.
40. Ludwig M. REAS3: Monte Carlo simulations of radio emission from cosmic ray air showers using an “end-point” formalism» / M. Ludwig, T. Huege. // In Proceedings of the ARENA conference.- Nantes, France.- 2010.- arXiv:1010.5343v1.
41. Huege T. Instruments and Methods in Physics Research / T. Huege // In Proceedings of the ARENA conference.- Rome, Italy.- Nuclear A 604 (2009).- P. 57–63.
42. Филоненко А.Д. Детектирование космических лучей по электронной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий / А.Д. Филоненко // *Успехи физических наук*. - 2002. - Т. 172, № 4. - С. 439-471.
43. Falcke H. Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope / H. Falcke, P. Gorham // *Astropart. Physics*. – 2003.-V. 19.- P. 477–494.
44. DuVernois M. A. Geosynchrotron radio pulse emission from extensive air showers: Simulations with AIRES / M. A. DuVernois, B. Cai. and D. Kleckner // In Proc. of the 29th ICRC .- Pune, India.- 2005.- P. 311
45. Engel, R., Kalmykov, N. N. and Konstantinov A. A. Simulation of Cherenkov and Synchrotron Radio Emission in EAS / R. Engel, N. N. Kalmykov and A. A. Konstantinov // In Proc. of the 29th ICRC, Pune, India.-2005.- V. 6.- P. 9–12.

46. Scholten O. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research / O.Scholten, K. Werner // Proc. of the ARENA 2008 conference.- Rome, Italy .- A 604 (2009).- P. 24–26.
47. Huege, T. Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers / T. Huege, R. Ulrich and R. Engel // Astropart. Physics. – 2007. – V. 27.-P. 392–405.
48. Huege T. Simulating radio emission from air showers with CoREAS Citation / T. Huege // AIP Conf. Proc. - 2013 – V. 1535.- P. 128-131.
49. Пановский В. Классическая электродинамика / В. Пановский, М. Филипс // ГИФМЛ, 1963. - 432с.
50. Heck D. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers / D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle et al. // FZKA Report 6019.- ForschungszentrumKarlsruhe.- 1998.
51. **Казарина Ю. А.** Искажение структуры короткого радиоимпульса ШАЛ при распространении в волноводе земля-ионосфера / **Ю.А. Казарина**, В.Ю. Савинов, Н.Т. Афанасьев.// Материалы Всероссийской научной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”, Институт космических исследований РАН.- Москва, 2014.- С.70.
52. **Казарина Ю.А.** Математическое моделирование прямого и переотражённого от ионосферы радиоизлучения ШАЛ на основе макроподхода / **Ю.А. Казарина**, В.Ю. Савинов, Н.Т. Афанасьев. // Материалы Всероссийской научной конференции “Физика плазмы в солнечной системе” Институт космических исследований РАН.- Москва, 2015.-С. 95.
53. Falcke H. Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers / H. Falcke et al. (LOPES Collaboration)// Nature.- 2005.- V. 435 .- P. 313–316.
54. Ardouin D. et al. (CODALEMA Collaboration). Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.- 2005.- V. 555.- P. 148–163.
55. A. van den Berg. Radio detection of high-energy cosmic rays at the Pierre Auger Observatory / A. van den Berg for the Pierre Auger Observatory // In Proceedings of the 31st ICRC.-Poland.- number 0232.- 2009.

<http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/, astro-ph/0906.2354>.

56. Falcke H. A very brief description of LOFAR - the Low Frequency Array / H. Falcke et al. // In IAU GA 2006, Highlights of Astronomy.- Vol. 14.- 2006. astro-ph/0610652.
57. Lehtinen Nikolai G. The FORTE VHF instrument as a high-energy cosmic ray detector / Nikolai G. Lehtinen, Peter W. Gorham, a Abram R. Jacobson and Robert A. Roussel-Dupr'e // Proc. of SPIE.- Vol. 4858 297.-USA. -2003.- P. 296-304.
58. Kravchenko I. Recent results from the RICE experiment at the South Pole / I. Kravchenko for the RICE Collaboration // In Nucl. Instr. and Meth. A; Proceedings of the ARENA 2010 conference.- Nantes, France.- 2010. DOI:10.1016/j.nima.2010.11.012, in press.
59. Gerhardt L. A prototype station for ARIANNA: A detector for cosmic neutrinos / L. Gerhardt, S. Klein, T. Stezelberger, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.-2010.- V. 624(1).- P. 85 – 91.
60. Aguilar J.A. AMADEUS–The acoustic neutrino detection test system of the ANTARES deep-sea neutrino telescope / J.A. Aguilar et al. (ANTARES Collaboration) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.-2011.- V.626.- P.128 – 143.
61. Connolly A. SalSA status / A. Connolly // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.-2009.- V. 604(1-2, Supplement 1).- P. 122 – 123.
62. Гусев Г.А. Ледяные спутники планет Солнечной системы и орбитальные радиодетекторы для регистрации частиц ультравысоких энергий / Г.А. Гусев // Успехи физических наук. - 2010. - Т. 180, № 9. - С. 957-964.
63. Веденеев О.В. Глубина максимума ШАЛ и массовый состав ПКЛ при энергии $4 \cdot 10^{17}$ эВ по данным радиоизлучения ШАЛ / О.В. Веденеев // Ядерная физика .- 2009.- Т. 72, № 2.- С. 277-283.
64. Ivanov A.A. Measuring extensive air showers with cherenkov light detectors of the yakutsk array: the energy spectrum of cosmic rays / A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, and I Ye Sleptsov // New Journal of Physics.- 11(6).- 2009.- 06500.
65. Petrov I. Depth of Maximum Development of Extensive Air Showers by Radio Emission Data at Yakutsk EAS Array / I. Petrov et al. // In Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference.- The Hague, The Netherlands.- 2015.- page PoS (ICRC 2015) 255.

66. Кнуренко С.П. Измерения радиосигналов на частоте 32 МГц на Якутской комплексной установке ШАЛ / С.П. Кнуренко, В.И. Козлов, З.Е. Петров, М.И. Правдин // 31-я ВККЛ, Москва, МГУ, 2010
<http://www.researchgate.net/publication/268409874> 32
67. Schroeder F.G. Tunka-Rex: a Radio Antenna Array for the Tunka Experiment / F.G. Schroeder, Y. Kazarina et al. (Tunka-Rex collaboration) // in Proc. of the ARENA.- Erlangen, Germany.-2012.-AIP Conf.Proc, arXiv: 1301.2555v1
<http://arxiv.org/pdf/1301.2555.pdf>
68. Huege T. The LOPES experiment — recent results, status and perspectives / T. Huege et al. (LOPES Collaboration) // In Nucl. Instr. and Meth. A; Proceedings of the ARENA 2010 conference.- Nantes, France.- 2010. DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.081, in press.
69. Nigl A. Direction identification in radio images of cosmic-ray air showers detected with LOPES and KASCADE / A. Nigl et al. - LOPES Collaboration // Astronomy & Astrophysics. –487. - 2008.– P. 781–788.
70. Ardouin D. Geomagnetic origin of the radio emission from cosmic ray induced air showers observed by CODALEMA. / D. Ardouin et al. - CODALEMA Collaboration // Astroparticle Physics.- 31(3).- 2009 .- P. 192 – 200.
71. Coppens J. Observation of radio signals from air showers at the Pierre Auger Observatory / J. Coppens for the Pierre Auger Observatory // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.- 604(1-2, Supplement 1) .- 2009.-P. 41 – 43.
72. Revenu B. Radio-detection of cosmic ray air showers by the Auger experiment, a fully autonomous and self-triggered system installed at the Pierre Auger Observatory / B. Revenu for the Pierre Auger Observatory //
73. Abraham J. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory / J. Abraham et al. - Pierre Auger Observatory // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.- A 523(1-2).-2004.- P. 50 – 95.
74. Fliescher S. Radio detection of cosmic ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory / S. Fliescher for the Pierre Auger Observatory // In Nucl. Instr. And Meth. A; Proceedings of the ARENA 2010 conference.-Nantes, France.-2010.- DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.045, in press

75. Abraham J. Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory / J. Abraham et al. - Pierre Auger Observatory // Physics Letters B .- 685(4-5) .- 2010 .- P. 239 – 246.
76. Coppens J. Observation of radio signals from air showers at the Pierre Auger Observatory / J. Coppens for the Pierre Auger Observatory. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.- Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.- 604(1-2, Supplement 1) .- 2008 .- P. 41 – S43.
77. Roettgering H. LOFAR: a new radio telescope for low frequency radio observations: science and project status / H. Roettgering et al. // In Texas in Tuscany. XXI Symposium on Relativistic Astrophysics .- 2003. P. 69–76.
78. Schroeder F.G. Tunka-Rex: a Radio Extension of the Tunka Experiment / F.G. Schroeder, Y. Kazarina et al. (Tunka-Rex collaboration) // in Proc. of the ECRS 2012 (Moscow, Russia).-Journal of Physics: Conference.- Series 409 (2103) 012076.- P. 455.
79. **Казарина Ю.А.** Регистрация радиоизлучения ШАЛ на установке Tunka-Rex / **Ю.А. Казарина** (за коллаборацию Tunka-Rex) // Сборник трудов БШФФ-2013 «Взаимодействие полей и излучения с веществом».- Иркутск.-2013.- С. 78-79
80. Schroeder F.G. The Tunka Radio Extension (Tunka-Rex): Status and First Results / F.G. Schroeder, **Y. Kazarina** for the Tunka-Rex collaboration // in Proc. of the 33-rd ICRC.- Rio de Janeiro, Brazil.- 2013.- 0452
<http://arxiv.org/abs/1308.0910>
81. Hiller R. Status and first results of the Tunka radio extension / R. Hiller, **Y. Kazarina** et al. for the Tunka-Rex collaboration // in Proc. of the ICATPP.- 2013, accepted for publication by World Scientific
82. Budnev N. The Tunka - multi-component EAS detector for high energy cosmic ray studies / N. Budnev, **Y. Kazarina** et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.- 2013.- Volume 732.- P. 281–285
83. Budnev N. TAIGA the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy - present status and perspectives. / N. Budnev, **Y. Kazarina** et al. // Journal of Instrumentation.-2014, September.- Volume 9.-C09021 doi:10.1088/1748-0221/9/09/C09021

84. Budnev N. M. The Tunka-133 EAS Chrenkov array - status, first results and plans / N. M. Budnev et al. - Tunka Collaboration // In Proceedings of the 31st ICRC.-Poland.- number 1069.- 2009.
<http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/,astroph/1003.0089>.
85. Gress O.A. The new Tunka-133 EAS Cherenkov Array: Status of 2009 / O.A. Gress, B.V. Antokhonova, S.F. Beregneva // Preprint submitted to Nuclear Instruments and Methods A 2010
86. Prosin V.V. Tunka-133: Main Experimental Results of 3 Year Operation / V.V. Prosin for the Tunka collaboration//
87. <http://www.ckp-rf.ru/usu/73552/>
88. Kunnas M. Hardware and first results of TUNKA-HiSCORE / M. Kunnas, M. Brückner // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.- A 742.- 2014.- P. 269–270.
89. Tluczykont M. The HiSCORE experiment and its potential for gamma-ray astronomy / M. Tluczykont, D. Hampf // Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012120 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference).- IOP Publishing
90. Буднев Н.М. Моделирование сцинтилляционного эксперимента Тунка-133 . Н. М. Буднев, А. Л. Иванова // ВМУ.- Серия 3. Физика. Астрономия.- 2014.- № 4.- С. 80-83.
91. Budnev N.M. The Tunka-Grande scintillator array of the TAIGA Gamma Ray Observatory / N.M. Budnev, A.L. Ivanova // Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. -79.- 2015.- P. 395-396.
92. Hiller R. The Tunka-Rex antenna station / R.Hiller, Y. Kazarina et al. (Tunka-Rex collaboration) // in Proc. of the 33-rd ICRC 2013 (Rio de Janeiro, Brazil), 1278,
<http://arxiv.org/abs/1308.0917>
93. Hiller R. Calibration of the absolute amplitude scale of the Tunka Radio Extension / R. Hiller, **Y. Kazarina** et al. for the Tunka-Rex collaboration // in Proc. of the 34-rd ICRC.- 2015.
<http://arxiv.org/pdf/1508.06210v1.pdf>
94. Kroemer O. New Antenna for Radio Detection of UHECR / O. Kroemer // Proceedings of the 31st ICRC.- 2009.- p. 25.

95. Nehls S. / Amplitude calibration of a digital radio antenna array for measuring cosmic ray air showers / S. Nehls, et al. //Nucl. Instr. Meth.- A 589 .-2008.- P. 350-361.
96. **Kazarina Y.** Tunka-Rex experiment for detection of air-shower radio emission / **Y. Kazarina**, F.G. Schroeder et al. for the Tunka-Rex collaboration // in Proc. Of the ARENA.-Annapolis,USA.-2014.
<https://events.icecube.wisc.edu/contributionDisplay.py?contribId=5&sessionId=1&confId=55>
97. **Y. Kazarina** et al. (Tunka-Rex collaboration). Tunka-Rex: Event Reconstruction and Effect of Antenna Alignment // Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) Wuppertal, Germany, 2015
<http://www.dpgverhandlungen.de/year/2015/conference/wuppertal/part/t/session/95/contribution/3>
98. Schroeder F. G. On noise treatment in radio measurements of cosmic ray air showers./ F.G. Schroeder et al. - LOPES Collaboration// In Nucl. Instr. and Meth. A; Proceedings of the ARENA 2010 conference.- Nantes, France.- 2010. DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.009, in press.
99. http://www.rohdeschwarz.ru/products/test_and_measurement/spectrum_analysis/FSH48/
100. <http://www.td-str.ru/file.aspx?id=25546>
101. Budnev N.M. Data acquisition system for the Tunka-133 array // N.M. Budnev, O.B. Chvalaev et al. // ICRC 2013 Tunka-133 33rd ICRC.-Rio de Janeiro.- 2013
102. Kostunin D. Tunka-Rex: Status and Results of the First Measurements / D. Kostunin, **Y. Kazarina** et al. for the Tunka-Rex collaboration // Published in Nucl.Instrum.Meth.- A742.- 2014.- P. 89-94
103. Hiller R. Status and first results of Tunka-Rex, an experiment for the radio detection of air / R. Hiller, **Y. Kazarina** et al. for the Tunka-Rex collaboration // Physics Procedia 61.- 2015.- P. 708 – 713
104. Apel W. D. Lateral distribution of the radio signal in extensive air showers measured with LOPES / W. D. Apel et al. - LOPES Collaboration // Astroparticle Physics.- 32 .- 2010.- P. 294–303.
105. Vedenev O. Depth of the maximum of extensive air showers and mass composition of primary cosmic radiation at an energy of 4×10^{17} eV according to data on

- radioemission from extensive air showers / O. Vedenev // *Physics of Atomic Nuclei*.- 72.- 2009.- P. 250–256.
106. Huege T. Dependence of geosynchrotron radio emission on the energy and depth of maximum of cosmic ray showers / T. Huege, R. Ulrich, and R. Engel // *Astroparticle Physics*.- 30 .- 2008.- P. 96–104.
107. Nelles A. A parameterization for the radio emission of air showers as predicted by CoREAS simulations and applied to LOFAR measurements / A. Nelles // *Astropart.Phys.* 60 .-2014.- P. 13–24. arXiv:1402.2872
108. Kostunin D. Reconstruction of air-shower parameters for large-scale radio detectors using the lateral distribution / D. Kostunin et al. // *Astroparticle Physics* submitted.-2015.- arXiv:1504.05083.
109. LOPES collaboration. Reconstruction of the energy and depth of maximum of cosmic-ray air showers from LOPES radio measurements / LOPES collaboration // *Phys.Rev. D*90 (6).-2014.- 062001. arXiv:1408.2346
110. Prosin V. Tunka-133: Results of 3 year operation / V. Prosin, S.F. Berezhnev et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.- Section A*.- V. 756.- 21 August 2014.- P. 94-101.
111. Kostunin D. The Tunka Radio Extension: reconstruction of energy and shower maximum of the first year data / D. Kostunin, **Y. Kazarina** et al. for the Tunka-Rex collaboration // in *Proc. of the 34-rd ICRC*.- 2015.- accepted for publication <http://arxiv.org/pdf/1508.06211v2.pdf>
112. **Казарина Ю.А.** Результаты обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex / **Ю.А. Казарина** (за коллаборацию Tunka-Rex) // Тезисы XIX Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике “Физические процессы в космосе и околоземной среде”.- Иркутск, 2015.- С. 14.