

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск - 2015

Работа выполнена на кафедре радиофизики и радиоэлектроники
Иркутского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Афанасьев Николай Тихонович

Официальные оппоненты: Петков Валерий Борисович,
доктор физико-математических наук,
Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ
РАН, заведующий лабораторией

Ильин Николай Викторович,
кандидат физико-математических наук,
доцент,
ИСЗФ СО РАН, ведущий научный со-
трудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт космофизических исследований
и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН

Защита диссертации состоится на заседании диссертационно-
го совета Д.212.074.04 при Иркутском государственном университете по ад-
ресу: 664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского го-
сударственного университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Б.В. Мангазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследование источников и механизмов образования космических лучей высоких и сверхвысоких энергий является фундаментальной проблемой астрофизики [1-4]. 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. 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. Эта область энергий привлекает особое внимание в связи с ее важностью для понимания природы источников и механизмов ускорения частиц сверхвысоких энергий. В области энергий $E_0 \geq 10^{15}$ 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 радио излучение. 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. Существенно более точные данные о космических лучах можно получать, используя методы наблюдений оптического (черенковского и флуоресцентного) излучения и радиоизлучения ШАЛ [5-9], так как в данном случае атмосфера играет роль гигантского калориметра.

В 2012 году на территории черенковской установки Тунка-133 начато создание установки Tunka-Rex (Тунка-радио расширение) 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 косми-

ческого 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 Tunka-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 развертывании 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 105 страниц.

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 Тунка-133 новыми детекторами радиоизлучения и заряженной компоненты ШАЛ Тунка 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 проблеме влияния расположения антенн на прием радиосигнала ШАЛ. В большинстве современных экспериментов, детектирующих радиоизлучение ШАЛ, антенны направлены строго на геомагнитные север-юг и запад-восток [10]. 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 [11]. Такое расположение антенн предполагает наличие сигнала в обоих каналах с относительно равной амплитудой, что позволяет определить поляризацию сигнала.

Поскольку основной вклад в радиоизлучение ШАЛ дает геомагнитный механизм, рассматривается только компонента E_{EW} , которая пропорциональна силе Лоренца:

$$\vec{E} = (\vec{V} \times B) \quad (1)$$

где \vec{B} – магнитное поле Земли в месте расположения эксперимента, \vec{V} – направление оси ШАЛ.

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° . Далее, посчитаем проекции электрического поля на антеннах для двух конфигураций «А» и «А'»:

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

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

$$\Delta \max(\theta, \varphi) = \max[(\vec{E}, \vec{A}_1)^2, (\vec{E}, \vec{A}_2)^2] - \max[(\vec{E}, \vec{A}_1')^2, (\vec{E}, \vec{A}_2')^2] \quad (3)$$

где θ и φ – зенитный и азимутальный угол ШАЛ.

Если же мы проинтегрируем (3) по азимутальному углу ШАЛ φ и возьмем зависимость от зенитного угла ШАЛ θ :

$$I(\theta) = \int_0^{2\pi} \Delta \max(\theta, \varphi) d\varphi \quad (4)$$

то получим, что при $\theta \geq \theta_B$ зависимость от поворота антенн вырождается (Рис. 1). 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 ($\theta_B = 53.4^\circ$).

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.

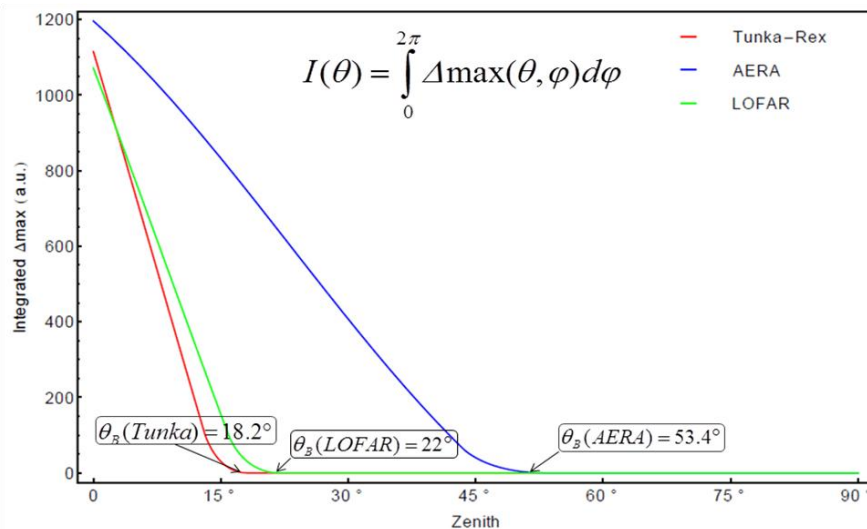


Рис. 1. Результат интегрирования разности конфигураций антенн $\Delta \max$ по направлению прихода ШАЛ для экспериментов Tunka-Rex, LOFAR, AERA.

Также было рассмотрено влияние поворота антенны на эффективность детектора Tunka-Rex в присутствии шума. Для этого использовалась база данных радиоимпульсов, моделированных в программе CoREAS: для протона - 296 событий, для железа - 332 события. Далее эти события обрабатывались с помощью модуля программного обеспечения Auger Offline для обработки данных с радиоустановок, модифицированного под нужды Tunka-Rex. Рассматривалось количество восстановленных событий и сработавших антенн в зависимости от азимутального угла антенны для различных уровней шумов при разных критериях обработки, где в качестве первоначальной час-

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

В п. 2.4., 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. Для этого, 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.

$$E_A^2 = (\vec{E}, \vec{A}_1)^2 + (\vec{E}, \vec{A}_2)^2 \quad (5)$$

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

$$\int_0^{2\pi} E_A^2(\theta, \varphi) d\varphi = B^2 \pi (1 - \cos(2\theta_B) \cos(2\theta)) \quad (6)$$

то можно увидеть, что в случае наклонных ливней для эксперимента Tunka-Rex радиоизлучение ШАЛ, вызванное геомагнитным механизмом, особенно мощное (Рис. 2).

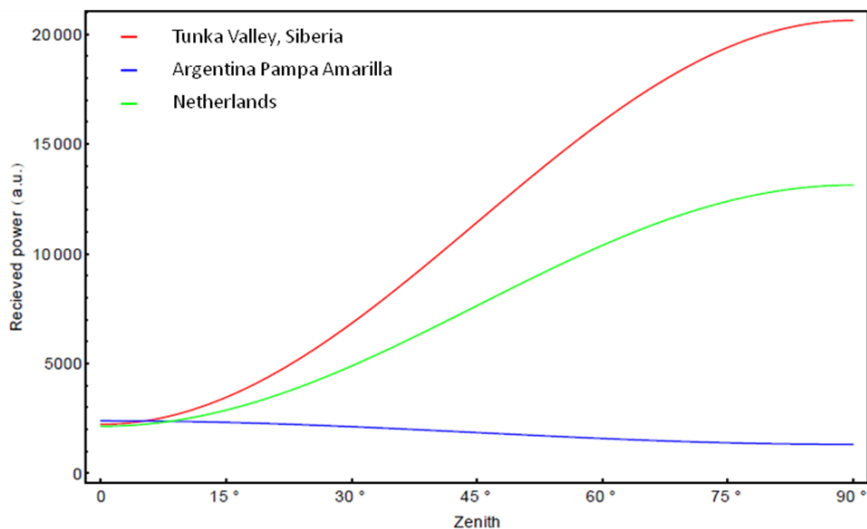


Рис. 2. Зависимость мощности радиоизлучения ШАЛ от зенитного угла для экспериментов Tunka-Rex, AERA и LOFAR: по оси x - зенитный угол ШАЛ, по оси y – интеграл мощности радиоизлучения ШАЛ.

Из рис. 2. можно сделать вывод, что для экспериментов, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ, важно знать как величину магнитного поля, так и его направление. Кроме того, для будущих экспериментов диаграмма на-

правленности антенны должна выбираться в зависимости от направления магнитного поля в месте расположения эксперимента.

В п. 2.5. анализируется помеховая обстановка в месте расположения эксперимента Tunka-Rex на возможность регистрации радиоизлучения ШАЛ. Для проведения измерения фоновых условий использовался многофункциональный измерительный прибор FSH4 и измерительная антенна НК116. Для обработки данных спектроанализатора использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

На рис. 3. представлена спектрограмма шумов, снятая с антенны НК116 (E-W), 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 получения качественных представлений о помеховой обстановке с минимальным влиянием местных источников использовался режим измерения спектров с усреднением по 100 спектрам.

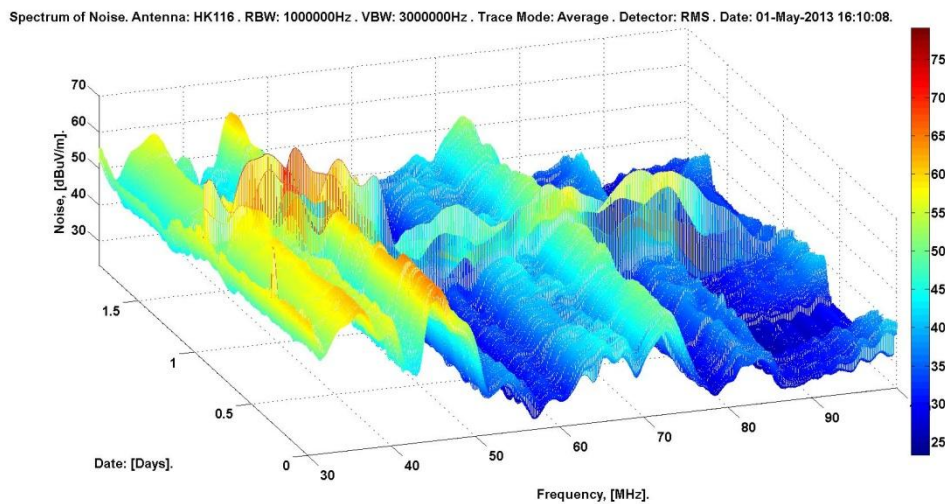


Рис. 3. Спектрограмма шумов. Антенна НК116 (E-W). (Усреднение: 100 спектров).

На рис. 4. 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.

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.

Рассмотрение поля помех в диапазоне 10 – 3600 МГц показывает, что на высоких частотах возможны более благоприятные условия регистрации радиосигналов ШАЛ (Рис. 5). 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 [11], CODALEMA [12]). 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.

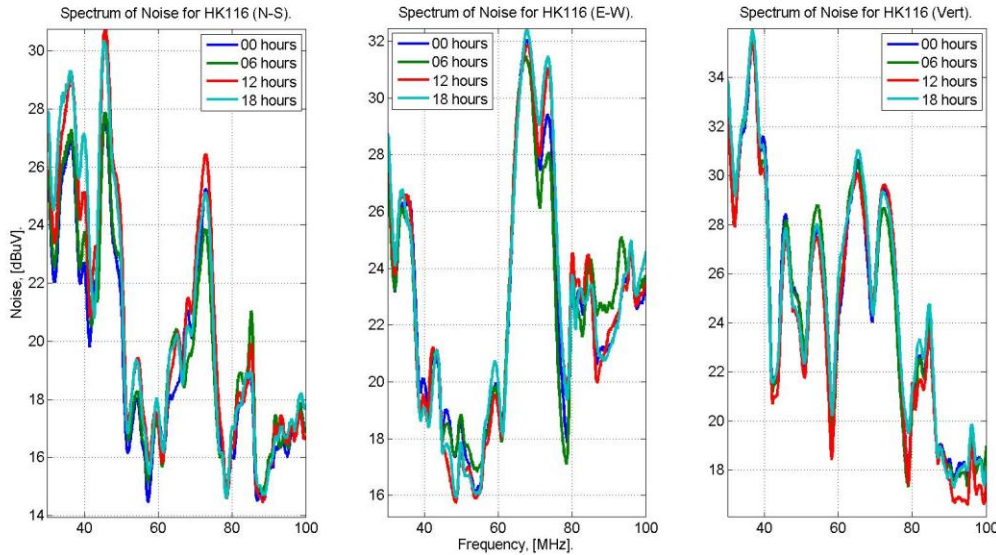


Рис. 4. Спектры в разное время суток для трех положений НК116.

В данном пункте также приведены результаты исследований влияния электронного оборудования, систем электропитания установок и инфраструктуры Тункинского Астрофизического центра коллективного пользования ИГУ на регистрацию радиоизлучения ШАЛ, которые в дальнейшем будут учитываться при обработке данных Tunka-Rex.

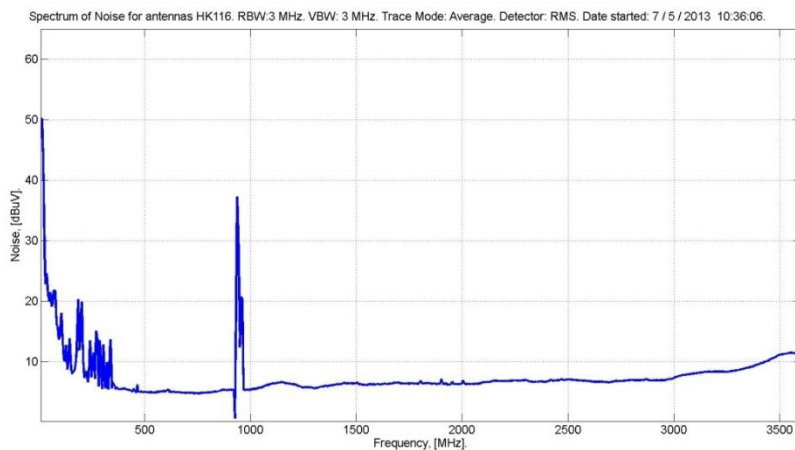


Рис. 5. Шумы в диапазоне 10 – 3600 МГц.

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. 6) 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.

Непосредственное проникание измерительных импульсов сигналов фотоумножителей установки Тунка-133 не отмечено. Сигналы радиоимпульсов имеют четкую временную селекцию с импульсами ФЭУ благодаря разным длинам кабелей.

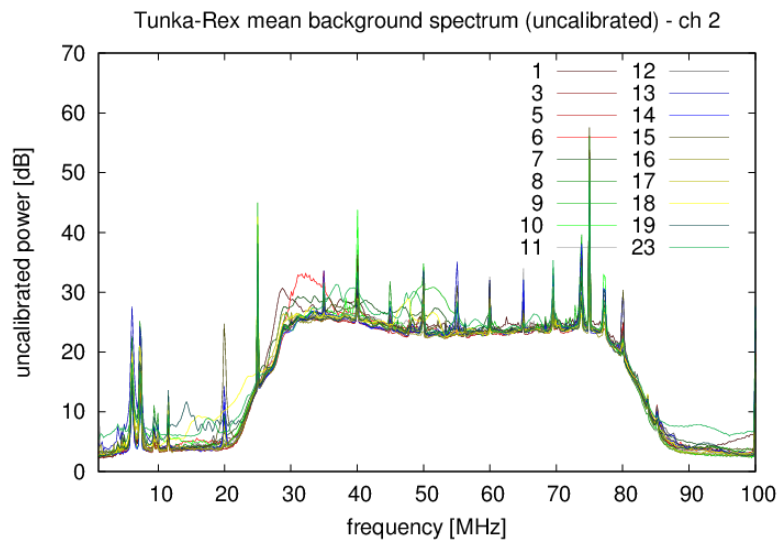


Рис. 6. Фоновые спектры, полученные в одном из сеансов радиоизмерений на установке Tunka-Rex.

Для того чтобы максимально оперативно получать информацию о каких-то неполадках антенной системы Tunka-Rex, необходимо построить систему, которая сможет получать мониторинговую информацию в режиме реального времени. В п. 2.6. приводится метод мониторинга состояния установки.

Третья глава посвящена разработке методик для обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex. 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 разработаны методы обработки данных с антенн детектора Tunka-Rex, а также проводится калибровка методов регистрации черенковского излучения и радиоизлучения. Для анализа радиоданных первого сезона в качестве входных параметров используется полная информация о ливне, полученная детектором Тунка-133: положение оси ШАЛ, энергия первоначальной частицы, глубина максимума ШАЛ. Впоследствии методы, отработанные по данным первого сезона, планируется использовать для анализа «слепым» методом данных последующих сезонов, т.е. информация с установки Тунка-133 об энергии и глубине максимума ливня не будет учитываться. После «раскрытия» данных Тунка-133 за соответствующий сезон измерений можно будет окончательно оценить качество данных установки Tunka-Rex и методов их обработки.

На Рис. 7. 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. Для определения положения сигнала используется феноменологический подход.

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:

$$\varepsilon_{true} = \varepsilon_{measured} \cdot \sqrt{1 - \frac{k}{SNR}} \quad (7)$$

где $k = 4.3$ - коэффициент нормировки, полученный в моделировании CoREAS. Критерием присутствия сигнала является соотношение сигнал-шум

SNR больше, 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 (минимальное количество антенн 3). 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° . 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 радиостановка Tunka-Rex способна также к детектированию горизонтальных событий.

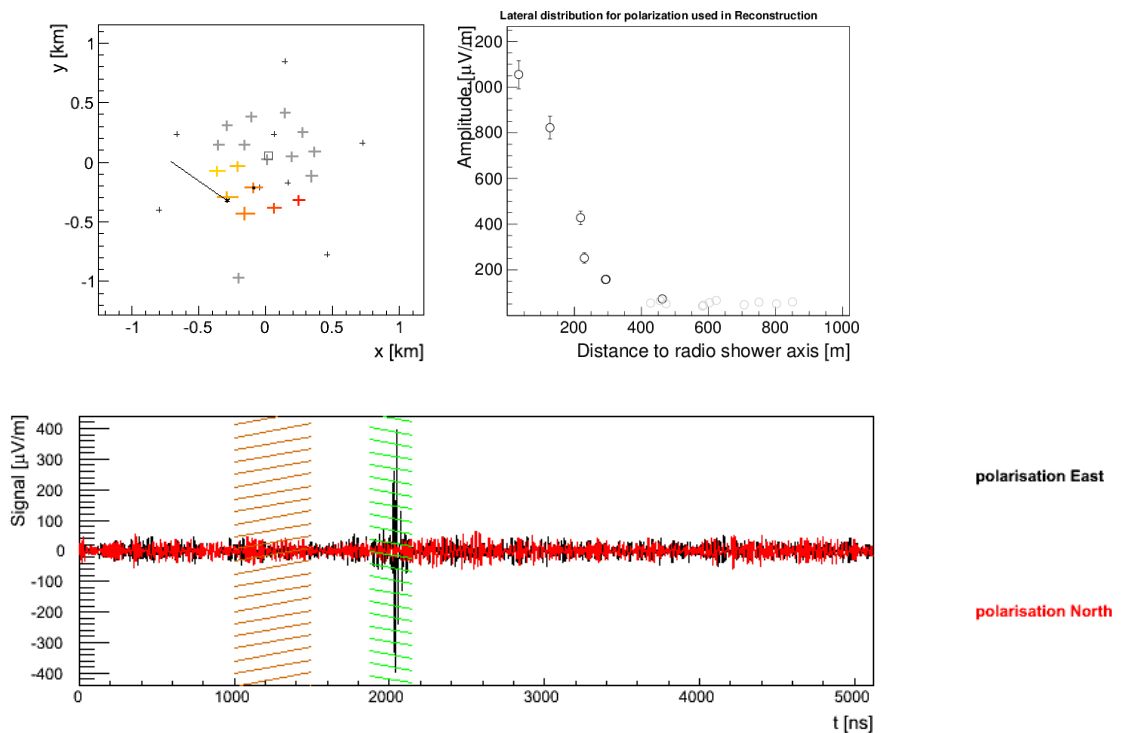


Рис. 7. Пример восстановленного события.

На рис. 8 представлено распределение событий по направлениям прихода ШАЛ. Хорошо видна чувствительность к наклонным ливням, а также прослеживается асимметрия север-юг, обусловленная геомагнитным механизмом генерации радиоизлучения ШАЛ.

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

Последним этапом является применение отбора событий верхнего уровня: совершается исключение из обработки антенн с ложными сигналами,

фитирование функции пространственного распределения (ФПР). После данного отбора остается 91 событие, которые могут быть использованы при обработке методик восстановления параметров ливня.

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} [13-15]. Особенности ФПР могут быть описаны следующим образом:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_{r_0} \sin \alpha_g \exp[f_\eta(r - r_0)], \quad (8)$$

$$f_\eta(x) = \sum_{k=1}^N a_k x^k,$$

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.

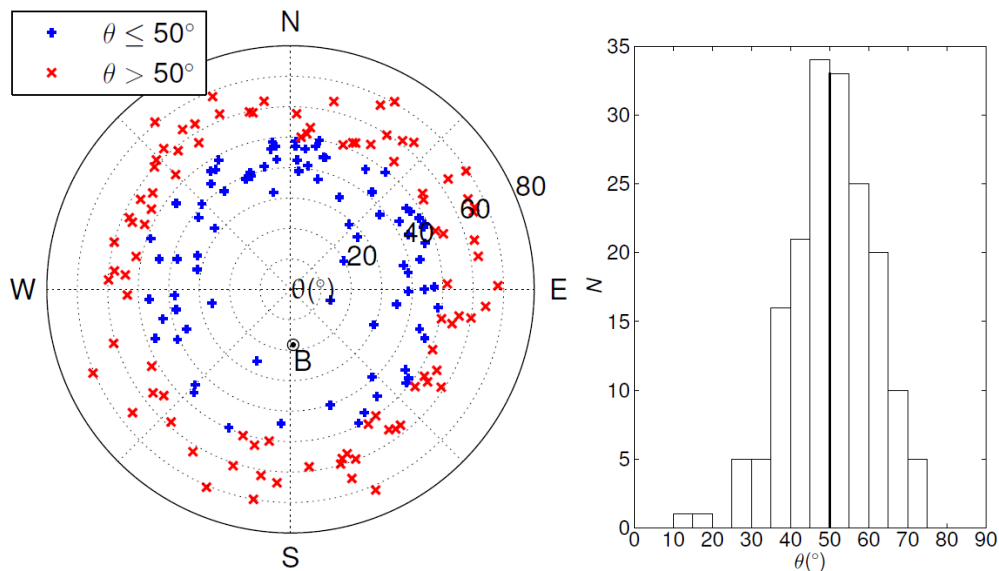


Рис 8. Распределение событий, зарегистрированных установкой Tunka-Rex, по направлениям прихода ШАЛ. Слева: распределение направлений прихода по сторонам света. Справа: количество зарегистрированных событий в зависимости от зенитного угла ШАЛ.

Поскольку пространственное распределение амплитуд является более сложным и содержит азимутальную асимметрию, связанную с интерференцией радиосигналов, генерируемых за счет геомагнитного эффекта и эффекта Аскарьяна, ко всем данным, полученным на отдельных антеннах установки Tunka-Rex, был применен метод коррекции азимутальной асимметрии. Идея метода состоит в том, что вклад от эффекта Аскарьяна параметризован постоянной величиной в 8.5 %, таким образом, азимутальная симметрия вос-

становивается без введения свободных параметров и проведения сложного фитирования.

Согласно теоретическим предсказаниям фитирование функцией Гаусса дает точность для восстановления глубины максимума ливня X_{max} около 25 г / см². Таким образом, для фитирования ФПР мы используем простую функцию Гаусса, которая в свою очередь может описать и черенковские эффекты:

$$\varepsilon = \varepsilon_{r_0} \exp[a_1(r - r_0) + a_2(r - r_0)^2] \quad (9)$$

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

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. Из-за того что установка Tunka-Rex регистрирует большое количество событий близких к порогу регистрации, был разработан метод оптимизации ФПР, заключающийся в уменьшении свободных параметров. Для этого необходимо зафиксировать один из параметров. Для этого необходимо зафиксировать один из параметров. С помощью моделированных в программе CoREAS событий были исследованы параметры a_1 и a_2 и выбран наиболее подходящий параметр для фиксирования.

Было показано, что параметр a_2 слабее зависит от глубины максимума ливня X_{max} , а также от зенитного угла ШАЛ, поэтому фиксируется параметр a_2 . Данный параметр выражаем как функцию зенитного угла и энергии первичной частицы:

$$\begin{aligned} a_2(\theta, E_{pr}) &= a_{21}(E_{pr}) - a_{22}(E_{pr}) \cos\theta, \\ a_{21} &= a_{200} + a_{201}E_{pr}, a_{22} = a_{210} + a_{211}E_{pr} \end{aligned} \quad (12)$$

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.

В общем виде формула для восстановления энергии выглядит таким образом:

$$E_{pr} = k \left(\frac{\varepsilon(r_e)}{\mu V / m} \right)^y \quad (13)$$

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 полу-

чаем разное распределение, корреляция амплитуды событий относительно рассчитанной энергии первичной частицы значительно разнится от случая к случаю. По теоретическим предсказаниям, полученным в [15], 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.

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

$$E_{pr} = k_L \varepsilon (r_e = 120 \text{ м}) \quad (14)$$

где $k_L = 884 \text{ EeV}/(\text{V}/\text{м})$ - константа, определенная моделированием CoREAS. Глубина максимума ШАЛ связана с наклоном ФПР:

$$X_{\max} = X_0 / \cos\theta - (A + B \log(\eta + \bar{b})) \quad (15)$$

$$\eta = \frac{df_\eta}{dr} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (16)$$

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

$$X_{\max} = X_{\text{det}} / \cos\theta - (A + B \log(a_1 + \bar{b})) \quad (17)$$

где $X_{\text{det}} = 955 \text{ г}/\text{см}^2$ - атмосферная глубина детектора, и параметры определенные моделированием CoREAS:

$A = -1864 \text{ г}/\text{см}^2$, $B = -566 \text{ г}/\text{см}^2$, $\bar{b} = 0.005 \text{ м}^{-1}$.

Для кросс калибровки установок Тунка-133 и Tunka-Rex использовано 91 событие, оставшееся после отбора событий по качественным признакам. Преимущество черенковского метода регистрации ШАЛ, используемого в установке Тунка-133, заключается в возможности восстановления энергии с точностью 15% и глубины максимума ливня $25 \text{ г}/\text{см}^2$ [16]. 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. 9 а). Можно увидеть, что существует сильная корреляция между этими величинами и точность восстановления энергии с помощью радиометода достигает 20%, что не хуже, чем в других современных экспериментах по регистрации космических лучей.

Восстановление глубины максимума ливня связано с определением наклона ФПР. Плотный детектор имеет хорошую чувствительность к глубине максимума ливня, но восстановление по данным установки с более редким расположением антенн, таким как в 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 $\sigma_{X_{max}}$ фитирования параметра a_1 определяет погрешность восстановления X_{max} . В данном анализе после установления $\sigma_{X_{max}} < 50$ г / см² осталось 25 событий. На рис. 9 б. показана корреляция между глубиной максимума ливня, восстановленной установкой Тунка-133 и Tunka-Rex для первого и второго года измерений.

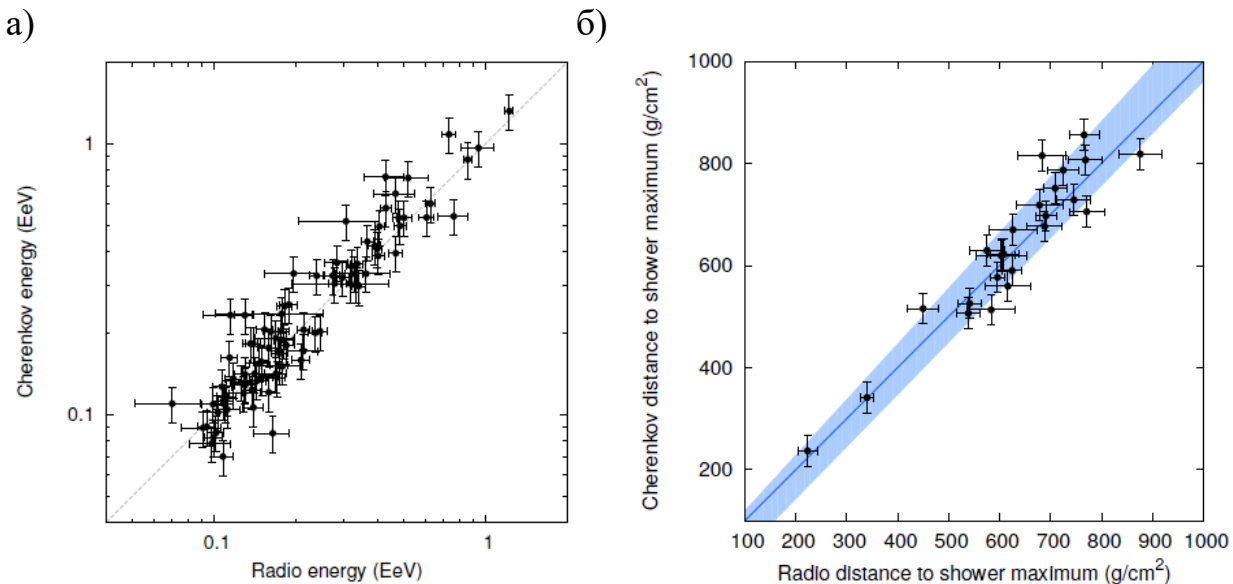


Рис. 9. а) Корреляция между энергией ШАЛ, восстановленной установкой Тунка-133 и нормированной амплитудой радиоизлучения, б) корреляция между глубиной максимума ливня, восстановленной установкой Тунка-133 и Tunka-Rex для первого года измерений.

В заключении изложены основные результаты 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 на-

правленности 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 радиостановке Tunka-Rex и черенковской установке Тунка-133. Разработан метод оптимизации функции пространственного распределения, позволяющий увеличить статистику для событий с энергиями близкими к порогу регистрации.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. 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.- Moscow, Russia.- 2012.- Journal of Physics: Conference Series 409 (2103) 012076 <http://iopscience.iop.org/1742-6596/409/1/012076>
2. 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>
3. 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>
4. Hiller R. The Tunka-Rex antenna station / R. Hiller, **Y. Kazarina** for the Tunka-Rex collaboration // in Proc. of the 33-rd ICRC.- Rio de Janeiro, Brazil.- 2013.- 1278 <http://arxiv.org/abs/1308.0917>
5. 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 http://www.ikp.kit.edu/tunka-rex/downloads/TunkaRex_ICATPP_2013.pdf
6. **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
7. 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
8. 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

9. **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.

10. 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

11. **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>

12. **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.

13. 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.

14. **Казарина Ю.А.** Результаты обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex / **Ю.А. Казарина** (за коллаборацию Tunka-Rex) // Тезисы XIX БШФФ “Физические процессы в космосе и околоземной среде”.- Иркутск, 2015.- С. 14.

15. **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>

16. 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>

17. 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.

<http://arxiv.org/pdf/1508.06211v2.pdf>

Список цитируемой литературы

1. Зацепин Г.Т. Верхний предел спектра космических лучей / Г.Т. Зацепин, В.А. Кузьмин // ЖЭТФ.- 1966.- Т. 4., № 3.- С. 114–117.

2. Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей / В.Л. Гинзбург // Журнал "Успехи физических наук".- 1996.- Т. 166., № 2.- С. 169 – 183.
3. Бережко Е.Г. Ускорение космических лучей ударными волнами / Е.Г. Бережко, Г. Ф. Крымский // Журнал "УФН".- 1988.- Т. 154, №1.- С. 49 – 91.
4. Урысон А. В. Космические лучи сверхвысоких энергий: возможное происхождение и спектр / А. В. Урысон // ЖЭТФ.- 1998.-Т. 113, № 1.-С.12-20.
5. Аскарьян Г.А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное радиоизлучение от него / Г.А. Аскарьян // ЖЭТФ. -1961. -Т. 41. -С. 616-618.
6. Kahn F. D. Radiation from cosmic ray air showers / F. D. Kahn, I. Lerche // Proc. Phys. Soc.-1966.- Sect. A 289. 206.
7. Allan H.R. Radio Pulses from Extensive Air Showers / H. R. Allan and R. W. Clay // Nature .- V. 227.- 1970.- P. 1116–1118.
8. 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.
9. 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_____
10. 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.
11. 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.
12. Ardouin D. Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment / D. Ardouin et al. (CODALEMA Collaboration) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.- 2005.- V. 555.- P. 148–163.
13. LOPES collaboration. Reconstruction of the energy and depth of maximum of cosmic-ray air showers from LOPES radio measurements / LOPES collaboration // Phys.Rev.- D90 (6).-2014.- 062001.- arXiv:1408.2346
14. 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.
15. 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.
16. 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

