

## РЕГИСТРАЦИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ШАЛ НА УСТАНОВКЕ TUNKA-REX

Ю.А. Казарина

(за коллаборацию Тунка)

## DETECTION OF EAS RADIO EMISSION AT THE TUNKA-REX EXPERIMENT

Y.A. Kazarina

(on behalf of the Tunka collaboration)

Статья посвящена исследованию радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), которые образуются в результате взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с атмосферой Земли. Приведены первые результаты практической отработки методик восстановления параметров первичных космических лучей, зарегистрированных по радиоизлучению ШАЛ на установке Tunka-Rex.

In this article it is considered the question of the radio emission of extensive air showers (EAS), which are generated by the interaction of ultra-high-energy cosmic rays with the Earth's atmosphere. Also it is presented some first results of Tunka-Rex including a discussion of the methods applied for recovering the parameters of the primary cosmic rays in terms of the EAS radio emission by using the Tunka-Rex experiment.

### Введение

Одной из актуальных проблем современной астрофизики является интерпретация наблюдаемых особенностей спектра космических лучей сверхвысоких энергий и выяснение вопроса об их галактическом или внегалактическом происхождении. «Классические» первичные космические лучи – это ядра и ионизированные атомы, ускоренные до высоких энергий как в пределах нашей Галактики, так и вне ее [Царев, 2004]. Загадкой остается и механизм ускорения космических лучей до столь больших энергий. Изучают космические лучи высоких энергий, регистрируя продукты их взаимодействия с атмосферой. В результате такого взаимодействия развиваются так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ), включающие ядерный и электромагнитный каскады. При высоких энергиях в ШАЛ могут присутствовать практически все элементарные частицы, но до поверхности Земли доходят преимущественно электроны, мюоны,  $\gamma$ -кванты, нейтрино, черенковское и флуоресцентное излучение и радиоизлучение [Буднев, 2005].

В настоящее время в Тункинской долине (Республика Бурятия) на территории черенковской установки «Тунка-133» развернута установка Tunka-Rex (Тунка-радиорасширение), регистрирующая радиоизлучение ШАЛ. Измерения проводятся совместно с установкой «Тунка-133», которая регистрирует черенковское излучение, генерируемое теми же атмосферными ливнями. Совместные измерения радиоизлучения и черенковского света предоставляют уникальную возможность для кросскалибровки этих двух calorиметрических методов исследования.

### Радиоизлучение ШАЛ

Преимущества радиометода проявляются при его применении при ультравысоких энергиях, поскольку мощность когерентного радиосигнала возрастает квадратично с увеличением энергии ливня и при высоких энергиях мощность излучения в радиодиапазоне превосходит мощность излучения в оптической области. Также достоинствами регистрации радиоизлучения ШАЛ являются дешевизна радиоантенн, простота их эксплуатации и независимость регистрации ливней

от времени суток и погодных условий, существенных при регистрации оптического излучения (только в ясные безлунные ночи) [Константинов, 2009].

Существует несколько видов генерации радиоизлучения, таких как черенковское излучение, геосинхротронное, геоэлектрическое, радиоэмиссия, вызванная ионизационными электронами в поле атмосферного электричества, переходное излучение избыточными электронами ливня, переходное излучение квазистатического диполя ШАЛ и др. [Царев, 2004]. Основными механизмами радиоизлучения являются геомагнитный механизм, заключающийся в отклонении заряженных частиц в магнитном поле Земли, что дает основной вклад в излучение, и механизм Аскарьяна (черенковское радиоизлучение), который заключается в изменении количества заряженных частиц, что составляет примерно 10 % от общего вклада в излучение (в зависимости от геометрии) [Kostunin, 2013].

### Радиоустановка Tunka-Rex

Установка Tunka-Rex начала свою работу 8 октября 2012 г. В настоящий момент на площади 1 км<sup>2</sup> расположено 20 антенных станций, расстояние между антеннами около 200 м (в будущем количество антенн увеличится).

Основной целью установки Tunka-Rex является определение точности восстановления энергии и атмосферной глубины максимума ливня  $X_{\max}$ . С этой целью Tunka-Rex расположена рядом с установкой «Тунка-133», которая детектирует черенковский свет от космических лучей энергетического диапазона  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ. Данные с обоих детекторов записываются в объединенную систему сбора данных, при этом события, зарегистрированные на оптической установке «Тунка-133», являются триггерными для эксперимента Tunka-Rex. Эта система автоматически обеспечивает одновременное измерение сигнала ШАЛ, что позволяет делать кросскалибровку обоих методов. В частности, с помощью радиоизмерений мы можем проверить точность восстановления энергии и положения  $X_{\max}$  по данным Tunka-Rex, сравнивая их с черенковскими данными [Kostunin, 2013] (см. рис. 1).

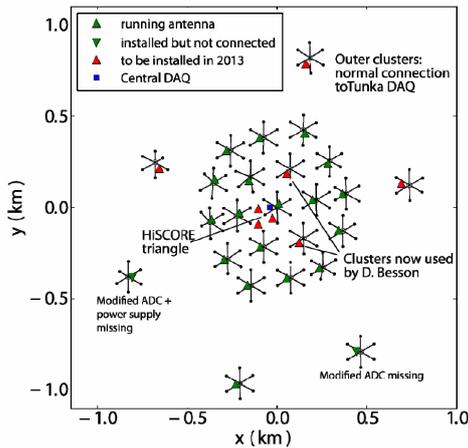


Рис. 1. Схема расположения антенн установки Tunka-Rex.

Каждая антенна установки Tunka-Rex состоит из двух ортогональных друг другу антенн типа SALLA. Диаграмма направленности антенн такого типа мало зависит от подстилающей поверхности, кроме того, они недороги в изготовлении. Рабочий частотный диапазон Tunka-Rex 30–80 МГц, скорость оцифровки 200 МГц, длина временной дорожки 5 мкс. Так как триггером Tunka-Rex является черенковская установка «Тунка-133», то измерения, соответственно, ведутся только в ясные безлунные ночи в период с октября по апрель.

Антенная станция имеет два канала (измеряются две поляризации радиосигнала). Каждый канал состоит из антенны, предусилителя (24 дБ), кабеля (30 м) и фильтра-усилителя (32 дБ). Усиленный в нужной частотной области сигнал подается на входы АЦП системы сбора данных установки «Тунка-133» [Hiller, 2013].

### Первые результаты Tunka-Rex

Для первичного анализа использовались только качественные события, т. е. те, которые имеют отношение сигнал/шум >4 как минимум на трех антеннах. Кроме того, ставилось условие, чтобы направления прихода, восстановленные по радиосигналу, расходились с направлениями, восстановленными черенковским методом, не более чем на 5°. Это ограничение исключает сигналы помех, которые могут также иметь отношение сигнал/шум >4 (рис. 2).

Общее время наблюдений за прошедший сезон составило 450 ч. За это время было восстановлено 146 событий, из них 62 события с зенитным углом <50° и 84 события с углом >50°. Разделение на большие и малые углы обусловлено тем, что черенковская установка «Тунка-133» имеет ограниченный угол зрения и дает хорошую оценку энергии и  $X_{\max}$  только для ливней с зенитным углом <50°, т. е. это те события, которые могут использоваться для кросскалибровки обоих методов (рис. 3).

Обработка данных за первый сезон измерений дала следующие результаты: эффективность детектирования в радиоустановке возрастает с увеличением геомагнитного угла, т. е. угла между осью ливня и геомагнитным полем, а также с увеличением зенитного угла. Таким образом, восстановленные по данным Tunka-Rex сильно наклонные ливни могут

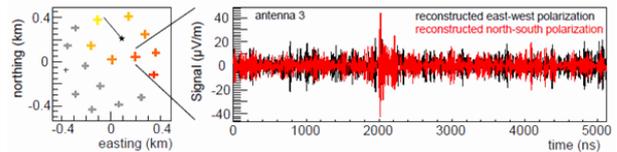


Рис. 2. Пример события Tunka-Rex. Слева – распределение сигнала по установке. Размер крестов указывает мощность сигнала, цвет – время прихода, линия и звезда – направление прихода оси ШАЛ. Справа – пример восстановленного электрического поля, ожидаемый радиоимпульс находится в районе 2000 нс.

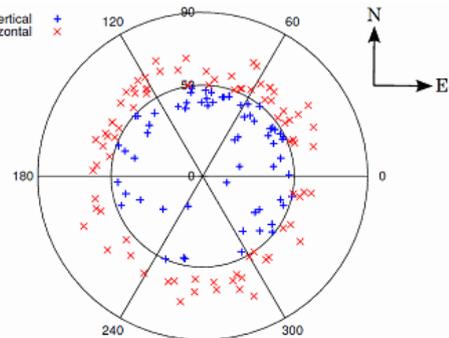


Рис. 3. Угловая диаграмма восстановленных направлений прихода ШАЛ.

быть использованы для увеличения общей статистики эксперимента «Тунка» при высоких энергиях [Shroeder, 2013].

### Заключение

Установка Tunka-Rex, начав работу осенью в 2012 г., успешно регистрирует радиоизлучение ШАЛ с энергиями более  $10^{17}$  эВ совместно с установкой «Тунка-133», таким образом совместный эксперимент «Тунка» обеспечивает кросскалибровку двух методов регистрации ШАЛ. Измерения показали, что радиоизлучение возникает в основном за счет геомагнитного отклонения электронов и позитронов в ливне, что подтверждается характером зависимости эффективности детектора от энергии и направления прихода ливня.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Царев В.А. Регистрация космических лучей ультравысоких энергий радиометодом // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35, № 1. С. 186–247.

Буднев Н.М. Экспериментальные исследования первичных космических лучей высоких и сверхвысоких энергий на установке «Тунка» // VIII Конференция молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства»: БШФФ-2005. Иркутск, 2005. С. 3–8.

Константинов А.А. Радиоизлучение широких атмосферных ливней как метод регистрации космических лучей сверхвысоких энергий М., 2009. 20 с.

Kostunin D. (for the Tunka Collaboration). Tunka-Rex: Status and Results of the First Measurements // Proc. RICAP-13. 2013.

Hiller R. (for the Tunka Collaboration). The Tunka-Rex antenna station Results // Proc. 33<sup>rd</sup> ICRC, Rio de Janeiro, Brazil. 2013. P. 1278.

Shroeder F. (for the Tunka Collaboration). Tunka Radio Extension (Tunka-Rex): Status and First Results // Proc. 33<sup>rd</sup> ICRC, Rio de Janeiro, Brazil. 2013. P. 0452.

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия