

09;12
©1994

РАДИОДЕТЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ СУПЕРВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

П.И.Голубничий, А.Д.Филоненко

Исследование возможности детектирования широких атмосферных ливней (ШАЛ) посредством регистрации радиоизлучения связано с поиском способа контролирования больших площадей относительно недорогими установками. В целом такой способ детектирования уступает, на наш взгляд, традиционному методу с помощью сцинтилляционных счетчиков. Однако существуют некоторые вопросы физики космических лучей, решение которых не требует высокого разрешения структуры ливней. Это, например, задачи, связанные с определением энергетического спектра, с вопросом о существовании его верхней границы, с поиском анизотропии космических лучей супервысокой энергии ($W_0 \geq 10^{20}$ эВ) и т. д.

Решение этих задач с помощью сцинтилляционных детекторов для частиц, первоначальная энергия которых превышает $W_0 = 10^{20}$ эВ, в настоящее время является практически нереальным. Прежде всего это связано с чрезвычайно высокой ценой такой установки, обусловленной необходимостью покрытия огромных площадей (> 1000 км²) большим количеством отдельных ячеек детектора, чрезвычайно длинными линиями коммуникаций, с проблемой профилактики этой установки и т. д. Именно поэтому при решении ряда задач физики космических лучей метод радиодетектирования является, на наш взгляд, более предпочтительным, так как практически не связан ни с одной из вышеназванных технических проблем.

Известно, что рабочими гипотезами, связанными с природой излучения ШАЛ, являются механизм черенковского излучения и геомагнитные механизмы. Максимум интенсивности излучения в этом случае приходится на область частот 30–50 МГц. При прохождении ливня через атмосферу площадь участка Земли, облучаемая ШАЛ, не превышает 1 км². Диаграмма излучения является не только направленная, но и имеет достаточно сложную структуру вследствие явления интерференции (среднеквадратичный радиус ливня ≈ 100 м, а длина волны излучения $\lambda < 10$ м).

Поэтому даже на площади 1 км^2 необходимо установить достаточно большое количество антенн, чтобы для данного ливня сначала рассчитать диаграмму направленности и интенсивность излучения, а затем с помощью этих данных восстановить параметры ШАЛ (ориентация, энергия). Совершенно очевидно, что для площади $\approx 1000 \text{ км}^2$ техническое решение этой задачи является настолько же сложным, как и построение сцинтилляционного детектора таких же размеров.

Поэтому радиодетектор может быть реализован только при наличии достаточно интенсивного излучения ШАЛ с широкой диаграммой направленности. По нашему мнению, таким требованиям удовлетворяет низкочастотный компонент радиоизлучения, вызванный δ -электронами широкого атмосферного ливня. Проведенные нами [1] оценки показывают, что напряженность поля, создаваемого таким механизмом излучения, составляет величину, например, на расстоянии 10 км, равную $\approx 140 \text{ мкВ/мМГц}$, для энергии первоначальной частицы 10^{20} эВ . Диаграмма направленности такого излучения совпадает с диаграммой излучения вибратора Герца, для которого величина напряженности в точке наблюдения пропорциональна $\sin \varphi$, где φ — угол между осью диполя и направлением на наблюдателя. Кроме этого, показано, что величина напряженности поля пропорциональна энергии первоначальной частицы и максимум ее лежит в области 50–100 кГц.

Для осуществления проекта детектора ШАЛ с помощью низкочастотного компонента радиоизлучения необходимо провести предварительный эксперимент, связанный с уточнением характеристик радиоимпульса и отработкой программы отбора сигналов. Особенность такого эксперимента будет состоять в том, что при его проведении необходимо вынужденно отказаться от применения сцинтилляционного детектора для создания мастер-сигнала, упрощающего систему отбора событий. Суть такого эксперимента состоит в следующем. На участке поверхности с площадью $\approx 200\text{--}300 \text{ км}^2$ (что соответствует приблизительно частице в месяц для $W_0 \approx 10^{20} \text{ эВ}$ [4]) на расстоянии 10–15 км друг от друга располагаются два-три приемных пункта, связанных с одним из них (назовем его для определенности центральным) односторонним каналом высокочастотной радиосвязи. Каждый из приемных пунктов оборудован тремя, например, рамочными антеннами со взаимно перпендикулярными плоскостями. Выход каждой из антенн подключается к усилителю с полосовым фильтром в области частот 50–100 кГц с достаточно крутым срезом на верхней частоте для надежного блокирования сигналов радиовещательных станций. После усиления сигнал должен быть проана-

лизирован с целью отбора его по амплитуде, ожидаемой длительности (15–10 мкс) и частоте повторения. Для отбора событий по признаку пространственного расположения ШАЛ центральный приемный пункт должен быть оснащен микро-ЭВМ для локации источника сигнала. Например, если для каждого пункта ввести сферическую систему координат так, чтобы лучи, от которых отсчитываются одноименные углы, были взаимно параллельны, а положение оси ШАЛ характеризовать углами φ и θ аналогично расположенной системой координат с полюсом в точке пересечения оси ливня с поверхностью Земли, то все величины φ_i, θ_i, R_i ($i = 1, 2, 3$), θ, φ можно связать системой из 12 уравнений [2].

Направление на ШАЛ в каждом приемном пункте φ_i, θ_i могут быть использованы для отбора нужных событий. Например, при близких значениях $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ или $R_1, R_2, R_3 \rightarrow \infty$ сигнал должен быть исключен из рассмотрения. Оставшиеся сигналы с параметрами, удовлетворяющими требованиям по амплитуде, длительности, частоте следования и пространственному расположению, должны быть засчитаны как полезные.

Одним из существенных препятствий, которое стоит на пути проведения такого эксперимента, является наличие значительных атмосферных помех в этой области радиодиапазона. Известно, что наиболее интенсивным источником этих помех являются грозы в экваториальной области Земли. По мере удаления к полярным районам интенсивность атмосферных помех ослабевает. Например (см. [3]), в средней полосе европейской части бывшего СССР минимальный уровень атмосферных помех на частоте 0.1 МГц составляет величину 0.1 мкВ для полосы частот 1 кГц. Следовательно, для упомянутой выше полосы частот $\Delta\nu = 50$ кГц напряженность поля помех имеет величину ~ 0.7 мкВ/м. Сравнив эту величину с оценкой напряженности поля, создаваемого ШАЛ [1] в этой полосе частот для энергий ε_0 первоначальных частиц 10^{20} эВ (7 мкВ/м), приходим к выводу, что “стартовой” энергией для такого детектора из трех ячеек будет величина энергии частицы $\approx 10^{20}$ эВ.

Тот факт, что величина атмосферных помех в приполярных районах значительно меньше, в частности, для побережья Антарктиды на 20–30 дБ по сравнению со средней полосой (см., например, [3,5]), позволяет надеяться, что чувствительность такого детектора в принципе может быть увеличена на порядок.

Внутренние шумы усилителя, приведенные ко входу, можно оценить с помощью формулы Найквиста $U = (4kTR\Delta\nu)^{0.5} \approx 1$ мкВ, $\Delta\nu = 50$ кГц, $R = 10^3$ Ом, $T = 300$ К. Поэтому, чтобы сигнал существенно превышал величину

шума, достаточно выбрать антенну с действующей высотой несколько метров, что не будет составлять сложную техническую проблему.

Если ШАЛ ударяется о Землю, то этот процесс, как показано в [1], сопровождается достаточно интенсивным излучением в средневолновом диапазоне (1–2 мГц), и если грунт в этом районе окажется хорошим проводником, то очевидно, что главный лепесток диаграммы излучения будет направлен под углом к горизонту и по этой причине возможность использования такого излучения в целях детектирования вызывает сомнение. В обратном случае, т. е. когда грунт является изолятором (например, лед, песок и т. д.), максимум излучения будет направлен вдоль поверхности и оно может быть использовано как дополняющее информацию, полученную на низких частотах.

В заключение следует отметить, что два из трех приемных пунктов не требуют значительного энергообеспечения и могут достаточно длительное время работать на автономном питании без присутствия оператора.

Список литературы

- [1] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 12. С. 57–61.
- [2] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. О возможности детектирования широких атмосферных ливней космического излучения сверхвысоких энергий с помощью низкочастотного компонента радиоизлучения. Деп. в ГНТВ Украины 06.04.94 № 631 — Ук94.
- [3] Бобров Н.В., Максимов Г.В., Мичурин В.И., Николаев Д.П. Радиоприемные устройства. М., 1971. С. 495.
- [4] Гинзбург В.Л. // УФН. 1993. Т. 163. В. 7. С. 45–50.
- [5] Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М., 1972. 333 с.

Восточно-украинский
государственный университет
Луганск

Поступило в Редакцию
15 сентября 1994 г.