

09;12

## Регистрация космических лучей высокой энергии посредством наблюдения отраженного от ионосферы радиосигнала

© А.Д. Филоненко

Восточноукраинский государственный университет

Поступило в Редакцию 19 августа 1997 г.

В окончательной редакции 8 апреля 1998 г.

Показана возможность регистрации космических лучей (КЛ) супервысоких энергий ( $> 10^{22}$  eV) на поверхности Антарктиды с приемлемой для наблюдения частотой событий. Такая возможность обусловлена наличием ряда благоприятных обстоятельств: 1) большая площадь материка ( $10^6 - 10^7$  km<sup>2</sup>); 2) подавляющая часть поверхности льда расположена на высоте 3–4 км; 3) низкий уровень атмосферных помех вследствие максимальной удаленности от экваториального грозового пояса; 4) эффективная полоса частотного спектра радиоимпульса (0–7 МГц) не превышает значения максимально применяемых частот. Оценки интенсивности электромагнитного импульса сделаны на основании ранее опубликованных работ [1–6].

Изучение космических лучей (КЛ) с энергией  $W_0 > 10^{20}$  eV связано с решением ряда фундаментальных задач, однако за всю историю исследования число зарегистрированных событий с такой энергией едва превышает десяток. Это связано с чрезвычайно слабой интенсивностью КЛ в этом диапазоне энергий (для  $W_0 \geq 10^{20}$  eV — приблизительно одно событие на километр квадратный за столетие).

Естественно, что такая обстановка породила проекты-монстры детекторов с рабочей площадью более тысячи квадратных километров (например, "ШАЛ-1000" или "Оже проект" с площадью 6000 km<sup>2</sup> и стоимостью около 100 млн дол.). Однако даже такие гиганты только на порядок поднимут "потолок" энергий. В этой связи остаются актуальными поиски новых методов детектирования КЛ супервысоких энергий. Одним из таких методов, имеющих, по мнению автора, перспективы, является метод радиодетектирования, не связанный с наличием магнитного поля Земли. Оценки показывают [1–4], что электрон-фотонный ливень, вызванный космической частицей высокой энергии, генериру-

ет мощный радиоимпульс с широкой пространственной диаграммой излучения, основной вклад в амплитуду которого дает когерентное излучение  $\delta$ -электронов этого ливня. Минимальная длина волны  $\lambda_{\min}$  такого когерентного излучения должна быть не менее, чем удвоенная длина пути электрон-фотонного ливня в веществе. Кроме этого, было обнаружено, что частицы с энергией порядка  $10^{22}$ – $10^{23}$  eV, проходя через поверхность Луны, вызывают настолько мощный радиоимпульс, что его можно уверенно зарегистрировать с помощью радиотелескопа на Земле [5].

Если в этом случае приемные антенны расположены на искусственных спутниках Луны, то оказывается возможным не только регистрировать сам факт существования космических частиц с энергией  $10^{20}$ – $10^{23}$  eV, но и определять направление их прихода [6]. Однако кажется целесообразным провести предварительные эксперименты — не отправлять в космос, например, как в [5]. Оказывается, существует еще одна такая возможность, и связана она с тем обстоятельством, что подавляющая часть ледового покрытия Антарктиды находится на высоте около 3.5 km над уровнем моря. Легко убедиться, что в таких обстоятельствах путь, пройденный в атмосфере вертикальным ливнем с первоначальной энергией  $W_0 = 10^{22}$ – $10^{23}$  eV, составляет всего около 18  $t$ -единиц (вся атмосфера до уровня моря 28  $t$ -единиц), а максимум ливня с такой энергией должен находиться на глубине 35  $t$ -единиц, т.е. приблизительно на 2 km ниже уровня моря (см., например, [7]). Другими словами, у поверхности льда даже наклонный ливень только начинает развиваться ( $S \approx 0.7$ ) и число частиц на этой стадии приблизительно на порядок меньше, чем в максимуме, а эффективная часть ливня (с точки зрения количества частиц в нем) будет полностью проходить через лед. Эти оценки остаются справедливыми даже при угле наклона ливня  $30^\circ$ . Элементарные оценки показывают также, что длина пути ливня  $L_s$ , на которой число частиц его меняется в несколько раз, составляет приблизительно 20  $t$ -единиц или  $L_s \approx 7.5$  m для льда. Если не учитывать близость поверхности льда к источнику ( $h \sim \lambda$ ) излучения, то протяженность электромагнитного импульса  $L$ , вышедшего в атмосферу (например, для вертикальной лавины), будет определяться зависимостью  $L = L_s(\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \alpha} + 1)$ , где  $\varepsilon \approx 3$  — диэлектрическая проницаемость льда [8], а  $\alpha$  — угол между направлением выхода и вертикалью для некоторого среднего угла  $\alpha = 45^\circ$  величина  $L = 20$  m. Это значит, что когерентный прием можно осуществлять на длинах волн  $\lambda_{\min} > 2L > 40$  m.

Так как на частотах порядка нескольких мегагерц тангенс угла потерь для льда  $\operatorname{tg} \delta \approx 0.2$  [8], то показатель поглощения  $\varkappa = [\frac{\varepsilon}{2}(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{\frac{1}{2}} - 1]^{\frac{1}{2}}$  равен приблизительно 0.18 и убывание амплитуды волны в  $e$  раз происходит на длине пути  $l \geq c/\omega\varkappa \approx 25$  м. Это существенно больше, чем  $L_s$ , и, следовательно, поглощением излучения во льду на этом пути можно пренебречь. Пространственная диаграмма этого излучения близка по своей форме к диаграмме диполя Герца [4] и поэтому с достаточно высокой интенсивностью волны будут излучаться не только под низкими, но и под высокими углами к горизонту. Это обстоятельство создает благоприятные условия для регистрации отраженной от ионосферы почти без потерь волны практически на всей площади материка. Остальная часть излучения будет поглощена льдом (см. выше) и с точки зрения возможности регистрации частиц не представляет интереса.

Если первоначальная частица имеет энергию  $W_0 \sim 10^{23}$  eV, то напряженность поля электромагнитного импульса, вызванного электрон-фотонной лавиной на расстоянии 1000 км будет иметь величину около  $10^3$  мкВ/мМГц. Это очень высокая напряженность поля и для сравнения достаточно указать, что, согласно данным нескольких исследовательских групп [9], напряженность зарегистрированного в опытах электрического поля радиоимпульса, вызванного взаимодействием ШАЛ с магнитным полем Земли, составляла всего около 10 мкВ/мМГц в области частот ( $\sim 30$  МГц) с максимальной интенсивностью излучения. При проведении такого эксперимента, связанного с регистрацией отраженного от ионосферы радиосигнала, нужно учитывать ее состояние в этом географическом районе и прогнозируемые значения максимально применяемых частот  $\lambda_c$ .

Напряженность поля радиосигнала от космических частиц с энергиями порядка  $W_0 \geq 10^{22}$  eV в десять раз меньше при том же удалении от источника. Однако на этой площади полный поток КЛ с такой энергией предположительно больше на полтора-два порядка, чем для диапазона энергий  $W_0 \sim 10^{23}$  eV. Это позволяет почти без изменения частоты событий (по отношению к  $W_0 = 10^{23}$  eV) уменьшить контролируемую площадь во столько же раз, что, в свою очередь, приведет к необходимости регистрировать радиоимпульсы, направление излучения которых составит существенно больший угол с горизонтом. В этом случае  $\lambda_c$  понизится. Однако даже в августе  $\lambda_c$  на этих широтах составляет 3–4 МГц (т.е. для вертикального падения радиоволны на ионосферу (см., например, [10])).

Кроме этого, нужно отметить в заключение, что способ регистрации КЛ сверхвысоких энергий посредством приема отраженного от ионосферы радиосигнала имеет такой же недостаток, как и с помощью радиотелескопа [5], т. е. отсутствие возможности установить направление прихода космической частицы из-за неконтролируемого поворота плоскости поляризации радиоволны вследствие ее взаимодействия с плазмой в магнитном поле Земли. Этот недостаток связан с нестабильностью условий в верхних слоях атмосферы и, по-видимому, не может быть восполнен. Однако оба этих способа могут дать представление, например, об энергетическом спектре КЛ в этом диапазоне энергий, что представляет не только полезную научную информацию, но и сведения, необходимые для планирования экспериментов по детектированию КЛ сверхвысоких энергий.

## 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. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 23. С. 59–62.
- [3] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Укр. физ. журн. 1996. Т. 41. В. 7–8. С. 696–699.
- [4] Голубничий П.И., Филоненко А.Д., Яковлев В.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. В. 12. С. 115–118.
- [5] Филоненко А.Д. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. В. 3.
- [6] Филоненко А.Д. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 10. С. 57–62.
- [7] Беленький С.З. Лавинные процессы в космических лучах. М.: Гостехиздат, 1948. 243 с.
- [8] Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматгиз, 1962. 248 с.
- [9] Атрашкевич В.Б., Веденев О.В., Аллан Х.Р. и др. // Ядерная физика. 1978. Т. 29. В. 3. С. 712–716.
- [10] Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.