

УДК 537.591.15

РЕГИСТРАЦИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ, ОТРАЖЕННОГО ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

В. А. Царев, В. А. Чечин

Обсуждаются различные аспекты проблемы регистрации радиоимпульсов от ШАЛ ультравысоких энергий, отраженных от поверхности земли.

В работах [1 – 8] обсуждается возможность регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) ультравысоких энергий с помощью радиоприемных устройств, расположенных на спутниках и аэростатах. При этом рассматривается детектирование "прямого" радиосигнала, генерированного теми ШАЛ, направления которых близки к касательным к поверхности земли. В настоящей работе мы рассматриваем возможность приема также сигнала, отраженного от поверхности земли. Заметим, что аналогичная идея регистрации ШАЛ по вспышкам черенковского света, отраженного от гладкой заснеженной поверхности, была впервые высказана А. Е. Чудаковым [9]. В настоящее время она положена в основу проекта эксперимента "Сфера", который готовится к реализации группой из НИИЯФ МГУ и ФИАН [10]. Радиоизлучение ШАЛ сосредоточено в основном в диапазоне метровых и декаметровых волн [4]. Поэтому заранее очевидно, что условия, благоприятные для отражения, в этом случае будут иметь место для значительно более обширных регионов земной поверхности, чем это имеет место для отражения черенковского света.

Есть целый ряд причин, вызывающих интерес к отраженному сигналу.

Во-первых, детектирование отраженного сигнала позволяет увеличить эффективную площадь регистрации ШАЛ. Это особенно важно для ШАЛ ультравысоких энергий, поток которых чрезвычайно мал (порядка $10^{-2} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Напомним, что благодаря большой дальности распространения радиоволн, радиометод позволяет просматривать очень большую площадь поверхности атмосферы [5, 6]. Так, при регистрации

со спутника, находящегося на высоте $H = 2000$ км, можно просматривать площадь до $S \approx 2 \cdot 10^7$ км², а при регистрации с аэростата с высоты $H = 30$ км эта площадь составляет $S \approx 4.3 \cdot 10^6$ км². Однако при приеме прямого сигнала (из-за острой угловой направленности радиоизлучения вдоль оси ШАЛ) детектируются только те ШАЛ, направление которых близко к касательному к поверхности Земли [5]. В результате проецирования на это направление, эффективная площадь регистрации уменьшается примерно на порядок. При приеме, наряду с прямым сигналом, также отраженного сигнала область допустимых для регистрации углов падения ШАЛ увеличивается примерно вдвое, что эквивалентно удвоению эффективной площади регистрации.

Во-вторых, при приеме отраженного сигнала возникает возможность регистрировать не только ШАЛ, близкие к горизонту, но и те, которые приходят под большими углами скольжения. Развитие таких ливней происходит в более плотных слоях атмосферы, и максимум их излучения находится в области больших частот, чем в случае горизонтальных ШАЛ. Это обстоятельство существенно при регистрации со спутников, поскольку высокочастотное излучение в меньшей степени испытывает ионосферные потери.

В-третьих, возникает возможность одновременного приема (со спутников и аэростатов) как сигнала, испущенного вдоль оси ШАЛ (углы излучения $\alpha \ll 1$) и затем отраженного от земли, так и прямого сигнала, испущенного под большим углом ($\alpha \approx 0.1 - 1$) к оси ШАЛ. Это, во-первых, позволяет в принципе использовать метод совпадений и таким образом увеличить надежность отделения полезного сигнала от фона. Во-вторых, это дает возможность получить более полную информацию о продольном развитии ШАЛ [8]. Характерные значения частоты излучения ν_1 падают с ростом α , так что при больших углах излучение лежит в основном в области сотен кГц–МГц (вместо десятков МГц при $\alpha \ll 1$). При этих частотах величина поля электромагнитной волны от ШАЛ ультравысоких энергий на расстояниях в десятки – сотни километров достаточно велика и составляет десятки мкВ/м · МГц.

Наконец, знание характеристик отраженного сигнала важно даже в том случае, когда предполагается регистрировать только прямое излучение от горизонтальных ШАЛ. В этом случае ограниченная точность определения направления прихода радиоволны может привести к примешиванию отраженного сигнала к измеряемому прямому сигналу, что необходимо учитывать при анализе результатов измерений.

Необходимо подчеркнуть, что интерпретация экспериментов с регистрацией отраженных сигналов и извлечение из них сведений о характеристиках ШАЛ в общем случае

является значительно более сложной задачей, чем при регистрации прямых сигналов. Это связано, прежде всего, с очень разнообразными (и, вообще говоря, не всегда известными) свойствами отражающей поверхности и зависимостью отражения от поляризации падающей волны. Всестороннее исследование проблемы распространения радиоволн вдоль неоднородных поверхностей было выполнено в классических работах Е. Л. Фейнберга (см. [11]). Основываясь на этих результатах, мы обсудим здесь некоторые аспекты проблемы регистрации отраженного сигнала.

Предположим, что область поверхности, существенная для рассеяния [11], имеет неровности, случайно распределенные по размерам, с характерной высотой h . Как и в оптике, отражение при наличии неровностей считается "зеркальным", если в направлении зеркального отражения геометрическая разность хода лучей Δx , испущенных "вторичными источниками" из различных участков препятствия, много меньше, чем длина волны λ . Обычно берут $\Delta x < \lambda/8$, что соответствует разности фаз $\pi/4$. Отсюда следует известный критерий Релея для зеркального отражения:

$$h \leq \lambda/16 \sin \Theta,$$

где Θ – угол скольжения. Таким образом, высоты допустимых неровностей для зеркального отражения растут с ростом λ и уменьшением Θ . В частности, для отражения радиоволн, направление которых близко к горизонтальному, отражение можно считать зеркальным для значительной части поверхности земли. Так, если принять, что средняя высота волн на водной поверхности и неровностей на равнинных участках не превышает, скажем, 5 м, то получим, что для $\lambda \approx 10$ м критерий Релея выполняется для углов скольжения $\Theta < 8^\circ$. При использовании привязного аэростата, поднятого над достаточно ровным (например, сглаженным снеговым покровом) участком земной поверхности, отражение можно считать зеркальным во всем диапазоне углов Θ от 0 до $\pi/2$.

В противоположном случае, когда критерий Релея не выполнен, рассеяние будет иметь изотропный характер и подчиняться закону Ламберта

$$I = I_0 \cos \varphi,$$

где I_0 и I – интенсивности падающей и отраженной волн и φ – угол между волновым вектором отраженной волны и нормалью к "усредненной" отражающей поверхности.

Предположим (как это обычно делается при оценках отражения радиоволн), что участок поверхности, существенный для отражения, совпадает с первой зоной Френеля. Пусть источник излучения (т.е. ШАЛ) находится в точке M на высоте H_M над

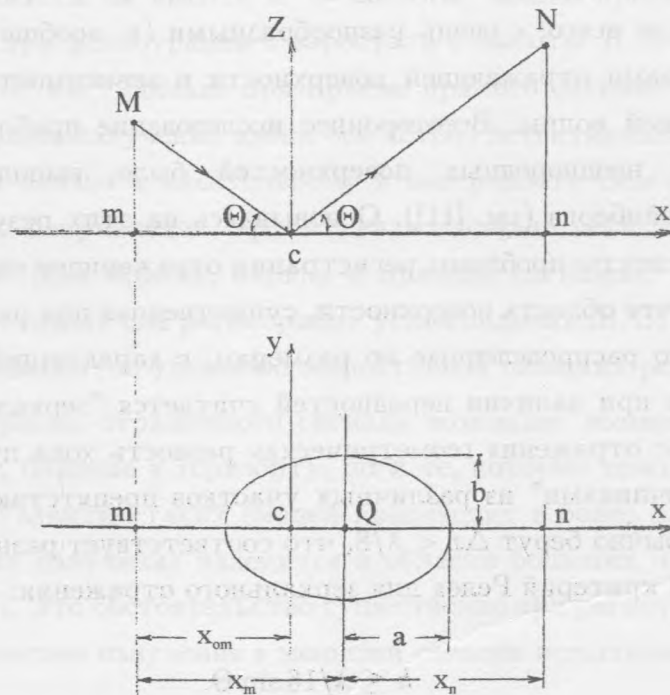


Рис. 1. Участок поверхности, существенный для отражения. M – источник излучения ШАЛ; N – приемник. Эллипс – первая зона Френеля.

поверхностью (для горизонтальных ШАЛ ультравысоких энергий типичные значения $H_M \approx 30$ км [4]), а приемник – в точке N на высоте H_N (см. рис. 1). Тогда первая зона Френеля представляет собой эллипс с полуосями a и b и центром в точке Q , расположенной на расстоянии x от точки m . Используя результаты [11, 12], определим параметры a и b и площадь зоны $S = \pi ab$. При регистрации со спутника ($H_N \gg H_M$):

$$a = b / \sin \Theta; \quad b = (\lambda H_M / \sin \Theta)^{1/2}; \quad x_{0m} = H_M / \operatorname{tg} \Theta; \quad x_m \approx x_{0m}.$$

Пусть, для примера, $\lambda = 10$ м, $H_M = 30$ км, $\sin \Theta = 0.1$ ($\Theta = 6^\circ$). Тогда $x_m \approx 30$ км, $a = 17$ км, $b = 1.7$ км, $S = 90$ км². При регистрации с высотного аэростата с $H_M \approx H_N$:

$$a = b / \sin \Theta; \quad b = (\lambda H_M / 2 \sin \Theta)^{1/2}.$$

При $H_M = 30$ км, $x_m \approx 300$ км, $a = 12$ км, $b = 1.2$ км, $S = 45$ км². Наконец, при регистрации с привязного аэростата, полагая $H_N = 500$ м, найдем $x_m \approx 5$ км, $a = 2.24$ км, $b = 0.224$ км и $S = 1.58$ км².

Рассмотрим теперь влияние электрических свойств отражающей поверхности на коэффициент отражения [11, 12]. Для длин волн $\lambda > 3$ м морская вода может рассматриваться приближенно как идеально проводящая среда. Для интересующего нас интервала метровых и декаметровых волн (точнее, при $4 \text{ м} < \lambda < 400 \text{ м}$) сухая земля является слабопроводящей средой (проводимость $\sigma \approx 10^{-3} \text{ Ом/м}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 10$). Как известно, при отражении от идеально проводящей поверхности коэффициент отражения по модулю равен единице, т.е. вся энергия падающей волны отражается. Для полупроводящей среды отражение сопровождается потерей энергии. Оценка коэффициента отражения R осложняется зависимостью R от поляризации падающей волны. Это обстоятельство в значительной степени затрудняет интерпретацию экспериментов с регистрацией отраженного сигнала. Приведем некоторые приближенные соотношения [11], применимые к рассматриваемой здесь задаче.

При отражении волны с горизонтальной поляризацией от плоской поверхности полупроводящей среды коэффициент отражения можно вычислить с помощью следующего соотношения:

$$R_{гор} = (\sin \Theta - d) / (\sin \Theta + d).$$

Здесь $d = (\epsilon' - \cos^2 \Theta)^{1/2}$; $\epsilon' = \epsilon - 60\lambda\sigma = \epsilon - i\eta$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды (участка поверхности, существенного для отражения); σ – проводимость, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды. При отражении от хорошо проводящей среды ($60\lambda\sigma \gg \epsilon$) при всех углах скольжения Θ $R_{гор} \approx -1$. При отражении волны с вертикальной поляризацией от полупроводящей среды

$$R_{верт} = (\epsilon' \sin \Theta - d) / (\epsilon' \sin \Theta + d).$$

Для хорошо проводящей среды при всех Θ имеем $R_{верт} \approx 1$.

В случае, если отражение происходит от проводящей поверхности с хаотически распределенными неровностями с типичными размерами h , удовлетворяющими критерию Релея, и с числом таких неровностей на единицу площади ρ , эффективная величина ϵ' , входящая в формулы для коэффициента отражения, может быть найдена с помощью соотношения [11]

$$(\epsilon')^{1/2} = -i / (2\pi k h^3 \rho) = -i\chi,$$

где χ – показатель поглощения и $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Будем предполагать, что при анализе данных эксперимента, зная местоположение приемника и направление прихода сигнала, можно определить условия отражения. Тогда, используя приведенные выше соображения и результаты [11, 12], можно вычислить коэффициенты отражения и найти характеристики первоначальной волны.

Авторы признательны Ю. К. Калинину и Е. Л. Фейнбергу за полезные обсуждения рассматриваемых в статье вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пичхадзе К. М., Сысоев В. Г., Царев В. А., Чечин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 12, 9 (2000).
- [2] Царев В. А., Чечин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 42 (2001).
- [3] Chechin V. A., Polukhina N. G., and Tsarev V. A. Proc. X Lomonosov Conference on Elementary Particles, Moscow, August 23 – 29, 2001.
- [4] Царев В. А., Чечин В. А. ДАН, **383**, 486 (2002).
- [5] Царев В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11, 26 (2001).
- [6] Царев В. А., Чечин В. А. ДАН, **388**, N 2 (2002) (в печати).
- [7] Котельников К. А., Полухина Н. Г., Фейнберг Е. Л. и др. Известия АН, сер. физическая, **66**, N 11, 1638 (2002).
- [8] Царев В. А., Чечин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11, (2002).
- [9] Чудаков А. Е. Труды конференции по космическим лучам. с. 69, Якутск, 1972.
- [10] Antonov R. A., Chernov D. V., Kuzmichev L. A., et al. Proc. 27th ICRC, 2001, p. 828.
- [11] Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М., Наука, Физматлит, 1999.
- [12] Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М., Советское радио, 1972.

Поступила в редакцию 28 декабря 2002 г.