

03:04:09

## Обратное рассеяние электромагнитной волны на облаке радиоактивных элементов в воздухе, испускающих альфа-частицы

© В.А. Полянский

Военно-морской институт радиоэлектроники,  
198903 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 19 августа 1998 г.)

Предложена трековая модель рассеяния электромагнитной волны на облаке радиоактивных элементов в воздухе. Получены соотношения, позволяющие оценить эффективную площадь рассеяния облака радиоактивных элементов, испускающих альфа-частицы, как функцию активности облака и длины электромагнитной волны. Приведено значение оценки активности облака, которое может быть обнаружено типовым радиолокатором.

### Введение

Выброс облака радиоактивных элементов в воздух сопровождается их радиоактивным распадом, что в свою очередь приводит к появлению альфа-, бета- или гамма-излучений. Соотношение интенсивностей этих излучений зависит от состава радиоактивных элементов в облаке, но каждое из них вызывает ионизацию воздуха, что приводит к изменению диэлектрических свойств воздуха в облаке. Последнее обстоятельство создает предпосылки обнаружения облака радиоактивных элементов в воздухе, например, по изменению характеристик отраженных от облака или проходящих через него электромагнитных волн. В данной работе решается задача оценки возможности обнаружения отраженной от облака радиоактивных элементов в воздухе электромагнитной волны (радиолокационное обнаружение) только по альфа-излучению. В литературе достаточно подробно рассмотрена задача радиолокационного обнаружения ионизированных областей в атмосфере [1,2], при этом рассматривается сплошная ионизированная область. Облако радиоактивных элементов отличается от сплошной среды тем, что оно представляет собой совокупность дискретных упорядоченных структур — треков. В связи с этим в работе предложена модель рассеяния электромагнитной волны на облаке радиоактивных элементов в воздухе как рассеяние на множестве треков. Затем на основе этой модели поставленная в данной работе задача сводится к рассмотрению возможности радиолокационного обнаружения совокупности множества плазменных цилиндров.

### Модель облака радиоактивных элементов в воздухе, испускающих альфа-частицы

При альфа-излучении радиоактивные элементы испускают альфа-частицы, движение которых в воздухе приводит к образованию на их пути возбужденных и заряженных частиц (пар свободных зарядов — электронов

и ионов). Если энергия, которую при своем движении альфа-частица передает электронам, достаточно большая, то такие электроны (называемые  $\delta$ -электронами) в свою очередь также ионизируют и возбуждают молекулы воздуха до тех пор, пока их энергия не упадет ниже некоторой величины  $E$ . В результате в окрестности траектории альфа-частицы образуется область, содержащая электроны с энергией больше тепловой энергии, но меньше энергии  $E$ , необходимой для ионизации воздуха. При этом в указанную область входят как первичные электроны, образованные в результате воздействия на молекулы воздуха альфа-частицы, так и вторичные электроны, образованные в результате воздействия  $\delta$ -электронов. Первичные электроны составляют от общего количества электронов, образованных при альфа-излучении, приблизительно одну треть [3]. Таким образом, в окрестности траектории движения альфа-частицы возникают свободные (так называемые горячие) носители заряда, энергия которых меньше энергии ионизации, но больше тепловой, и связанные возбужденные состояния. Затем горячие носители термализируются, т.е. снижают свою температуру до тепловой. Область в окрестности траектории движения альфа-частицы, включающая первичные и вторичные заряды, называется ее треком [4]. Время от образования трека до момента термализации будем считать временем существования трека [4].

Итак, трек альфа-частиц можно рассматривать как цилиндр, состоящий из пар первичных и вторичных свободных зарядов (электронов и ионов). При этом радиус цилиндра будет определяться длиной пробега  $\delta$ -электронов, которая зависит от их энергии и плотности воздуха. Радиус трека  $r$  полагают равным  $0.84R$ , где  $R$  — максимальный пробег  $\delta$ -электрона [3]. Длина цилиндра (трека) зависит от энергии альфа-частицы, лежащей в интервале 4–10 MeV [4], определяемой видом радиоактивного элемента. В воздухе при нормальных условиях длина трека альфа-частицы находится в пределах  $\sim 3$ –8 см [5].

Количество пар  $N$  свободных зарядов на единицу длины трека, образуемых при радиоактивном излучении,

называется удельной ионизацией. В воздухе при нормальных условиях треки альфа-частиц характеризуются величиной  $N$ , равной  $5 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$  [5]. В дальнейшем будем использовать нижнее значение  $N$ .

Как было уже отмечено, радиус трека определяется длиной максимального пробега  $\delta$ -электрона, которая зависит от его энергии. Энергия  $\delta$ -электрона  $E_\delta$  определяется выражением  $E_\delta E_0 \cos^2 \varphi$ , где  $E_0$  — максимальная энергия  $\delta$ -электрона,  $\varphi$  — угол между направлением вылета  $\delta$ -электрона из трека и направлением движения альфа-частицы. Величина  $E_0$  зависит от энергии альфа-частицы. При изменении энергии альфа-частицы от 4 до 10 MeV значение энергии  $E_0$  меняется от 2.2 до 5.3 KeV [5]. При этом, поскольку на образование одной пары зарядов затрачивается энергия 35 eV [6],  $\delta$ -электрон образует 30–70 пар.

Ионизация и возбуждение молекул воздуха  $\delta$ -электроном происходит в цилиндре, радиус которого (радиус захвата) увеличивается с увеличением энергии  $\delta$ -электрона. Принимая, что в радиусе захвата [6] происходит 3–7 актов ионизации, будем полагать, что  $\delta$ -электрону требуется в соответствующее число раз меньшее количество столкновений с атомами воздуха для их ионизации. Тогда  $\delta$ -электрон пробегает расстояние  $R$ , равное десяти длинам свободного пробега. Поскольку длина свободного пробега электрона в газах при нормальных условиях составляет  $\sim 10^{-5} \text{ см}$  [4], то  $R = 10^{-4} \text{ см}$  и  $r = 0.84 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ .

Плотность зарядов  $\rho$  в треке может быть определена по формуле

$$\rho = \frac{N}{\pi r^2}.$$

Следовательно, в треке альфа-частицы плотность зарядов составляет величину не менее  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Если в треке выполняется условие [4]  $6.9\pi \sqrt{T/N} < 1$ , где  $T$  — температура воздуха в К, то в нем образуется плазма. Легко видеть, что при нормальных условиях в треке альфа-частицы указанное условие выполняется, т.е. в треке образуется плазма.

Таким образом, трек альфа-частицы представляет собой плазменный цилиндр длиной в несколько сантиметров (3–8 см) с радиусом  $\sim 10^{-4} \text{ см}$ . Будем полагать ориентацию в пространстве этого цилиндра случайной.

Как было указано выше, время жизни трека равно времени термализации электронов. В газах это время составляет в среднем  $4 \cdot 10^7 \text{ с}$  [4]. Будем полагать, что в течение этого времени плотность зарядов в треке постоянна и равна  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Итак, облако радиоактивных элементов в воздухе, излучающих альфа-частицы, представляет собой совокупность плазменных цилиндров, хаотически ориентированных в пространстве и имеющих ограниченное время жизни.

## Оценка эффективной площади рассеяния облака радиоактивных элементов в воздухе по их альфа-излучению

Рассмотрим сначала эффективную площадь рассеяния (ЭПР) одного трека как плазменного цилиндра. Определение характеристик рассеянной плазменным цилиндром электромагнитной волны существенно упрощается, если его можно считать проводником [7]. Будем, как обычно, считать цилиндр проводником в переменном поле частоты  $f$ , если выполняется неравенство  $\alpha = \gamma/2\pi f \varepsilon \gg 1$ , где  $\gamma$  — удельная электропроводность цилиндра,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость цилиндра. Для плазмы с учетом столкновений в ней частиц [7] после преобразования получаем

$$\alpha = \frac{\omega^2 p \nu}{\omega(\omega^2 + \nu^2 - \omega^2 p)},$$

где  $\omega_p = 2\pi\sqrt{81N}$  — плазменная частота,  $\nu$  — среднее число соударений электрона с нейтральными молекулами и ионами в единицу времени,  $\omega 2\pi f$ .

При определении  $\nu$  для трека альфа-частицы будем учитывать только столкновения электрона с нейтральными молекулами, поскольку удельная плотность последних  $N_0 = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  много больше удельной плотности ионов  $N_+ \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Тогда, принимая во внимание только упругое рассеяние электронов, можно определить величину  $\nu$  по формуле [1]

$$\nu = 8.3 \cdot 10^5 \pi a^2 \sqrt{T} N_0,$$

где  $a$  — радиус молекулы (см),  $T$  — температура воздуха (К).

Полагая  $a \approx 10^{-8} \text{ см}$  [4] при нормальных условиях получаем  $\nu \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$ . Величина  $\omega_p$  в нашем случае равна  $\omega_p \approx 8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ . Принимая  $f = 3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ , получим  $\alpha \approx 15 \gg 1$  т.е. при  $f \leq 3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$  трек (плазменный цилиндр) можно считать проводником. Поэтому в дальнейшем при  $f \leq 3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$  будем приближенно оценивать значение ЭПР трека как ЭПР проводящего цилиндра, радиус которого  $r \ll \lambda$ , где  $\lambda$  — длина облучающей электромагнитной волны, длина цилиндра  $L$  сравнима с  $\lambda$ , а  $r \ll L$ . Тогда среднее значение ЭПР  $\sigma_1$  случайно ориентированного проводящего цилиндра при обратном рассеянии (при одинаковых поляризациях приемной и передающей антенн) будет составлять приближенно  $(0.02-0.2)\lambda^2$  в зависимости от  $L$  [8]. Например, нижнее значение  $\sigma_1$  при  $\lambda = 10 \text{ см}$  составляет  $\sigma_1 = 2 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

При активности облака радиоактивных элементов по альфа-излучению  $Q$  (Ки) образуется  $3.7 \cdot 10^{10} Q$  треков в секунду. В этом случае с учетом времени жизни трека в облаке в среднем постоянно присутствует  $\sim 1.5 \cdot 10^4 Q$  треков. Тогда ЭПР  $\sigma$  облака радиоактивных элементов

при активности альфа-излучения  $Q$  (Ки) будет составлять  $\sigma = 1.5 \cdot 10^4 Q \sigma_1$ . Например, при активности альфа-излучения облака  $10^{-3}$  Ки его ЭПР при  $\lambda = 10$  см составляет величину около  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Радиолокационная цель с такой ЭПР может быть обнаружена типовым радиолокатором (полагается, что объем выброса не выходит за объем элемента разрешения радиолокатора) [9].

## Заключение

В работе предложена модель рассеяния электромагнитной волны на облаке радиоактивных элементов в воздухе, испускающих альфа-частицы. Проведенная на основе этой модели оценка ЭПР облака радиоактивных элементов показывает практическую возможность его радиолокационного обнаружения по альфа-излучению при активности последнего по крайней мере в тысячные доли кюри.

## Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
- [2] Боярчук К.А., Ляхов Г.А., Суязов Н.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 2. С. 76–82.
- [3] Калашикова В.И., Козодоев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966. 408 с.
- [4] Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 404 с.
- [5] Глестон С. Атом, атомное ядро, атомная энергия. М.: ИЛ, 1961. 648 с.
- [6] Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы. М.: Атомиздат, 1977. 136 с.
- [7] Radar Cross Section Handbook / Ed. G.T. Ruck. New York, 1970. Vol. 1,2. 949 p.
- [8] Van Vleck J.H., Blanch F., Hamermech M. // J. Appl. Phys. 1947. Vol. 18. P. 274–294.
- [9] Радиолокационное устройство / Под ред. В.В. Григорина-Рябова. М.: Сов. радио, 1970. 370 с.