

Нелинейные явления в вистлерах

Сивоконь В.П., Санников Д.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Россия

vsivokon@mail.ru, vilgusi@mail.ru, nina@ikir.ru, drug@ikir.ru

Наличие нелинейных эффектов в магнитосфере обнаружено достаточно давно [1,2]. При исследовании описанных в экспериментах явлений, использовались мощные наземные ОНЧ передатчики. Нелинейные эффекты при этом проявляются в виде модуляции амплитуды низкочастотного сигнала, разного рода природными процессами, такими как ионно-звуковые волны, движение резонансных частиц и т.д. То есть в качестве несущего колебания выступает искусственное электромагнитное излучение, а модулирующей функцией является природное явление. Возможен иной подход: в качестве несущего колебания используется природное явление, в данном случае вистлер, а модулирующим сигналом является искусственное электромагнитное излучение. В этом случае для определения параметров магнитосферной плазмы допустимо использование метода Фиджера [3], ранее применявшегося для исследования свойств ионосферы. В нём используются две электромагнитные волны, одна из которых является пробной, а вторая, возмущающая, создаёт область модифицированной плазмы. Варьируя время и длительность излучений можно получить различные варианты взаимодействия волн, и тем самым определить свойства плазмы в области взаимодействия. В предлагаемом подходе есть ряд преимуществ:

- Вистлер широко используется для исследований свойств магнитосферной плазмы, в том числе в ряде международных программ, таких как AWESOME, AWDANet.
- Теория взаимодействия электромагнитных излучений применительно к методу Фиджера хорошо проработана в работах [4-6].
- Нет необходимости в генерации пробных волн, таковыми выступают естественные явления – вистлеры.

Электромагнитное излучение способное сыграть роль возмущающей волны должно отвечать определённым требованиям. Для однозначной идентификации в спектре вистлера, оно должно иметь частоту ниже максимальной частоты наблюдаемых вистлеров. Для Камчатки оптимальным диапазоном частот возмущающей волны является полоса 500-3000 Гц. В работе [2] показано, что для проявления модуляционных эффектов на силовой трубке $L=2,5$ (в нашем случае $L=2,3$) длительность излучения должна в несколько раз превышать 0,1 сек. Напряжённость поля такого излучения должна превышать величину характерного “плазменного поля” в магнитосфере [4], которое по нашим оценкам проведённым на основе [6], должна составлять несколько $\mu\text{В/м}$. Такими характеристиками обладают электромагнитные излучения, использующиеся в экспериментах по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов. Для их генерации используются нагревные стенды [7], спутниковые ОНЧ излучатели [8] и наземные ОНЧ передатчики [9].

Электромагнитное излучение в таких экспериментах может формироваться в виде немодулированных излучений длительность и частота которого соответствует названным выше требованиям [10]. Поскольку длительности вистлера и возмущающего импульса невелики, их взаимодействие, вероятнее всего, должно происходить по принципу взаимодействия коротких немодулированных импульсов [6]. В ряде работ показано, что траектория низкочастотного электромагнитного излучения в магнитосфере может проходить через несколько силовых оболочек и зависит от его частоты [8]. Следовательно, есть возможность взаимодействия вистлеров на силовой оболочке Камчатки с электромагнитным излучением формируемым при проведении экспериментов по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов.

В июле 2011 года с целью проверки предлагаемого подхода был проведён анализ записей осуществлённых на ОНЧ регистраторе ИКИР ДВО РАН (<http://ru.www.ikir.ru>). Регистратор - это комплекс по сбору и хранению данных, поступающих с двух ортогонально расположенных магнитных антенн, сориентированных по сторонам света, и одной штыревой электрической. Таким образом накапливаются данные о вариациях трёх компонент естественного электромагнитного поля в волноводе земля - ионосфера: магнитных по направлениям восток-запад и север-юг, и вертикальной электрической.

Анализ в ряде случаев выявил нестандартную форму вистлеров. В качестве примера (рис. 1) показаны фрагменты спектрограмм записи 21 июля 2011 года. Под индексом а) приводится вистлер зафиксированный в 00:02:50 UT и под индексом б) в 00:04:23 UT.

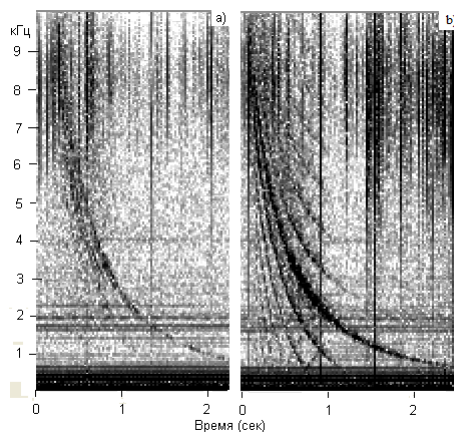


Рис. 1. Вариации формы вистлеров 21 июля 2011 года

Для исключения возможной нелинейности регистрирующей аппаратуры проверили частотное распределение этих линий. Оказалось, что линии не являются кратными по частоте и не могут быть гармониками, обусловленными нелинейностью приёмного тракта. Из спектра видно, рис.2, что одна из линий, собственно вистлер, значительно больше остальных, которые располагаются симметрично относительно неё на частотах кратных $\approx 1,1$ кГц. Вероятнее всего, имеет место амплитудная модуляция вистлера гармониками немодулированного импульса. Из рисунка 1 видно, что модуляция продолжается не всё время существования вистлера. Если предположить, что вистлер и возмущающий импульс проходят через область магнитосферы одновременно, тогда длительность импульса равна времени от начала вистлера до момента окончания модуляции, т.е. около 1 секунды. Глубина модуляции:

$$M = \frac{2U_{\text{бок}}}{U_{\text{нес}}}$$

где $U_{\text{бок}}$ – амплитуда "боковой" частоты, $U_{\text{нес}}$ – амплитуда "несущей" частоты.

Глубину модуляции можно определить, исходя из параметров записи, измерив уровень "несущей" (вистлер) и " боковой" частот.

Результаты обработки записей показали, что глубина модуляции не превышает 20%. Если обратиться к результатам полученными в [6] для глубины модуляции, то

$$M = D_0[1 - \exp(\delta\vartheta_{e0}t_1)] \exp\{-\delta\vartheta_{e0}(t_2 - t_{10} - t_1)\}$$

$$D_0 = \frac{e^2 E_1^2(0) \omega_2^2 - \vartheta_{e0}^2}{6m\delta\vartheta_{e0} \omega_2^2 + \vartheta_{e0}^2} \left(\frac{d\vartheta_e}{dT_e} \right)_{T_{e0}}$$

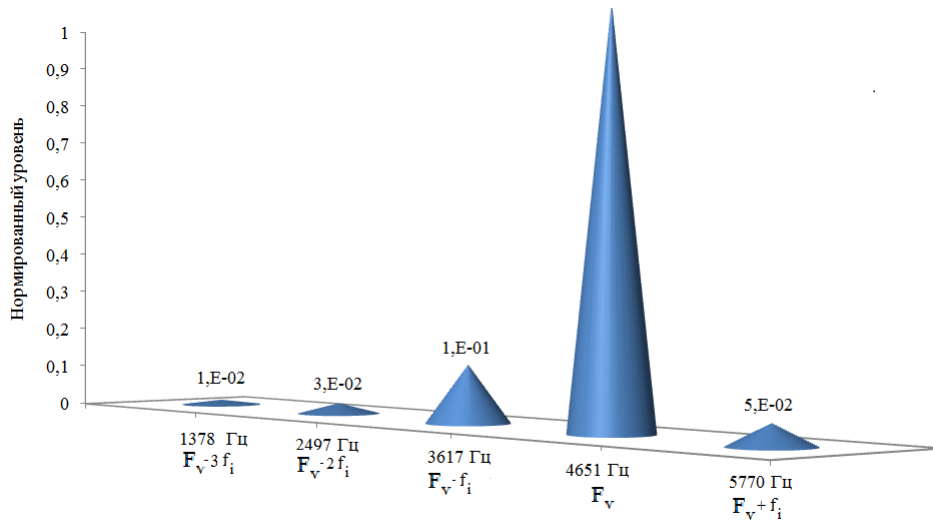


Рис. 2. Нормированное распределение спектра

где e, m – заряд и масса электрона, δ – средняя доля энергии, теряемой электроном при одном соударении, ϑ_{e0} – эффективная частота соударения электронов в отсутствие возмущающего импульса, t_1, t_{10} – время излучения и длительность возмущающего импульса, t_2 – время излучения зондирующего импульса, T_{e0} – электронная температура в отсутствие возмущающего импульса, $E_1(0)$ – амплитуда возмущающего импульса, ω_2 – частота пробной волны, в нашем случае вистлера. Из рисунка 1 следует, что в области, где происходит взаимодействие вистлера и возмущающего импульса, $t_1 = t_2$, а длительность t_{10} можно получить из спектрограммы записи. Тогда

$$M = \frac{e^2 E_1^2(0) \omega_2^2 - \vartheta_{e0}^2}{6m\delta\vartheta_{e0} \omega_2^2 + \vartheta_{e0}^2} \left(\frac{d\vartheta_e}{dT_e} \right)_{T_{e0}} [1 - \exp 2(\delta\vartheta_{e0}t_1)] \exp\{\delta\vartheta_{e0}t_{10}\}$$

При анализе записей, хорошо видна частотная зависимость (рис.2) и временные вариации (рис.3) глубины модуляции, которые определяются свойствами плазмы.

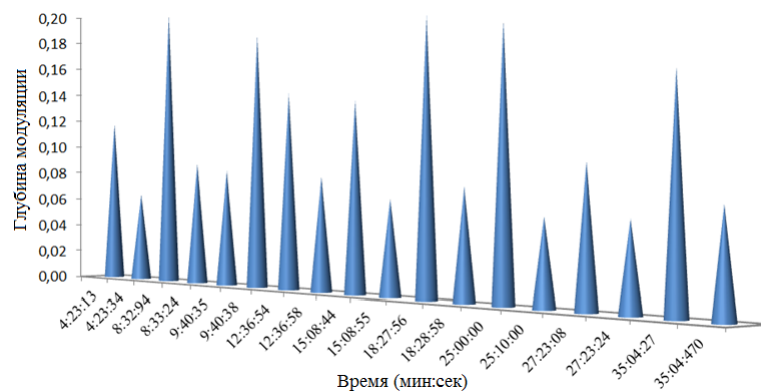


Рис. 3. Вариации глубины модуляции в наблюдениях 21 июля 2011 года.

Следовательно, исходя из анализа полученных значений и вариаций глубины модуляции можно определить параметры плазмы магнитосферы в области взаимодействия, вероятнее всего на вершине силовой трубки.

Доклад подготовлен в рамках проекта “Обнаружение изменений климатообразующих характеристик основе мониторинга вариаций геофизических полей” программы Президиума РАН №4, координатор академик Лаверов Н.П.

Литература

1. *Лихтер Я.И., Молчанов О.А., Чмырёв В.М.* Модуляция спектра и амплитуда низкочастотного сигнала в магнитосферной плазме. // Письма в ЖЭТФ, Т. 14. С.475-479. 1971.
2. *Будько Н.И., Карпман В.И., Похотелов О.А.* О нелинейных эффектах при распространении монохроматических ОНЧ волн (геликонов) в магнитосфере. // Письма в ЖЭТФ. Т. 14. С. 469-471. 1971.
3. *Fejer J.A.* The Absorption of Short Radio Waves in the Ionospheric D and E Regions, J. Atmos. Solar-Ter. Phys. 23,260 (1961).
4. *Гинзбург В.Л., Гуревич А.В.* Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле // Успехи физических наук. Т.LXX. Вып.2. 1960. С.201-246.
5. *Гинзбург В.Л., Гуревич А.В.* Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле // Успехи физических наук. Т.LXX, Вып.3, 1960. С.393-428.
6. *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере – М.: Наука, 1973. 272 с.
7. *Golkowski M., Inan U.S., Cohen M.B.* Cross modulation of whistler mode and HF waves above the HAARP ionospheric heater. J.Geophys. Res. Lett, V. 36. L15103. 2009.
8. *Kulkarni P., Inan U.S., Bell T.F.* Energetic electron precipitation induced by spacebased VLF transmitters J. Geophys. Res.. V. 113.2008.
9. *Ковражский Р.А., Могилевский М.Н., Боске Ж.М. и др.* Письма в ЖЭТФ 38,332. 1983.
10. *Goikowski M., Inan U.S., Cohen M. B., Gibby A.R.* Journal of geophysical research 115, 71 (2010).

Nonlinear phenomena in whistlers

Sivokon' V.P., Sannikov D.V., Cherneva N.V., Druzhin G.I.

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia

In the result of experimental observations, carried out at "Paratunka" observatory (53.02N, 158.65E; L=2.3), synchronized with HAARP complex (62.30N, 145.30W; L=4.2), an atypical form of whistlers was determined. This form is likely to be determined by amplitude modulation of electromagnetic pulse of about 1 second long with the filling frequency of about 1.1 kHz, applied in the experiments on energetic particle controlled precipitation from the Earth radiation belts. An approach to estimate plasma parameter variations in the magnetosphere on the basis of the discovered effect was suggested.