

УДК 621.396

В. П. Сивоконь¹, А. В. Кубышкин², В. В. Богданов¹, Н. В. Чернева¹,
И. В. Агранат¹, А. С. Сероветников¹

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Вистлеры как возможные индикаторы активных воздействий на ионосферу

В результате экспериментальных наблюдений на полуострове Камчатка обнаружена нестандартная форма вистлеров (свистящих атмосфериков), обусловленная амплитудной модуляцией внешним электромагнитным импульсом длительностью около 1 секунды с частотой заполнения 1,1 кГц. В этой связи авторами выдвинута гипотеза о возможности использования вистлеров в качестве индикатора активных воздействий на ионосферу. Так, информация о параметрах искусственного нагрева ионосферы может быть восстановлена по огибающей вистлера, в то время как частотная дисперсия содержит данные об эволюции электронной концентрации.

Ключевые слова: вистлеры, прогрев ионосферы, амплитудная модуляция, частотная дисперсия.

Нелинейные эффекты в магнитосфере обнаружены достаточно давно [1, 2]. При использовании мощных наземных низкочастотных передатчиков наблюдаются модуляции амплитуды 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.

Можно предположить и обратную ситуацию, когда в качестве несущего колебания выступает природное явление, в данном случае вистлер, а модулирующим сигналом является искусственное электромагнитное излучение. В этом случае для определения параметров плазмы может быть использован метод Феджера [3], в котором обычно генерируются две электромагнитные волны. Одна из них 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 работе [6] рассмотрены три возможных варианта такого взаимодействия:

- возмущающий импульс идёт вслед волне и может взаимодействовать только с отражённой от ионосферы волной;
- волна идёт вслед за возмущающим импульсом, воздействию подвергается только прямая волна;
- возмущающий импульс взаимодействует как с прямой, так и с отражённой от ионосферы волной.

1. Формирование рабочей гипотезы

Предполагаем, что для целей мониторинга активных воздействий на ионосферу может быть реализован второй вариант или ситуация, когда волна и возмущающий импульс могут проходить через область практически одновременно. При совпадении времени наблюдений и проведения активных экспериментов есть вероятность обнаружить взаимодействие естественных вистлеров с искусственно сформированным электромагнитным излучением. В этом случае

- нет необходимости в генерации пробных волн, таковыми выступают естественные явления;

- информация об эффективности нагревных экспериментов содержится в огибающей вистлера, частотная дисперсия которого одновременно содержит данные об электронной концентрации;

- сопоставление вариаций параметров кроссмодуляции с электронной концентрацией позволяет оценить эффективность регулируемого сброса энергичных частиц в целом.

Проявление модулированного вистлера на силовых трубках с параметрами Мак-Илвейна, отличающимися от параметров трубки, на которой происходит воздействие, позволяет оценить пространственный масштаб регулируемого сброса энергичных частиц из радиационных поясов.

Теория взаимодействия электромагнитных излучений применительно к методу Фиджера достаточно хорошо проработана [4–6], что также можно считать преимуществом предлагаемого метода мониторинга нагревных экспериментов.

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. Оптимальным для Камчатки диапазоном частот возмущающей волны является полоса 500–3000 Гц [2]. Можно предположить, что для проявления модуляционных эффектов на силовой трубке $L = 2, 3$ длительность излучения должна в несколько раз превышать 0,1 с. Напряжённость поля такого излучения должна превышать величину характерного «плазменного поля» в магнитосфере, составляющего несколько микровольт на метр [4]. Такими характеристиками обладают, в частности, электромагнитные излучения, используемые в экспериментах по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов [6]. Для их генерации используются нагревные стенды [7], спутниковые излучатели [8] и наземные передатчики [9].

Известно [10], что электромагнитное излучение в таких экспериментах может формироваться в виде немодулированных излучений, длительность и частота которых соответствует вышеприведенным требованиям. 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 (см, например, [8]). Известно также, что генерация низкочастотного излучения происходит за счёт модуляции электроджета [7]. Электроджет представляет собой излучающую преимущественно в магнитосферу систему, причем излучение не строго локализовано вдоль силовой линии магнитного поля Земли, на которой происходит воздействие на ионосферу [11]. Следовательно, есть возможность взаимодействия вистлеров на силовой оболочке Камчатки с электромагнитным излучением, формируемым при проведении экспериментов по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов.

2. Некоторые сведения об экспериментальной проверке гипотезы в ИКИР ДВО РАН

С целью проверки предлагаемого подхода был проведён анализ записей, осуществлённых на ОНЧ-регистраторе Института космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН (<http://ru.www.ikir.ru>), который в ряде случаев выявил нестандартную форму вистлеров. В качестве примера на 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.

Для исключения возможной нелинейности регистрирующей аппаратуры было проверено 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 интенсивнее остальных, которые располагаются симметрично относительно неё на частотах, кратных

примерно 1,1 кГц. Вероятнее всего, имеет место амплитудная модуляция вистлера гармониками немодулированного импульса.

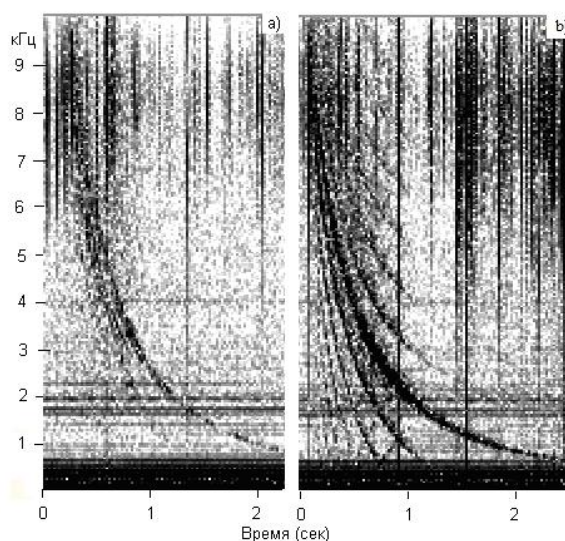


Рис. 1. Наблюдаемые вариации формы вистлеров

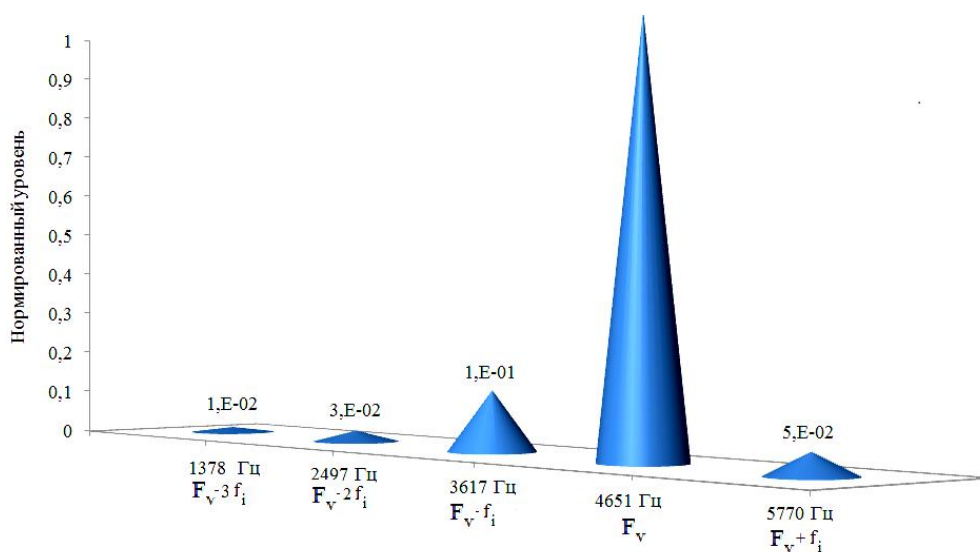


Рис. 2. Нормированное распределение спектра излучения

Анализируя данные рисунка 1, можно сделать вывод, 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. Особо следует отметить, что подобное взаимодействие возможно на высотах, где частота столкновений электронов достаточно велика.

Глубину модуляции можно определить исходя из параметров записи, измерив уровень «несущей» (вистлер) и «боковой» частот:

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

Результаты обработки имеющегося массива записей показали, что глубина модуляции

не превышает 20%. Если обратиться к результатам, полученным в [6] для глубины модуляции, то

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

где предэкспоненциальный множитель равен

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

Здесь 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.

По данным рисунка 1 в области, где происходит взаимодействие вистлера и возмущающего импульса, $t_1 = t_2$, а длительность t_{10} можно восстановить по спектрограмме записи.

Тогда

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

что и может служить показателем эффективности нагретых экспериментов различного типа, проводимых в магнетосфере.

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

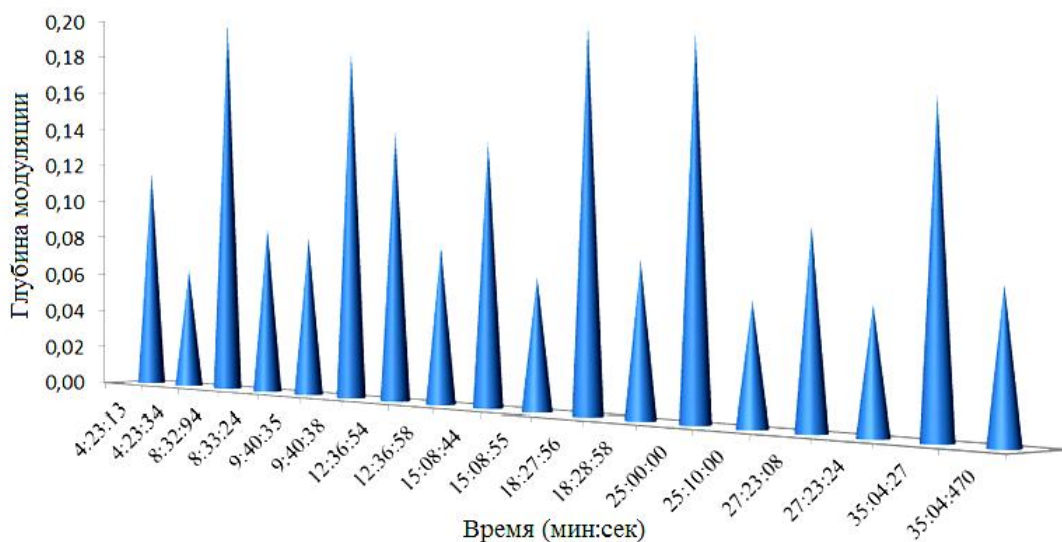


Рис. 3. Вариации глубины модуляции в наблюдениях 21 июля 2011 года

3. Заключение

Таким образом, исходя из анализа полученных значений и вариаций глубины модуляции возможно определить параметры плазмы магнитосферы в области взаимодействия. В рассмотренном примере она находится, вероятнее всего, на нисходящем участке траектории вистлера.

Принципиальные ограничения предложенного метода диагностики (или, более скромно, *индикации*) нагретых экспериментов связаны с недостаточной степенью синхронизации наших измерений и самих активных воздействий, поскольку:

- рефракция электромагнитного излучения, сформированного на силовой трубке Аляски, на силовую трубку Камчатки во многом носит случайный характер;
- интенсивность формируемого в нагретых экспериментах электромагнитного излучения зависит от геофизической обстановки;
- не всегда прохождение вистлера и возмущающего импульса совпадают по времени;
- количество вистлеров зависит от многих факторов, к примеру, от грозовой активности.

Тем не менее полагаем, что сопоставление вариаций параметров кроссмодуляции с электронной концентрацией может позволить, в частности, оценить эффективность регулируемого сброса энергичных частиц из радиационных поясов Земли в атмосферу или генерации сверхнизкочастотных резонансных колебаний для целей загоризонтной локации, дистанционного зондирования земных недр или других возможных применений активных воздействий на ионосферу с помощью нагретых стенов (см., например, [12, 13]).

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность кафедре общей физики МФТИ за полезные обсуждения, в особенности ее заведующему профессору А.В. Максимычеву за внимание и интерес к работе на всех ее этапах.

Литература

1. *Литтер Я.И., Молчанов О.А., Чмырев В.М.* Модуляция спектра и амплитуды низкочастотного сигнала в магнитосферной плазме // Письма в ЖЭТФ. 1971. — Т. 14, вып. 8. — С. 475–479.
2. *Будько Н.И., Карпман В.И., Похотелов О.А.* О нелинейных эффектах при распространении монохроматических ОНЧ волн (геликонов) в магнитосфере // Письма в ЖЭТФ. — 1971. — Т. 14, вып. 8. — С. 469–474.
3. *Fejer J.A.* Atmospheric Tides and Associated Magnetic Effects // J. Atmos. Solar-Ter. Phys. — 1961. — V. 23. — P. 260–265.
4. *Гинзбург В.Л., Гуревич А.В.* Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. I // Успехи физических наук. — 1960. — Т. 70. — С. 201–246.
5. *Гинзбург В.Л., Гуревич А.В.* Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. II // Успехи физических наук. — 1960. — Т. 70. — 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., Gibby A.R., Cohen M.B.* Magnetospheric Amplification and Emission Triggering by ELF/VLF Waves Injected by the 3.6 MW HAARP Ionospheric Heater // Journal of Geophysical Research. — 2008. — V. 113, I. A12. — P. 1496–1503.
8. *Kulkarni P., Inan U.S., Bell T.F.* Cross Modulation of Wistler Mode and HF Waves Above the HAARP Ionospheric Heater // Journal of Geophysical Research. — 2008. — V. 113, I. A 92. — P. 1503–1521.
9. *Ковражский Р.А., Могилевский М.Н., Боске Ж.М. [и др.]*. Обнаружение высыпаний частиц из пояса кольцевого тока, стимулированных мощным наземным ОНЧ излучателем // Письма в ЖЭТФ. — 1983. — Т. 38, вып. 7. — С. 332–334.
10. *Goikowski M., Inan U.S., Cohen M.B., Gibby A.R.* Amplitude and Phase of Nonlinear Magnetospheric Wave Growth Excited by the HAARP HF Heater // Journal of geophysical research. — 2010. — V. 115, I. A14. — P. 1134–1145.
11. *Watt C.E.J., Rankin R., Degeling A.W.* Whistler Mode Wave Growth and Propagation in the Prenoon Magnetosphere // Journal of geophysical research. — 2012. — V. 117, I. A6. — P. 1203–1219.

12. *Streltsov A.V., Golkowski M., Inan U.S., Popandopoulos K.D.* Propagation of Whistler Mode Waves with a Modulated Frequency in the Magnetosphere // Journal of Geophysical Research. — 2010. — V. 115, I. A9. — P. 432–451.
13. Experiments with the HAARP Ionospheric Heater / Stanford VLF Group on-line <http://vlf.stanford.edu/research/experiments-haarp-ionosperic-heater>

Поступила в редакцию 18.01.2014.