

Амплитудная модуляция вистлеров

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

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Камчатский край, Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7*

Поступила в редакцию 6.11.2013 г.

Экспериментальные наблюдения за вистлерами, проведенные в июле 2011 г. в обсерватории «Паратунка» (53,02° с.ш., 158,65° в.д.; $L = 2,3$) и совпадающие по времени с экспериментами по программе HAARP (62,30° с.ш., 145,30° з.д.; $L = 4,2$), позволили обнаружить их нестандартную форму, вероятнее всего обусловленную амплитудной модуляцией электромагнитными импульсами длительностью около 1 с с частотой заполнения $\approx 1,1$ кГц.

Ключевые слова: электромагнитные колебания и волны, свистящие атмосферерики, магнитосфера; electromagnetic fluctuations and waves, whistlers, magnetosphere.

Введение

Дефиниция whistlers, whistling atmospherics (свисты, свистящие атмосферерики) указывает на источник и особенности данного природного явления. Своим происхождением вистлер обязан грозovým разрядам (атмосферикам), а специфическую форму (рис. 1, а) он приобретает при прохождении через диспергирующую среду. Изучение вистлеров началось сравнительно давно, с определения их источников и путей распространения [1]. Большая часть траектории вистлеров проходит через магнитосферу, что сформировало устойчивый интерес к их параметрам как источнику информации о свойствах плазмы в магнитосфере [2]. Определенный интерес к вистлерам проявился в связи с необходимостью решения проблемы регулируемого сброса энергичных частиц из радиационных поясов Земли [3]. В 2012 г. одним из основоположников данного направления исследований подготовлен современный обзор работ, связанных с исследованиями свойств вистлеров [4].

В настоящей статье рассмотрены возможности использования вистлеров в качестве диагностического источника информации о вариациях параметров плазмы в магнитосфере и возможных нелинейных явлениях в ней.

Теоретические и экспериментальные исследования

При рассмотрении нелинейных явлений, происходящих в плазме, авторы исходили из результатов, полученных в классической работе [5]. В этой

работе в качестве критерия проявления нелинейных процессов в плазме используется термин «характерное плазменное поле», величина которого определяется как

$$E_{\text{п}} = \sqrt{3kT \frac{m}{e^2} \delta(\omega^2 + \vartheta_0^2)} = 4,2 \cdot 10^{-10} \sqrt{\delta T(\omega^2 + \vartheta_0^2)}, \quad (1)$$

где $E_{\text{п}}$ — характерное плазменное поле; e и m — заряд и масса электрона; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура плазмы в отсутствие поля; δ — средняя относительная доля энергии, передаваемая при соударении электрона с тяжелой частицей; ω — циклическая частота поля; ϑ_0^2 — эффективное число соударений электрона с тяжелыми частицами в отсутствие поля.

Условие проявления нелинейности заключается в том, что амплитуда возмущающей волны должна превышать величину характерного плазменного поля: $E_{\text{в}} \geq E_{\text{п}}$. Исходя из выражения (1), в работе [5. С. 394, табл. III] приводятся значения $E_{\text{п}}$ для разных слоев ионосферы, из которых следует: с ростом высоты величина $E_{\text{п}}$ уменьшается от 3200 (на уровне слоя D) до 1900 мВ/м (для слоя F) при том, что $\omega = 10^8$ рад/с. Для частотного диапазона вистлеров в этой же таблице для слоя F $E_{\text{п}}$ меньше 1 мВ/м. Следовательно, на больших высотах при условии $\vartheta_0 \neq 0$ нелинейные эффекты возможны при весьма малых значениях возмущающего поля.

Одним из проявлений нелинейных эффектов в ионосфере является кроссмодуляция [6]. Можно ожидать присутствие этого эффекта и при нелинейном взаимодействии в магнитосфере, поскольку известны работы [7, 8], описывающие их наличие, в том числе на силовых трубках с параметрами Мак-Илвейна (L), близких к параметрам пункта наблюдения [7]. Кроссмодуляция вистлеров наблюдалась

* Владимир Павлович Сивоконь (vsivokon@mail.ru); Нина Володаровна Чернева (nina@ikir.ru); Геннадий Иванович Дружин (drug@ikir.ru); Дмитрий Викторович Санников (vilgusi@mail.ru).

и в рамках программы HAARP [9]. Нелинейное взаимодействие в магнитосфере вистлеров и альвеновских волн описывается в работе [10]. Следовательно, есть основания для обнаружения модуляции и в вистлерах, наблюдающихся на Камчатке, но в этом случае немаловажным параметром возмущающей волны является ее частота. Для того чтобы вистлер оказался промодулированным возмущающей волной, ее частота должна быть меньше верхней частоты спектра вистлера. Исходя из частотных и временных особенностей вистлеров, регистрируемых на Камчатке (рис. 1, *a*), частота возмущающей волны должна быть менее 3 кГц.

Это условие существенно ограничивает количество возможных источников возмущающей волны. Передатчики ВМС США и России, широко используемые в экспериментах по исследованиям эффектов в магнитосфере [8, 11, 12], в данном случае непригодны, поскольку используемые частоты значительно выше. По частотному диапазону наиболее приемлемыми являются генерируемые в рамках программы HAARP низкочастотные излучения, применяющиеся в экспериментах по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов Земли. В таких экспериментах низкочастотное излучение, закачиваемое в магнитосферу, должно обеспечить изменение питч-угла энергичных частиц радиационных поясов, что приводит к их высыпанию в ионосферу. Поскольку частицы в радиаци-

онных поясах имеют различные энергетические характеристики, то для их сброса используется набор частот, в том числе с достаточно сложными модуляционными функциями.

В работе [13] проводится численное моделирование оптимального выбора частотного диапазона свистовых волн, на основе которого делается вывод о том, что в подобных экспериментах целесообразно ступенчатое изменение частоты с шагом 100 Гц в диапазоне 1–3 кГц, что вполне соответствует условиям наших исследований (рис. 2).

Более того, эти излучения в ряде случаев формируются в виде импульсов, соизмеримых по временному масштабу с наблюдающимися на Камчатке вистлерами. Отметим, что низкочастотные излучения могут формироваться с использованием как нагревного стенда [14], так и спутниковых ОНЧ-излучателей [15]. Поскольку при выборе типа вистлеров мы исходили из того, что они должны распространяться по магнитной силовой трубке, выходящей на Камчатский полуостров, необходимо обосновать возможность попадания низкочастотного излучения, сформированного на магнитной силовой трубке, предположим Аляски, на силовую оболочку Камчатки. Такая возможность обусловлена, во-первых, неоднородностью распределения концентрации частиц и магнитного поля Земли в магнитосфере, что приводит к изменению коэффициента рефракции и вариациям волнового вектора.

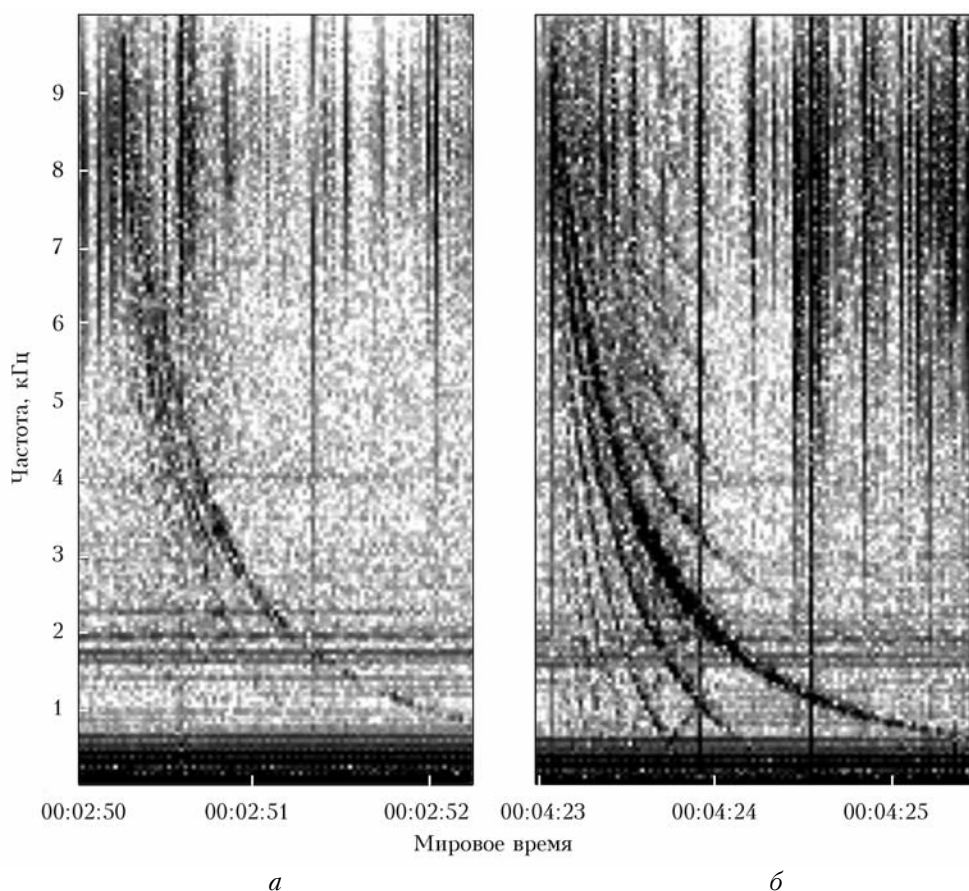


Рис. 1. Форма вистлеров в разное время наблюдения 21 июля 2011 г.: *a* – стандартный вистлер, *б* – нестандартный

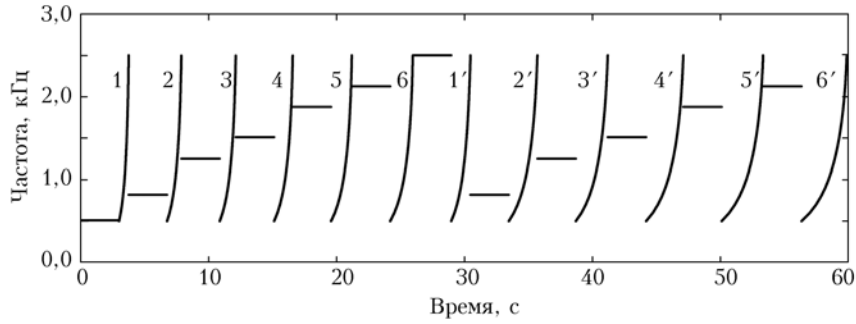


Рис. 2. Форматы электромагнитного излучения HAARP в экспериментах 16 марта 2008 г., отличающиеся периодом следования 1, 2, ... и 1', 2', ... [16]

Теория этого вопроса была заложена в работе [17] и получила развитие в публикациях Стэнфордского университета [18], в том числе и в виде анимированной модели [http://nova.stanford.edu/vlf/research_topics/raytracing/raytracing.mp4]. Из этих работ следует, что в зависимости от геофизических условий и частоты электромагнитного излучения свистового диапазона траектория его движения в магнитосфере может пересекать несколько силовых оболочек, что делает возможным реализацию описанного нами подхода. Во-вторых, формирующийся в ходе нагревных экспериментов ионосферный излучатель не обладает выраженными направленными свойствами, что позволяет фиксировать ОНЧ-излучение в достаточно широком телесном угле [19].

В качестве возможного механизма взаимодействия возмущающей волны с вистлером мы использовали известные эксперименты Fejer [20]. В этих экспериментах для исследования слоев D и E ионосферы использовались два передатчика, работающие в импульсном режиме, параметры излучения которых отличались мощностью и частотой следования импульсов. Более мощный передатчик играл роль источника возмущения. В зависимости от времени излучения, длительности возмущающего импульса и пробной волны возможны несколько вариантов их взаимодействия. Применительно к нашему случаю наиболее вероятен вариант, когда вистлер и возмущающий импульс проходят через некую область магнитосферы одновременно. Взаимодействие коротких импульсов немодулированных волн для всех вариантов описано в работе [21]. Величину модуляции для нашего случая можно определить как

$$M = D_0 [1 - \exp(-\delta \vartheta_{e0} t_1)] \exp\{-\delta \vartheta_{e0} (t_2 - t_{10} - t_1)\}. \quad (2)$$

Здесь

$$D_0 = \frac{e^2 E_1^2(0)}{6m\delta\vartheta_{e0}} \frac{\omega_2^2 - \vartheta_{e0}^2}{(\omega_2^2 + \vartheta_{e0}^2)} \left(\frac{d\vartheta_e}{dT_e} \right)_{T_{e0}}, \quad (3)$$

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 зондирующе-

го импульса; T_{e0} – электронная температура в отсутствие возмущающего импульса; $E_1(0)$ – амплитуда возмущающего импульса; ω_2 – частота пробной волны.

Результаты наблюдений и их обсуждение

С целью проверки изложенного выше подхода в июле 2011 г. на многоканальном ОНЧ-регистраторе Института космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН во время работы комплекса HAARP выполнены наблюдения вистлеров. Используемый регистратор включает в себя антенную систему, состоящую из двух рамочных магнитных антенн и одной штыревой электрической антенны. Рамочные антенны ориентированы в направлении север–юг и восток–запад и имеют деревянный каркас длиной 16 м и высотой 8 м, на котором закреплен 100-витковый кабель, заключенный в металлический экран. Каждая из вертикально расположенных антенн обладает эффективной площадью 10000 м².

В результате эксперимента были обнаружены вистлеры с не наблюдавшимися ранее типами спектральных линий. В качестве примера на рис. 1, б показаны фрагменты записи 21 июля 2011 г. Видно, что на небольшом временном интервале (менее 2 мин) существенно изменяются спектральные характеристики вистлеров. Расчет, проведенный по методике [22], показал, что все они пришли по одной силовой трубке с параметром Мак-Илвейна $L = 2,3$.

Важным параметром вистлеров является дисперсия D . Время, отсчитываемое от возникновения излучения, определяется из формулы

$$t = D/\sqrt{f}, \quad (4)$$

где t и f – время и частота, наблюдаемая в данный момент времени в спектре вистлера. Для определения дисперсии можно воспользоваться указанной выше методикой, нами использовался подход [1], в котором через равные промежутки времени (в нашем случае 60 мс) производится отсчет частоты, затем строится график $t = 1/\sqrt{f}$ и дисперсия определяется как тангенс угла наклона прямой. На рис. 3

приведены результаты обработки только трех последовательно наблюдавшихся вистлеров, поскольку прямые располагаются настолько близко, что большее их количество трудно различить. Видно, что дисперсии стандартных и нестандартных вистлеров практически одинаковы.

В процессе обработки вистлеров возникла идея определить дисперсию боковых частот, поскольку если возмущающий импульс и вистлер имеют одинаковую траекторию, то линии на графике должны быть параллельны. Оказалось, что дисперсии вистлера и боковых частот отличаются. Это особенно

заметно для низких частот возмущающего импульса (рис. 4), что свидетельствует о дополнительной дисперсии боковых частот по отношению к вистлеру. Наличие дополнительной дисперсии боковых частот относительно дисперсии вистлера позволяет сделать следующие промежуточные выводы:

- 1) траектория возмущающего импульса в диспергирующей среде отличается от траектории вистлера;
- 2) взаимодействие вистлера и электромагнитного импульса ограничено по времени и, вероятнее всего, происходит на нисходящем участке силовой линии магнитного поля Земли.

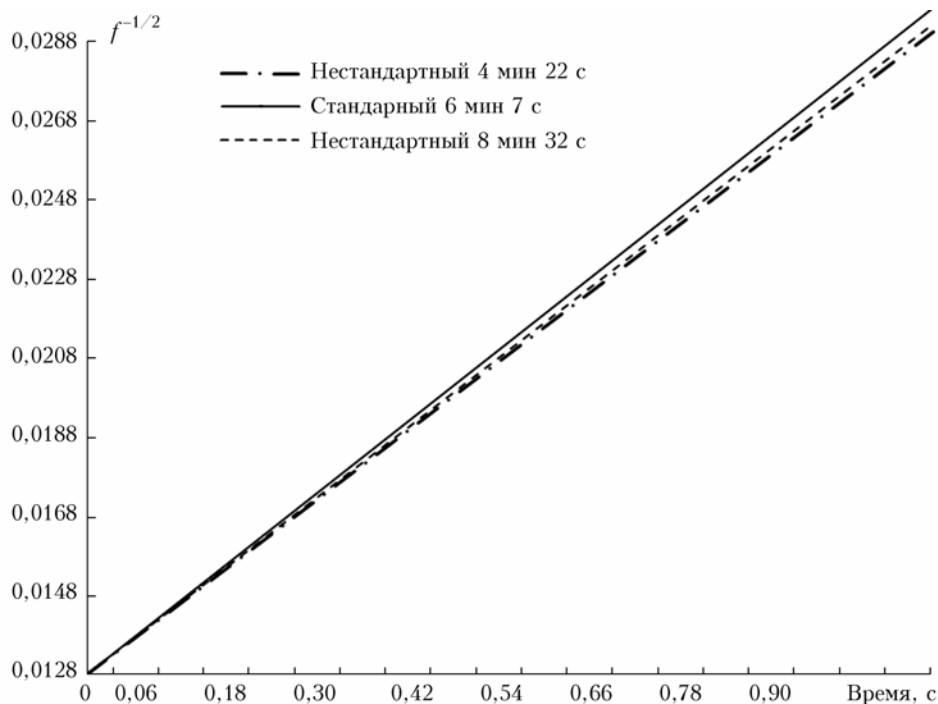


Рис. 3. Функция $t = 1/\sqrt{f}$ последовательности вистлеров 21 июля 2011 г.

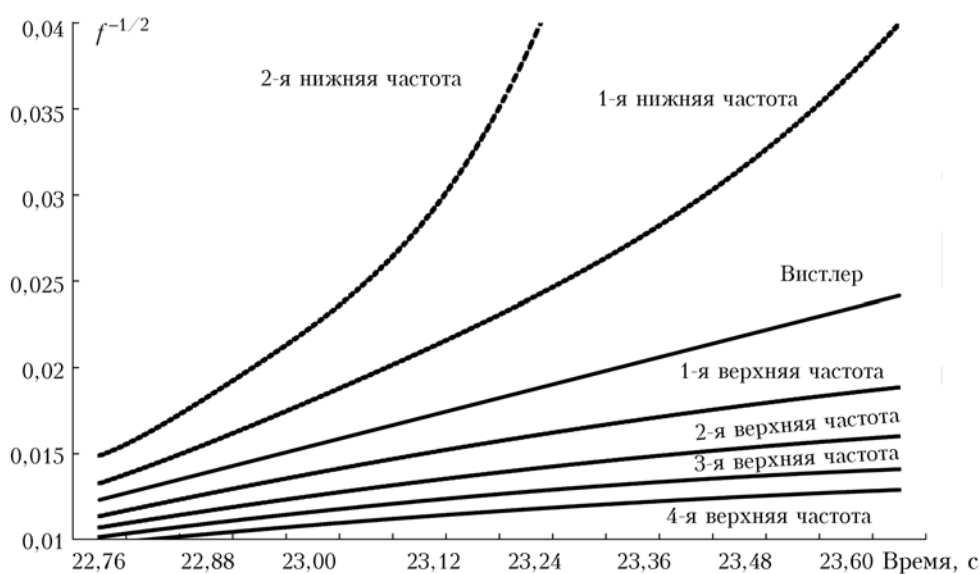


Рис. 4. Функция $t = 1/\sqrt{f}$ спектральных линий нестандартного вистлера

Проанализируем геомагнитную обстановку в период проведения исследований. Известно [23], что в магнитосфере формируется целый ряд низкочастотных и индуцированных излучений, которые, как правило, характерны для ее возмущенного состояния. Для оценки состояния магнитного поля Земли используем планетарный K_p [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>] и локальный K (обс. «Паратунка») магнитные индексы, которые представлены в таблице. Видно, что особых отклонений индексов в дни проведения эксперимента не наблюдалось.

Динамика магнитных индексов в период наблюдений (18–24 июля 2011 г.)

Индекс	Дата						
	18	19	20	21	22	23	24
Планетарный K_p	12+	21	26+	21–	19+	14–	7+
Локальный K	17	11	23	17	16	11	8

Грозовая активность как основной источник вистлеров, по данным WWLLN (World Wide Lightning Location Network) и собственным наблюдениям ИКИР, существенных отклонений не имела. В ИКИР, в рамках программы AWDANet (Automatic Whistler Detector and Analyzer Network), разработана система автоматического детектирования вистлеров, что позволяет сравнить распределение вистлеров в разные дни наблюдений. В среднем в сутки (за 1 нед измерений) фиксировалось около 430 вистлеров. Если усреднить суточное распределение вистлеров в течение этого периода, а затем вычислить относительно него отклонение в событиях 21 июля 2011 г., то оно будет оцениваться в несколько событий.

Нормированное амплитудное распределение спектральных линий показано на рис. 5.

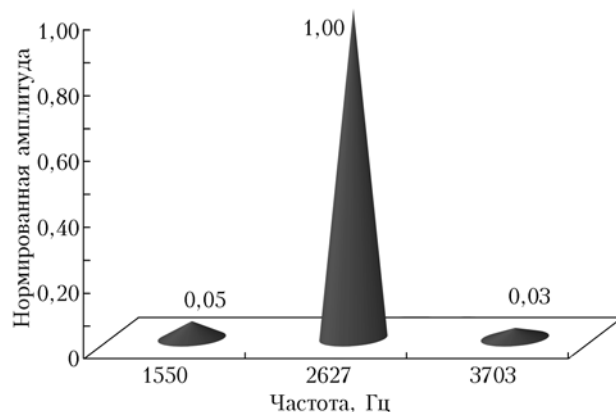


Рис. 5. Распределение спектральных линий относительно частоты вистлера

Оно характерно для амплитудной модуляции, уравнение которой можно записать в виде

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t) + \frac{MU_0}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{MU_0}{2} \cos(\omega - \Omega)t,$$

где U_0 — амплитуда несущей частоты; ω — несущая частота; Ω — модулирующая частота; M — глубина модуляции. В нашем случае несущим колебанием является вистлер. Тогда модулирующий импульс, исходя из спектрограммы (рис. 5), имеет частоту ($3703 - 2627 = 1076$ Гц; $2627 - 1550 = 1077$ Гц) около 1,1 кГц. Из рис. 1, б видно, что модуляция продолжается не все время существования вистлера. Если предположить, что вистлер и возмущающий импульс проходят через область магнитосферы одновременно, то длительность возмущающего импульса будет равна времени от начала вистлера до момента окончания модуляции, т.е. около 1 с. Полученные экспериментальным путем параметры возмущающего импульса достаточно хорошо совпадают с параметрами электромагнитных излучений, генерируемых в рамках программы HAARP [16] (см. рис. 2).

В результате обработки записей (см. рис. 5) можно определить уровень несущей U_0 (вистлер) и «боковой» $U_{бок}$ частот, а следовательно, глубину модуляции

$$M = 2U_{бок}/U_0. \quad (7)$$

Заметим, что глубина модуляции в данном выражении и в (2) одна и та же величина, что позволяет определить свойства плазмы в области взаимодействия, вероятнее всего, на нисходящем участке силовой трубки.

Заключение

В результате экспериментальных наблюдений обнаружено нелинейное взаимодействие в магнитосфере вистлеров с низкочастотными электромагнитными импульсами, формируемыми, вероятнее всего, в рамках программы HAARP.

Показана возможность использования вистлеров в качестве индикаторов нелинейных эффектов в магнитосфере, которые несут одновременно информацию о вариациях электронной концентрации в магнитосфере.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4.

1. Гершман Б.Н., Угаров В.А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней ионосфере // Успехи физ. наук. 1960. Т. LXXII, вып. 2. С. 235–271.
2. Carpenter D.L. Electron-density variations in the magnetosphere deduced density whistler data // J. Geophys. Res. 1962. V. 67, N 9. P. 3345–3360.
3. Park C.G., Carpenter D.L. Very low frequency radio waves in the magnetosphere // Upper atmosphere research in Antarctica // Antarctic Res. Series. 1978. V. 29. P. 73–99. URL: http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/207_0.pdf
4. Carpenter D.L. The history of very low frequency (VLF) radio research at Stanford; more than sixty years of discovery, innovation, and analysis. Stanford, 2012. URL: <http://vlf.stanford.edu/pubs/history-very-low-frequency-vlf-radio-research-stanford>
5. Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле

- // Успехи физ. наук. 1960. Т. LXX, вып. 3. С. 393–428.
6. *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.
 7. *Будько Н.И., Карман В.И., Похотелов О.А.* О нелинейных эффектах при распространении монохроматических ОНЧ волн (геликонов) в магнитосфере // 1971. Письма в ЖЭТФ. Т. 14. С. 469–471.
 8. *Лихтер Я.И., Молчанов О.А., Чмырев В.М.* Модуляция спектра и амплитуда низкочастотного сигнала в магнитосферной плазме // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. С. 475–479.
 9. *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. 2009. V. 36. L15103.
 10. *Sharma R.P., Goldstein M.L., Navin Kumar Dwivedi, Prashant K. Chauhan.* Whistler propagation and modulation in the presence of nonlinear Alfvén waves // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A12207.
 11. *Копытенко Ю.А., Молчанов О.А., Могилевский М.М., Бушмарин В.А., Еремеев В.Г., Иванов А.А., Лизунов В.В., Маркеева Ю.М., Щекотов А.Ю., Погребников М.М.* Демодуляция мощных низкочастотных волн в субавроральной ионосфере в диапазоне геомагнитных пульсаций // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. С. 237–240.
 12. *Graf K.L., Inan U.S., Spasojevic M.* Transmitter-induced modulation of subionospheric VLF signals: Ionospheric heating rather than electron precipitation // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. DOI: 10.1029/2011JA016996.
 13. *Streltsov A.V., Golkowski M., Inan U.S., Papadopoulos K.D.* Effect of frequency modulation on whistler mode waves in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A08214.
 14. *Inan U.S., Golkowski M., Carpenter D.L., Reddell N., Moore R.C., Bell T.F., Paschal E., Kossey P., Kennedy E., Meth S.Z.* Multi-hop whistler-mode ELF / VLF signals and triggered emissions excited by the HAARP HF heater // J. Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L24805.
 15. *Kulkarni P., Inan U.S., Bell T.F.* Energetic electron precipitation induced by spacebased VLF transmitters // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A09203.
 16. *Streltsov A.V., Golkowski M., Inan U.S., Papadopoulos K.D.* Propagation of whistler mode waves with a modulated frequency in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A09209.
 17. *Kimura I.* Effect of ions on whistler-mode ray tracing // Radio Sci. 1966. V. 1, N 3. P. 263–283.
 18. *Inan U., Bell T.* The plasmapause as a VLF wave guide // J. Geophys. Res. 1977. V. 82, N 19. P. 2819–2827.
 19. *Watt C.E.J., Rankin R., Degeling A.W.* Whistler mode wave growth and propagation in the prenoon magnetosphere // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A06205.
 20. *Fejer J.A.* The Absorption of Short Radio Waves in the Ionospheric D and E Regions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1961. N 23. P. 260–274.
 21. *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
 22. *Молчанов О.А., Маркеева Ю.М.* Методика обработки и интерпретации динамических спектров свистящих атмосфериков с целью определения электронной концентрации в магнитосфере Земли. М.: ИЗМИРАН СССР, 1974. 64 с.
 23. *Молчанов О.А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985. 224 с.

V.P. Sivokon', N.V. Cherneva, G.I. Druzhin, D.V. Sannikov. **Amplitude modulation of whistlers.**

Experimental supervision for whistlers, spent in July, 2011 in an observatory of "Paratunka" (53.02 N, 158.65 E; $L = 2.3$) and coinciding in time with experiments under program HAARP (62.30 N, 145.30 W; $L = 4.2$) have allowed us to find out their non-standard form, most likely caused by peak modulation by electromagnetic pulses with duration of about 1 second and frequency of filling of ≈ 1.1 kHz.