

УДК 537.862

## МОДУЛЯЦИЯ ВИСТЛЕРОВ

© 2014 г. В. П. Сивоконь, В. В. Богданов, Г. И. Дружин, Н. В. Чернева,  
А. В. Кубышкин, Д. В. Санников, И. В. Агранат

Институт космомагнитических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка,  
(Камчатский край)

e-mail: vsivokon@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2013 г.

После доработки 07.06.2014 г.

Анализ экспериментальных данных, полученных на обс. Паратунка ( $53.02^{\circ}$  N,  $158.65^{\circ}$  E;  $L = 2.3$ ), выявил необычную форму вистлеров, в которой присутствуют симметричные, относительно вистлера, спектральные линии. Показано, что такая форма, вероятнее всего, обусловлена амплитудной модуляцией вистлеров электромагнитными импульсами длительностью около 1 с и частотой заполнения  $\approx 1.1$  кГц. Высказано предположение, что излучателем таких импульсов может быть авроральный электроджет, модифицированный нагревным излучением стенда HAARP ( $62.30^{\circ}$  N,  $145.30^{\circ}$  W;  $L = 4.2$ ).

DOI: 10.7868/S0016794014060182

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Источниками свистящих атмосфериков, в зарубежной литературе именуемых вистлерами (whistlers), являются грозовые разряды, а их специфическая форма обусловлена прохождением через диспергирующую среду. Изучение вистлеров, их источников и путей распространения началось более полувека назад [Storey, 1953; Гершман и Угаров, 1960]. Когда было установлено, что большая часть их траектории проходит через магнитосферу, возник интерес к параметрам вистлеров, как источника информации о свойствах плазмы в магнитосфере [Storey, 1953; Helliwell and Carpenter, 1961; Carpenter, 1962; Barrington and Berlose, 1963; Park and Carpenter, 1976; Капустина и др., 1981; Carpenter, 2012]. Стандартная форма вистлера наблюдаемая на Камчатке, представлена, на рис. 1a. Для нее характерна одна спектральная линия, изменяющаяся со временем по частоте.

Нелинейное взаимодействие электромагнитных волн ОНЧ с магнитосферной плазмой описывается в ряде работ, например, [Будько и др., 1971; Лихтер и др., 1971]. В первой работе показано, что на  $L = 2.5$  нелинейное взаимодействие электромагнитных волн свистового диапазона возможно в том случае, когда длительность излучаемого сигнала в несколько раз больше 0.1 с. Во второй публикации описывается эффект периодической модуляции квазишумового спектра магнитосферного сигнала от наземного передатчика, обнаруженный в экспериментах по зондированию магнитосферы Земли мощными низкочастотными импульсами с несущей частотой 15 кГц. Нелинейные явления наблюдались и в рамках программы

HAARP [Gołkowski et al., 2009]. В публикации приводятся результаты экспериментов по генерации электромагнитного излучения свистового диапазона путем воздействия на авроральный электроджет нагревной волной с частотой 3.25 МГц. Нагревная волна модулируется в течение нескольких секунд частотами 930, 1110, 1590 Гц и пилообразным изменением частоты со скоростью 500 Гц/с. Записи этих сигналов в диапазоне до 6 кГц на удалении 37 км от места проведения экспериментов (Chistochina) зафиксировали их взаимодействие с вистлерами, проявившееся в виде кроссмодуляции.

Нелинейное взаимодействие вистлеров и альвеновских волн описывается в работе [Sharma et al., 2010]. Использование спутниковых измерений позволило экспериментально установить модуляцию в магнитосфере вистлеров кинетическими альвеновскими волнами. Следовательно, есть основания предположить, что возможна модуляция вистлеров и на других частотах, от альвеновских волн до звуковых частот. В этом случае немаловажным параметром возмущающей волны является ее частота, поскольку при модуляции важно соотношение несущая/модулирующая частоты, первая должна быть выше второй.

В настоящей работе на основе анализа нестандартной формы вистлера высказано предположение, что причиной проявления нелинейных эффектов в вистлерах, может быть модификация аврорального электроджета мощным электромагнитным излучением декаметрового диапазона, обусловленного работой комплекса HAARP.

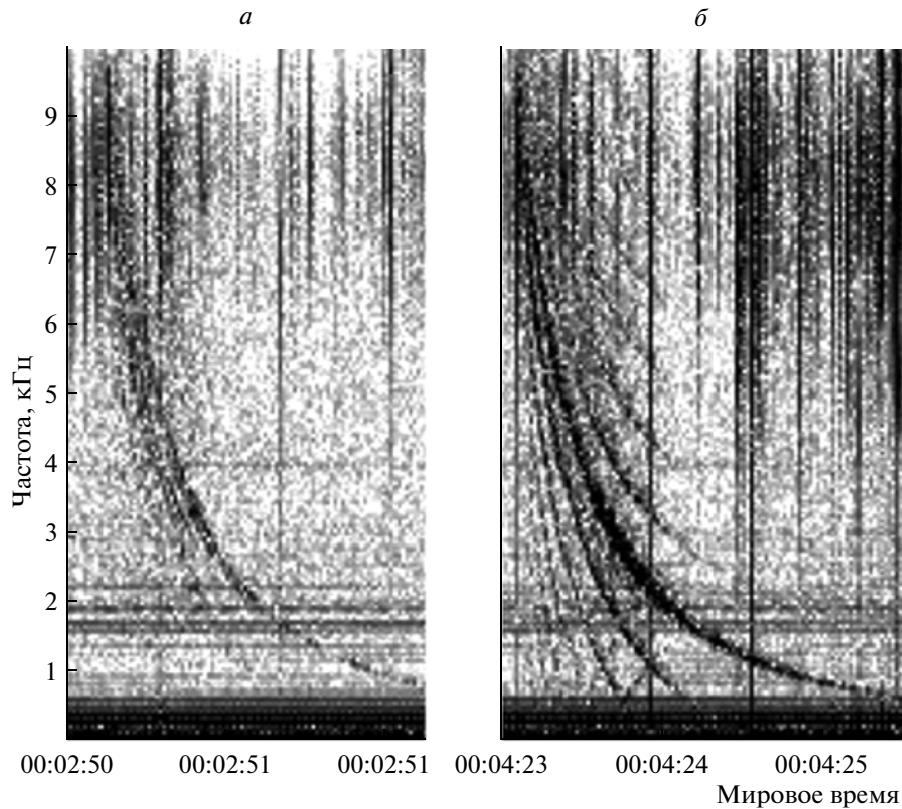


Рис. 1. Форма стандартного (а) и нестандартного (б) вистлеров.

## 2. АНАЛИЗ ПРЕДПОСЫЛОК ИССЛЕДУЕМОГО ЯВЛЕНИЯ

Если рассматривать вистлер как носитель информации о возможных нелинейных процессах, в нашем случае модуляции, то частота этого носителя должна быть выше модулирующей частоты. В противном случае, вистлер будет выступать в качестве модулирующего сигнала, а не несущего. Следовательно, для того, чтобы вистлер оказался промодулированным возмущающей волной, ее частота должна быть меньше верхней частоты спектра вистлера (см. рис. 1а). Наблюдаемые на Камчатке вистлеры не имеют носовой частоты и их спектр, который может быть однозначно идентифицирован и обработан, ограничен полосой 10 кГц. Более того, на частотах 3 кГц и выше, вследствие большой скорости изменения частоты вистлера проблематично выделить процессы, связанные с модуляцией, следовательно, оптимальной является модулирующая частота менее 3 кГц. Это условие существенно ограничивает число возможных источников возмущающей волны. Передатчики ВМФ России и ВМС США, используемые в экспериментах по исследованиям эффектов в магнитосфере [Лихтер и др., 1971; Копытенко и др., 1977; Graf et al., 2011], в данном случае непригодны, поскольку применяемые частоты 15–22 кГц значи-

тельно выше 3 кГц. По частотному диапазону наиболее приемлемыми являются низкочастотные излучения, генерируемые в рамках программы HAARP, которые используются в экспериментах по регулируемому сбросу энергичных частиц из радиационных поясов Земли. В таких экспериментах низкочастотное излучение, закачиваемое в магнитосферу, изменяет питч-угол энергичных частиц радиационных поясов, обеспечивая их попадание в конус потерь, и, как результат, к высыпанию в ионосферу. В работе [Streltsov et al., 2009] приводятся результаты численного моделирования оптимального выбора частотного диапазона волн, инжектируемых в магнитосферу. Поскольку энергичные частицы в радиационных поясах имеют разные массы и скорости, то есть отличающиеся энергетические характеристики, и инъекция в магнитосферу монохромного электромагнитного излучения не решит проблему сброса энергичных частиц из радиационных поясов Земли. На основе этого 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 экспериментальных исследований.

Источником информации о времени и частоте нагревной волны является сайт HAARP [<http://www.haarp.alaska.edu/data/spectrum2/www/hf.html>].

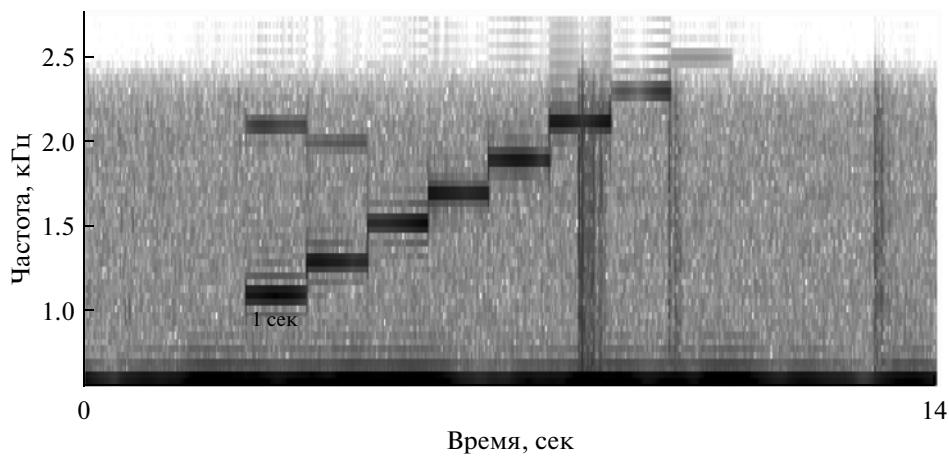


Рис. 2. Спектрограмма электромагнитного излучения на частоте  $\approx 9.6$  МГц 21 июля 2011 года 00:04 UT.

Для определения принадлежности электромагнитного излучения к нагревным экспериментам используется подход, описанный в работе [Сивоконь, 2009]. В работе отмечается, что для повышения эффективности воздействия, частота нагревной волны, как правило, выбирается кратной гиромагнитной частоте. Так как при нагреве используются большие мощности, то на фоне гиромагнитного резонанса имеют место нелинейные эффекты в ионосфере, что приводит к генерации гармоник нагревной волны значительной амплитуды. Поскольку частоты гармоник значительно больше частоты нагревной волны, это позволяет уверенно фиксировать их на большом удалении от места проведения экспериментов. Наблюдения в декаметровом диапазоне длин волн проводятся с использованием аппаратурного комплекса [Сивоконь и др., 2004], созданного для исследования селективного поляризационного возбуждения характеристических волн в ионосфере [Сивоконь и Дружин, 2006]. В состав комплекса входят четыре радиоприемных устройства декаметрового диапазона, подключенные к антеннам эллиптической поляризации, что позволяет определить направление на источник излучения. Комплекс установлен в пос. Паратурка. На нем 21 июля 2011 г. в 00:04 UT на частоте  $\approx 9.6$  МГц было зафиксировано электромагнитное излучение, спектрограмма которого показана на рис. 2. Из спектрограммы следует, что в зарегистрированном излучении имеется ступенчатое изменение частоты, которое при воздействии на электроджет, вероятно, может трансформироваться в ОНЧ излучение. Однако вистлеры регистрируются на Камчатке ( $L = 2.3$ ), а низкочастотное электромагнитное излучение формируется на Аляске ( $L = 4.2$ ), поэтому, возникает необходимость обосновать возможность его распространения не только по силовой линии формирования, но и по другим траекториям. Такая возможность обусловлена несколькими причинами:

1). *Параметрами электроджета как излучателя.* В основе формирования электромагнитного излучения в ионосфере лежит эффект Гетманцева, заключающийся в воздействии мощной электромагнитной волны декаметрового диапазона, модулированной низкой частотой, на электроджет. Этот же подход, но существенно усовершенствованный [Golkowski et al., 2008], используется и в экспериментах HAARP. Если электроджет представить в виде антенны, то исходя из ее параметров (отношения высоты подвеса и ее длины к длине волны электромагнитного излучения), расчет показывает, что электромагнитная энергия излучается преимущественно в магнитосферу, а излучатель имеет широкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. Следовательно, имеется возможность просачивания низкочастотного электромагнитного излучения и на другие силовые оболочки Земли.

2). *Рефракцией в магнитосфере.* За счет неоднородностей в распределении концентрации частиц, степень которой усиливается при магнитосферных возмущениях, в магнитосфере формируются условия, которые приводят к изменению коэффициента рефракции и вариации волнового вектора. Теоретически такой механизм был рассмотрен в работе [Kimura, 1966] и получил дальнейшее развитие в работах [Inan and Bell, 1977; Watt et al., 2012]. Модель траектории свистового электромагнитного излучения в магнитосфере представлена на сайте [[http://nova.stanford.edu/vlf/research\\_topics/raytracing/raytracing.mp4](http://nova.stanford.edu/vlf/research_topics/raytracing/raytracing.mp4)].

Следовательно, в зависимости от сложившихся геофизических условий и частоты формируемого в активных экспериментах электромагнитного излучения свистового диапазона оно может распространяться в магнитосфере по долготе и широте, что делает возможным реализацию описанного нами подхода.

### 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В экспедиционном пункте, удаленном от п. Паратунка на 15 километров, вдали от промышленных помех, проводится непрерывная регистрация естественного электромагнитного излучения в диапазоне частот от единиц Гц до  $\sim 10$  кГц. Электромагнитные излучения принимаются двумя рамочными магнитными и одной штыревой электрической антеннами. Амплитудные и частотные характеристики всех трех предварительных усилителей соответствующих антенн одинаковы, имеют фильтр нижних частот с частотой среза 9 кГц и коэффициент усиления 2000. Питание предварительных усилителей осуществляется от аккумуляторных батарей. ОНЧ-регистратор работает в непрерывном режиме.

Сигналы с трех предварительных усилителей по кабельной линии связи поступают в пункт аналого-цифровой обработки сигналов, расположенный на расстоянии 150 м от антенной системы. В этом пункте производится оцифровка сигналов с частотой дискретизации 44 100 Гц. Пороговая чувствительность аппаратуры по магнитной составляющей поля не хуже  $10^{-7}$  нТл/Гц $^{1/2}$ .

### 4. ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Исходя из сведений, полученных с сайта HAARP, были организованы наблюдения за гармониками нагревной волны в декаметровом диапазоне, спектральный анализ которых, позволил определить наиболее вероятные временные интервалы анализа записей измерительного комплекса ОНЧ диапазона. В результате было установлено, что 21 июля 2011 г. во время работы стендов HAARP с 00:02:50 по 00:12:40 UT в ОНЧ сигналах наблюдалось неоднократное чередование обычных вистлеров и вистлеров с боковыми частотами, которые ранее не наблюдались. Пример такого нестандартного вистлера, принятого после регистрации типичного для ст. “Карымшина” (рис. 1а), приведен на рис. 1б.

Из рисунка видно, что на небольшом временном интервале, менее двух минут, существенно изменяются спектральные характеристики вистлеров: сверху и снизу по отношению к основной более темной линии вистлера появляются боковые частоты (см. рис. 1б).

На основе анализа спектров стандартных (см. рис. 1а) и нестандартных (см. рис. 1б) вистлеров выясним, существуют ли в них отличия, которые могут быть обусловлены разными траекториями, по которым они пришли в пункт регистрации. Иначе говоря, пройдя по разным траекториям через разные области магнитосферы, отличающиеся диспергирующими свойствами,

характеристики вистлеров будут отличаться. Для выяснения этого вопроса вычислим их дисперсии  $D$ , для которых в диапазоне частот 1–8 кГц справедливо выражение  $t = D/\sqrt{f}$ , где  $t$  и  $f$  соответственно время и частота, наблюдаемая в данный момент времени в спектре вистлера. При определении дисперсии использовали подход, описанный в работе [Гершман и Угаров, 1960], в котором через промежутки времени, в нашем случае равные 60 мс, производится отсчет частоты, затем строится график  $t = 1/\sqrt{f}$  и дисперсия определяется, как тангенс угла наклона прямой (см. рис. 3). Поскольку прямые располагаются настолько близко, что трудно различимы при большом числе обработанных сигналов, то на рисунке приведены результаты обработки трех последовательно зарегистрированных вистлеров. Из рисунка 3 видно, что дисперсии стандартных и нестандартных вистлеров практически одинаковы. Отсюда следует вывод, что вистлеры прошли через одну и ту же область магнитосферы, физические свойства которой и определили одинаковые дисперсии стандартного и нестандартного вистлеров.

Аналогично мы можем получить дисперсию боковых частот и затем сравнить ее с дисперсией вистлера. Если дисперсия боковых частот нестандартного вистлера формировалась в той же области магнитосферы, что и дисперсия вистлера, то мы должны иметь такую же картину соотношения дисперсий, как и в предыдущем случае. Однако получилась совсем иная картина. Оказалось, что дисперсии вистлера и боковых частот отличаются, что особенно заметно для низких частот возмущающего импульса (см. рис. 4). Следовательно, формирование дисперсии боковых частот происходило в другой области магнитосферы, т.е. возмущающая волна имеет другую траекторию, не проходящую через вершину силовой линии. В этом случае взаимодействие вистлера и возмущающей волны может быть только на исходящем участке траектории вистлера.

Для минимизации возможного проявления естественных причин в экспериментальных данных, проанализируем геомагнитную обстановку и вариации числа вистлеров во время наблюдений. Известно, например, [Молчанов, 1985], что магнитосфера является источником целого ряда низкочастотных излучений, которые, как правило, формируются при магнитосферных возмущениях. Но до настоящего времени не фиксировались дискретные ОНЧ излучения естественного происхождения частотой 1.1 кГц и длительностью одна секунда. Для оценки степени возмущенности магнитного поля Земли воспользуемся планетарным [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>] и локальным (обс. “Паратунка”) магнитными индексами. Из их анализа следует, что 20 июля накануне рассматриваемого события была маг-

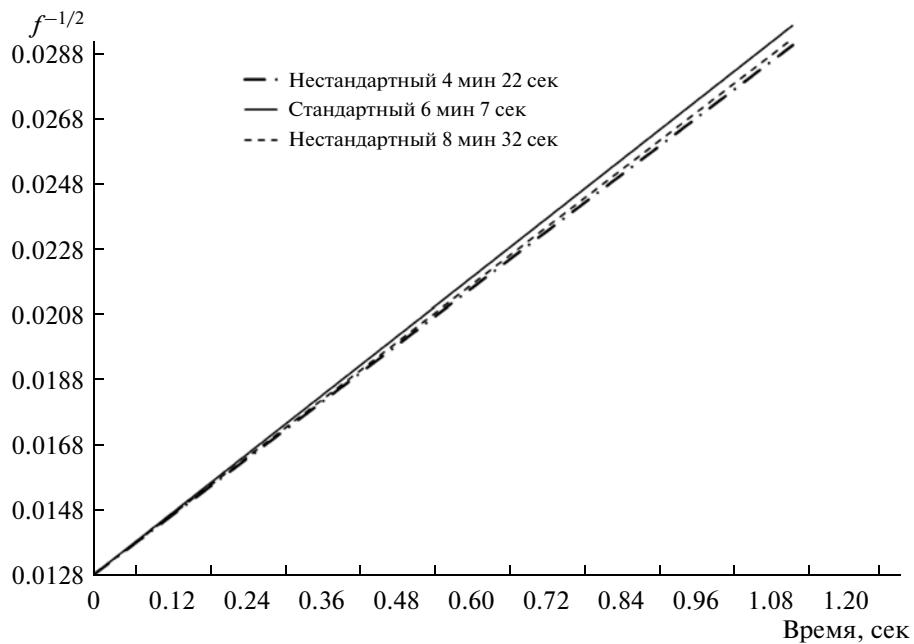


Рис. 3. Дисперсия последовательности вистлеров 21 июля 2011 года.

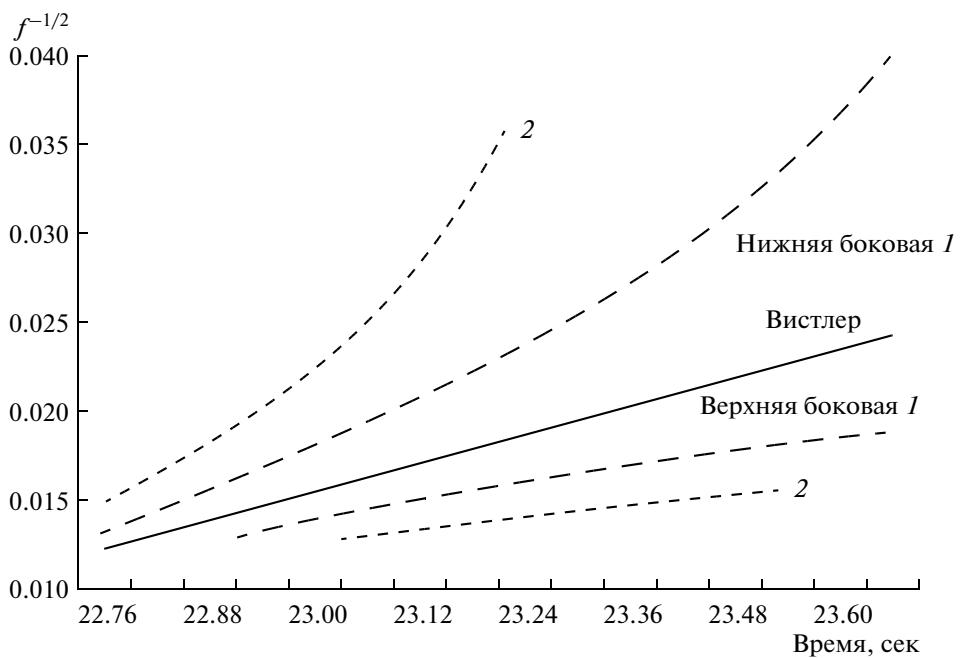


Рис. 4. Дисперсия спектральных линий нестандартного вистлера.

нитная буря с суммарным индексом геомагнитной активности  $K_p = 26+$  (по обс. "Паратунка"  $K = 23$ ), интенсивность которой на фазе восстановления 21 июля несколько снизилась  $K_p = 21-$  ( $K = 17$ ). Такое возмущение магнитного поля Земли способствует изменению коэффициента рефракции в плазме, что может оказаться дополнительным фактором, способствующим проявлению на

Камчатке низкочастотного излучения, сформированного на Аляске.

Проанализируем вероятные причины существенных отличий спектральных характеристик вистлеров. Амплитуда сигналов в наших наблюдениях имеет динамический диапазон порядка 50 дБ, а вистлеров – в пределах 20–25 дБ по напряжению. Следовательно, в регистрирующей аппаратуре

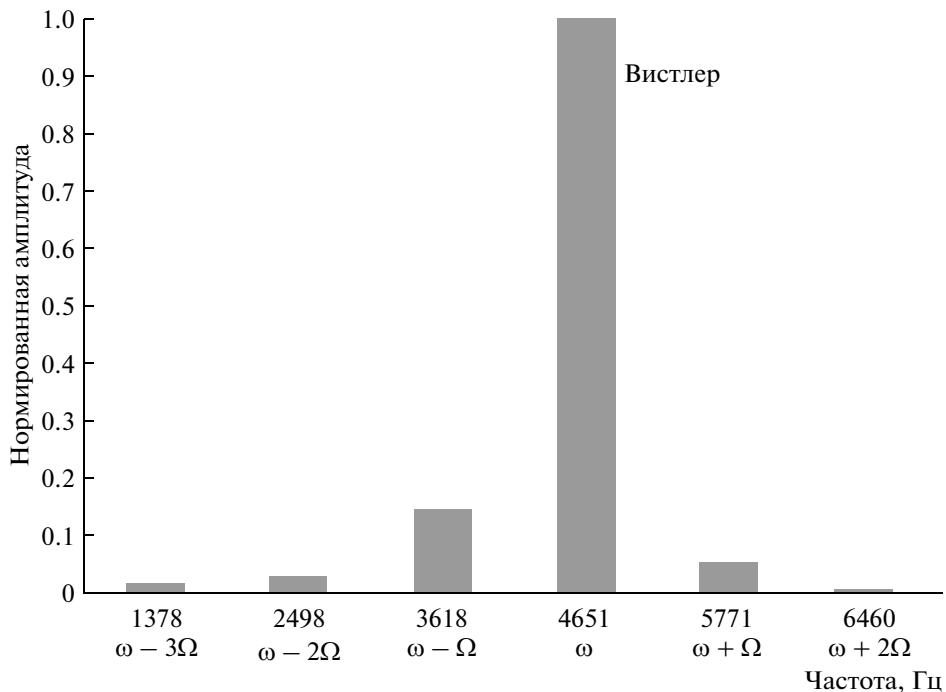


Рис. 5. Распределение спектральных линий относительно частоты вистлера 21 июля 2011 года 00:08:32 UT.

нельзя исключить проявления нелинейных явлений. Характерным признаком нелинейности является появление кратных высших гармоник. В спектрах нестандартных вистлеров (рис. 5) такой кратности установить не удалось. Но если за центральную частоту взять спектральную линию вистлера, то окажется, что остальные спектральные линии располагаются симметрично относительно нее (рис. 5). Симметричное расположение боковых частот относительно центральной, ее еще называют несущей, характерно для амплитудной модуляции, уравнение которой можно записать, как

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

где  $U_0$  — амплитуда несущей частоты;  $\omega$  — несущая частота (частота вистлера);  $\Omega$  — модулирующая частота (частота возмущающей волны);  $M$  — глубина модуляции,  $n$  — номер гармоники возмущающей волны. Поскольку несущим колебанием является вистлер, то модулирующий импульс, исходя из спектрограммы, представленной на рис. 5, имеет частоту около 1.1 кГц. Из рисунка 1б видно, что модуляция продолжается не все время существования вистлера. Если предположить, что вистлер и возмущающий импульс проходят через некоторую область магнитосферы одновременно, тогда длительность возмущающего импульса равна времени от начала вистлера до момента окончания модуляции, т.е. около 1 с. Полученные экспериментальным путем параметры возмущающе-

го импульса достаточно хорошо совпадают с параметрами электромагнитных излучений, генерируемых на тот момент в рамках работы HAARP [<http://www.haarp.alaska.edu>], параметры модулирующей частоты которой показаны на рис. 2.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Обнаружена модуляция вистлеров низкочастотными электромагнитными импульсами, которая проявляется в появлении боковых частот относительно вистлера и по времени совпадающая с активным воздействием на ионосферу в рамках программы HAARP.

2. Исходя из частоты 1.1 кГц и длительности 1 с модуляции, совпадающей с модуляционной схемой электромагнитного излучения декаметрового диапазона, вероятнее всего, возмущающее низкочастотное излучение сформировано комплексом HAARP.

3. Эффект модуляционного воздействия на вистлер происходит на нисходящей части его траектории.

Авторы считают приятным долгом выразить признательность академику А.В. Гуревичу за внимание и интерес к работе.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН №4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Будько Н.И., Карпман В.И., Похотов О.А.* О нелинейных эффектах при распространении монохроматических ОНЧ волн (геликонов) в магнитосфере // Письма в ЖЭТФ. Т. 14. С. 469–471. 1971.
- *Гершман Б.Н., Угаров В.А.* Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней ионосфере // Успехи физич. наук. Т. LXXII. Вып. 2. С. 235–271. 1960.
- *Капустина О.В., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М.* Особенности амплитудных спектров свистящих атмосфериков на частотах ниже 1 кГц (ИСЗ “Интеркосмос-5” и “Интеркосмос-14”) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. № 3. С. 457–462. 1981.
- *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. Т. 25. С. 237–240. 1977.
- *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.
- *Молчанов О.А., Маркеева Ю.М.* Методика обработки и интерпретации динамических спектров свистящих атмосфериков с целью определения электронной концентрации в магнитосфере Земли. М.: ИЗМИРАН, 64 с. 1974.
- *Молчанов О.А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околосземной плазме. М.: Hayka, 224 с. 1985.
- *Сивоконь В.П., Дружин Г.И., Поддельский И.Н., Поддельский А.И., Аллахулиев Ю.Б., Тарабенко Д.В., Цуканов А.В., Шумилов Ю.С.* Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // Электросвязь. № 8. С. 9–11. 2004.
- *Сивоконь В.П., Дружин Г.И.* Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 4. С. 492–496. 2006.
- *Сивоконь В.П.* Вариации шумов коротковолнового диапазона как результат модификации ионосферы // Электросвязь. № 1. С. 54–58. 2009.
- *Barrington R.E., Berlose J.S.* Preliminary results from the very-low-frequency receiver aboard Canada's Alouette satellite // Nature. 198 (4881). 651–656. 1963.
- *Carpenter D.L.* Electron-from variation in the magnetosphere deduced whistler data // J. Geophys. Res. V. 67. P. 345–360. 1962.
- *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. <http://vlf.stanford.edu/pubs/history-very-low-frequency-vlf-radio-research-stanford>
- *Gołkowski 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 // J. Geophys. Res. V. 113. A10201. doi:10.1029/2008JA013157. 2008.
- *Gołkowski M., Inan U.S., Gibby A.R., Cohen M.B.* Cross modulation of whistler mode and HF waves above the HAARP ionospheric heater // J. Geophys. Res. Lett. V. 36. L15103. doi:10.1029/2009GL039669. 2009.
- *Graf K.L., Inan U.S., Spasojevic M.* Transmitter-induced modulation of subionospheric VLF signals: Ionospheric heating rather than electron precipitation // J. Geophys. Res. V. 116. A12313. doi:10.1029/2011JA016996. 2011.
- *Helliwell RA., Carpenter D.L.* Whistlers west—results from the igy/igc-59 synoptic program // IGY Bull., NAS. 57. P. 1–9. 1961.
- *Inan U., Bell T.* The plasmapause as a VLF wave guide // J. Geophys. Res. V. 82. P. 819–827. 1977.
- *Kimura I.* Effect of ions on whistler-mode ray tracing // Radio Science. 1 (3). P. 263–283. 1966.
- *Park C.G., Carpenter D.L.* Very low frequency radio waves in the magnetosphere // Upper atmosphere research in Antarctica // Antarctic Research Series. V. 29. P. 73–99. 1978.
- *Sharma R.P., Goldstein M.L., Dwivedi N.K., Chauhan P.K.* Whistler propagation and modulation in the presence of nonlinear Alfvén waves // J. Geophys. Res. V. 115. doi:10.1029/2009JA015123. 2010.
- *Storey L.R.O.* An investigation of whistling atmospherics // Phil. Trans. Royal Soc. (London) A 246. P. 13–41. 1953.
- *Streltsov A.V., Gołkowski M., Inan U.S., Papadopoulos K.D.* Effect of frequency modulation on whistler mode waves in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 114. A08214. doi:10.1029/2009JA014155. 2009.
- *Watt C.E.J., Rankin R., Degeling A. W.* Whistler mode wave growth and propagation in the prenoon magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 117. doi: 10.1029/2012JA017765. 2012.
- *Inan U., Bell T.* The plasmapause as a VLF wave guide // J. Geophys. Res. V. 82. P. 819–827. 1977.
- *Storey L.R.O.* An investigation of whistling atmospherics // Phil. Trans. Royal Soc. (London) A 246. P. 113–141. 1953.