



УДК 550.388.2

ЭФФЕКТЫ НАГРЕВА НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ. 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ

В.В. Алпатов¹, А.Г. Высоцкий¹, И.А. Гребнев¹, М.Г. Деминов², А.Ю. Репин¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк, Россия

Представлена упрощенная модель для амплитуды магнитного поля низкочастотных радиоволн на поверхности Земли (ΔB_{geom}), генерируемых в нижней ионосфере при нагреве ионосферы мощным КВ излучением стелла с геометрической модуляцией. Амплитуда КВ излучения стелла не меняется со временем при такой модуляции и пятно излучения стелла (главный лепесток диаграммы направленности антенно-фидерной системы стелла) в нижней ионосфере описывает замкнутую траекторию с низкой частотой, что и является источником генерации радиоизлучения на этой низкой частоте. Элементом модели является отношение амплитуд магнитного поля низкочастотных радиоволн для геометрической и амплитудной модуляций ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) на поверхности Земли при прочих равных условиях. Это отношение, по-видимому, получено впервые, содержит только частоту модуляции стелла и геометрические факторы, т.е. зависит от гораздо меньшего числа параметров, чем ΔB_{geom} или ΔB_{amp} . В разработанной модели учтено, что на расстояниях 70-80 км от стелла происходит захват низкочастотных радиоволн в волновод Земля-ионосфера и отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ для захваченных волн перестает зависеть от расстояния до стелла. На основе сопоставления с данными экспериментов получено, что модель правильно отражает экспериментально наблюдаемые зависимости $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ от частоты модуляции стелла F , включая большие расстояния от стелла, где $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} > 1$ на частотах $F > 3$ кГц с максимумом этого отношения на частоте $F \approx 6$ кГц для круговой геометрической модуляции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА, НАГРЕВ, НИЗКОЧАСТОТНОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ, ГЕНЕРАЦИЯ, МОДЕЛЬ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_36_67

<https://elibrary.ru/ivwtaf>

1. ВВЕДЕНИЕ

Амплитудная модуляция является основным способом генерации низкочастотного радиоизлучения в области омического нагрева нижней ионосферы мощным коротковолновым (КВ) излучением стелла. Омический нагрев ионосферы мощным КВ излучением приводит к сильному увеличению температуры электронов T_e и, как следствие, изменению частоты столкновений электронов, от которых зависят проводимости ионосферы и, следовательно, токи в ионосфере [Gurevich, 1978; Гуревич, 2007]. Поэтому КВ излучение стелла с амплитудной модуляцией на низкой



частоте Ω приводит к изменению токов в ионосфере с частотой Ω и, как следствие, к генерации электромагнитных волн ионосферными токами с частотой, равной частоте модуляции коротковолнового радиоизлучения (эффект Гетманцева) [Гетманцев и др., 1974].

Целью данной работы было создание упрощенной модели генерации и распространения низкочастотного излучения при омическом нагреве нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением стенда на средних и высоких широтах. Эта работа состояла из нескольких этапов. На первом этапе было представлено уравнение для T_e в нижней ионосфере. С помощью этого уравнения были проанализированы свойства изменения T_e при нагреве нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением с амплитудной модуляцией на низких частотах. Результаты этого этапа отражены в первой части публикаций на данную тему [Алпатов и др., 2022а]. Далее, был проведен анализ особенностей изменения проводимостей и токов в ионосфере при таком нагреве нижней ионосферы [Алпатов и др., 2022б]. На следующем этапе в модель были включены уравнения, описывающие генерацию и распространение низкочастотного радиоизлучения при омическом нагреве нижней ионосферы мощным КВ излучением стенда с амплитудной модуляцией [Алпатов и др., 2022в].

Амплитудная модуляция КВ излучения стенда не является единственным способом генерации низкочастотного радиоизлучения при омическом нагреве нижней ионосферы мощным КВ излучением. Другим перспективным способом генерации низкочастотного излучения при омическом нагреве нижней ионосферы мощным КВ излучением является геометрическая модуляция. При такой модуляции амплитуда КВ излучения стенда не меняется со временем и пятно излучения стенда (главный лепесток диаграммы направленности антенно-фидерной системы стенда) в нижней ионосфере описывает замкнутую траекторию с низкой частотой Ω , что и является источником генерации радиоизлучения на частоте Ω [Cohen et al., 2008; 2010а; 2010б]. Геометрическая модуляция исследовалась экспериментально с помощью стенда НААРР и численно с помощью трехмерной модели генерации и распространения низкочастотных волн в ионосфере, которая ниже названа 3D моделью [Cohen et al., 2010а; 2010б]. Целью данного этапа работ было получение аналитических соотношений для амплитуд низкочастотных волн, генерируемых при геометрической модуляции, для расширения возможностей создаваемой нами модели генерации и распространения низкочастотного излучения при омическом нагреве нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением.

Ниже последовательно представлены результаты анализа свойств низкочастотных радиоволн, генерируемых в нижней ионосфере мощным КВ излучением при геометрической модуляции с учетом результатов, полученных на предыдущем этапе [Алпатов и др., 2022в] по амплитудной модуляции. Далее приведено сопоставление с экспериментом и результатами трехмерного моделирования. В обсуждении дополнительно рассмотрены некоторые другие виды амплитудно-фазовой модуляции КВ излучения стенда. Основные результаты этого анализа суммированы в заключении.

Для удобства чтения, в ссылках на уравнения из предыдущих публикаций [Алпатов и др., 2022а; 2022б, 2022в] добавлены цифры 1, 2 или 3, например, уравнение (4.3) означает, что это уравнение (4) из публикации [Алпатов и др., 2022в]. Приведенные ниже уравнения записаны в системе единиц СИ, если не оговорено противное.

2. ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ

Мощное коротковолновое (КВ) радиоизлучение стенда приводит к сильному увеличению температуры электронов T_e в нижней ионосфере из-за омического нагрева и, как следствие, к изменению частоты столкновений электронов, от которых зависят проводимости и токи в ионосфере [Gurevich, 1978; Гуревич, 2007]. Амплитудная модуляция этого излучения на низкой частоте Ω приведет к колебаниям T_e , проводимостей и горизонтальных токов в нижней ионосфере на этой частоте. Модуляция токов в ионосфере в области нагрева с амплитудой ΔJ можно представить как антенну в виде ионосферного диполя (аналога диполя Герца), излучающую радиоволны на частоте Ω , и момент этого диполя:

$$\mathbf{M} = M \mathbf{e}_x, \quad M = \pi a^2 \Delta J, \quad (1)$$

где πa^2 – площадь кругового пятна засветки ионосферы мощным КВ излучением на высоте z_0 – высоте максимума модуляции холловской проводимости ионосферы $\Delta\sigma_H$, которая обычно расположена в интервале 75-80 км, ось x направлена вдоль фонового горизонтального тока в ионосфере. Момент $\mathbf{M}$

ионосферного диполя является важным параметром антенны в ионосфере. Более информативной для анализа и практических приложений может быть амплитуда индукции магнитного поля радиоволны с частотой Ω на поверхности Земли на расстоянии R от источника волны (ионосферного диполя), который расположен на высоте $z_0 \approx 75\text{--}80$ км:

$$\Delta B_{\text{amp}} = (\mu_0/4\pi) M (z_0/R^3) (1 + (kR)^2)^{1/2} \quad (2)$$

где ΔB_{amp} – амплитуда индукции магнитного поля радиоволны с частотой Ω на поверхности Земли при амплитудной модуляции (в Тл), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, $k = \Omega/c$, c – скорость света, M – момент ионосферного диполя, который описывается уравнением (1), все величины измеряются в системе единиц СИ. В уравнении (2) приведено абсолютное значение ΔB для упрощения записи. В волне направления векторов $\Delta \mathbf{B}$ и $\mathbf{M}$ ортогональны, и вектор $\mathbf{M}$ параллелен фоновому току $\mathbf{J}_0$ в области источника волны (т.е. в области антенны в виде ионосферного диполя). Уравнения (1) и (2) совпадают с уравнениями (4.3) и (6.3) модели генерации низкочастотных волн при амплитудной модуляции мощного КВ радиоизлучения стенда [Алпатов и др., 2022в]. В уравнении (1) амплитуда модуляции токов ΔJ зависит от фонового электрического поля, фоновых проводимостей ионосферы и амплитуды колебаний этих проводимостей из-за нагрева ионосферы мощным КВ излучением с амплитудной модуляцией, т.е. зависит от фоновых параметров среды и параметров радиоизлучения стенда. Эти зависимости описываются уравнениями (1.3)–(3.3) [Алпатов и др., 2022в]. В свою очередь, зависимость амплитуды колебаний проводимостей ионосферы от параметров радиоизлучения стенда определяется на основе численного решения уравнения (1.1) для температуры электронов T_e и учета зависимости проводимостей ионосферы от T_e [Алпатов и др., 2022а].

По аналогии с амплитудной модуляцией рассмотрим амплитуду индукции магнитного поля низкочастотной волны ΔB на поверхности Земли на расстоянии d от стенда HAARP в плоскости x, z для круговой геометрической модуляции (рис. 1).

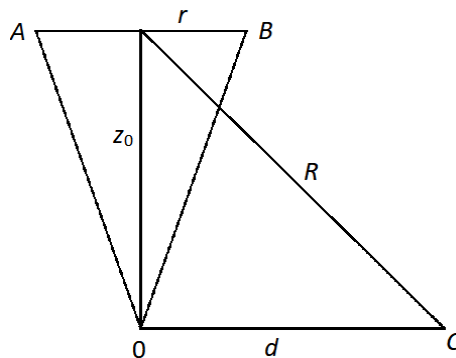


Рис. 1. Схематическая картина круговой геометрической модуляции в декартовых координатах x, z . Нагревный стенд расположен в точке O ($x = 0, z = 0$), приемник расположен в точке C на расстоянии d от стенда ($x = d, z = 0$), пятно нагрева ионосферы на высоте $z = z_0$ движется по кругу радиусом r с частотой Ω , т.е. оказывается в точках A и B в процессе этого движения, R – расстояние от центра этого круга до приемника, т.е. $R^2 = z_0^2 + d^2$

Эта схема применима и для пилообразной геометрической модуляции для варианта, когда пятно нагрева движется между пунктами A и B по прямой линии с частотой Ω . Отметим, что для амплитудной модуляции с частотой Ω пятно нагрева расположено над стендом с координатами $x = 0, z = z_0$ и уравнение (2) дает амплитуду индукции магнитного поля волны в точке C (в приемнике) для этой модуляции.

На фиксированной высоте пятно излучения пересекает фиксированную точку на заданной траектории геометрической модуляции в течение определенной части периода этой модуляции. Поэтому излучение в каждой точке траектории подобно прямоугольной модуляции, в которой степень заполнения периода модуляции зависит от соотношения между диаметром пятна нагрева (засветки) на данной высоте и длиной траектории геометрической модуляции луча на этой высоте за один период модуляции.

Экспериментальные данные показали, что геометрическая модуляция эффективнее амплитудной модуляции на частотах модуляции $F = \Omega/2\pi$ больше 3 кГц [Cohen et al., 2008; 2010a]. Из всех известных нагревных стендов КВ диапазона такую частоту сканирования луча может обеспечить только стенд НААРР. Для НААРР угол отклонения центрального луча от вертикали не превышает 15° [Cohen et al., 2010b]. Тангенс этого угла равен отношению r/z_0 на рис. 1. Для круговой геометрической модуляции с частотой 3 кГц и отклонением центрального луча антенно-фидерной системы (АФС) от вертикали, равным 15° , можно получить, что на высоте 75 км центральный луч будет перемещаться со скоростью $3.7 \cdot 10^8$ м/с, и эта скорость больше скорости света. Следовательно, геометрическая модуляция эффективна для условий, когда скорость перемещения луча вдоль траектории модуляции превышает скорость света.

Следует отметить, что технически пятно нагрева не может непрерывно перемещаться по кругу, поскольку в этом случае возникло бы перекрытие пятен (это невозможно, поскольку фазированная решетка создает одно пятно). Поэтому для типичных условий (несущая частота 3.25 МГц, угол отклонения центрального луча АФС 15°) вдоль круга уместится примерно 8 пятен нагрева, т.е. 8 положений центрального луча АФС [Cohen et al., 2010b]. Поэтому геометрическая модуляция является амплитудно-фазовой модуляцией. Для круговой геометрической модуляции на частоте 3 кГц скорость перемещения центрального луча между этими положениями пятен превышает скорость света, что отмечалось выше.

Для условий, когда скорость перемещения луча превышает скорость света, фактически генератором низкочастотного излучения является вся область траектории нагрева нижней ионосферы на высоте $z_0 \approx 75$ -80 км с учетом сдвига фазы между соседними областями. Это позволяет представить амплитуду индукции магнитного поля низкочастотной радиоволны ΔB_{geom} на поверхности Земли (в точке С на рис. 1), обусловленной геометрической модуляцией с частотой Ω , в виде:

$$\Delta B_{\text{geom}} / \Delta B_{\text{amp}} = 2.6 \{ \sin \Theta - 2(r/R) [1 - (z_0/R)^2]^{1/2} X \cos \Theta \} \quad (3)$$

$$\Theta = kr [1 - (z_0/R)^2]^{1/2}, \quad X = kR / [1 + (kR)^2]^{1/2}$$

где ΔB_{amp} – амплитуда индукции магнитного поля низкочастотной волны, обусловленной амплитудной модуляцией с частотой Ω , в той же точке С на поверхности Земли, которая определяется уравнением (2), $k = \Omega/c$, c – скорость света, остальные обозначения пояснены на рис. 1. Уравнение (3) дает отношение амплитуд низкочастотных волн на поверхности Земли, обусловленных геометрической и амплитудной модуляцией, при прочих равных условиях, включая несущую частоту f , эффективную излучаемую мощность на этой частоте, частоту модуляции $F = \Omega/2\pi$, географические координаты, дату и мировое время, параметры ионосферы и термосферы. Коэффициент в этом уравнении подобран на основе сопоставления с данными измерений. Из уравнения (3) видно, что отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ зависит только от частоты модуляции Ω и геометрических факторов, т.е. от гораздо меньшего числа параметров, чем амплитуда ΔB_{amp} (см. уравнение (2)). Получение этого уравнения является одним из важных результатов данного этапа работ. Нам не известны подобные результаты на эту тему. Подстановка уравнения (2), т.е. явного вида ΔB_{amp} , в (3) позволяет получить уравнение для ΔB_{geom} . Здесь будем интересоваться отношением $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ из-за большей универсальности этой величины.

Для краткости изложения будем называть отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ относительной амплитудой магнитного поля при геометрической модуляции. Для наглядности на рис. 2 показаны зависимости этого отношения от расстояния между приемным пунктом и стендом НААРР (на рис. 1 это расстояние d). Следует отметить, что к настоящему времени такая модуляция возможна только для НААРР.

Из данных на рисунке 2 видно, что непосредственно под центром области нагрева (в точке 0 на рис. 1) волна с частотой F отсутствует, поскольку области кольца нагрева ионосферы симметричны относительно этой точки и в сумме волны оказываются противофазными. На расстоянии, большем чем 30-40 км, геометрическая модуляция эффективнее амплитудной модуляции (т.е. $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} > 1$) для частот 4 и 6 кГц. Для частоты 6 кГц на расстоянии примерно 60-80 км наблюдается максимум отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$. Этот максимум будет наблюдаться и для частоты 4 кГц, но на гораздо большем расстоянии. Следует отметить, что на расстоянии примерно 70-80 км происходит захват анализируемых волн в волновод Земля-ионосфера, и для приближенных оценок можно принять, что отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ почти не меняется по мере дальнейшего распространения волн в этом

волноводе. Это учтено при сопоставлении с данными экспериментов на большом удалении от стенда, которое приведено ниже.

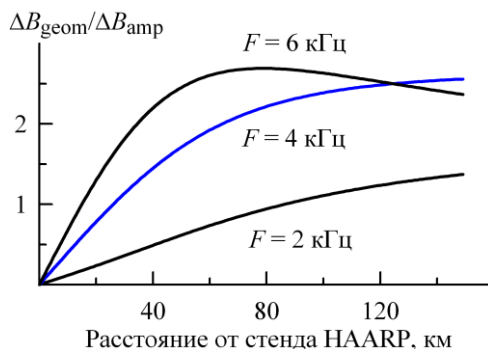


Рис. 2. Зависимость относительной амплитуды магнитного поля волны на поверхности Земли при геометрической модуляции $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ от расстояния между приемным пунктом и стендом HAARP для трех фиксированных частот модуляции F

Следует отметить, что уравнение (3) применимо и для пилообразной геометрической модуляции с той особенностью, что пилообразное движение пятна нагрева происходит в плоскости, в которой находится точка, где принимается волна, т.е. точка C на рисунке 1. В плоскости, ортогональной к пилообразному движению пятна нагрева, отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} \sim 1$.

3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Самое полное (из опубликованных) сопоставление экспериментальных данных по амплитудной модуляции с данными по амплитудно-фазовым модуляциям было выполнено 16.03.2008 года в интервале 13:00-16:00 UT (более точная привязка по времени не приведена) с помощью нагревного стенда HAARP [Cohen et al., 2010a]. Для стенда HAARP интервал 13:00-16:00 UT примерно соответствует интервалу местного времени 3:20-6:20 LT. Измерения амплитуды индукции магнитного поля волн, генерируемых в нижней ионосфере стендом HAARP, проводились в Chistochina (примерно в 37 км от HAARP) и в двух разнесенных пунктах Juneau и Kodiak, расположенных в почти ортогональных направлениях от HAARP (на юго-восток и юго-запад) на расстояниях примерно в 700 км от HAARP. Стенд HAARP работал на несущих частотах f , равных 2.75 или 3.25 МГц с эффективной излучаемой мощностью примерно 420 и 575 МВт на этих частотах [Cohen et al., 2010a]. Использовались режимы генерации низкочастотного излучения в диапазоне 2.5-8.3 кГц, в том числе: а) прямоугольная амплитудная модуляция (в первую половину периода этой модуляции стенд включен, во вторую половину этого периода он выключен, и центральный луч не меняет положения); б) геометрическая модуляция, когда центральный луч описывает замкнутую траекторию с частотой, которая равна частоте модуляции, и амплитудной модуляции не происходит, т.е. стенд работает непрерывно. Во всех случаях угол отклонения луча от вертикали не превышал 15° . Для каждого из этих режимов генерации низкочастотного излучения было осуществлено два способа этой генерации. Аксиально-симметричный способ: для амплитудной модуляции – излучение вертикально вверх, для геометрической модуляции – круговое движение. Направленный способ: для амплитудной модуляции – нагрев при фиксированном наклоне луча, для геометрической модуляции – пилообразное движение, т.е. движение по прямой линии туда и обратно с частотой модуляции F . Период каждого из этих режимов и способов генерации низкочастотного излучения занимал интервал времени около 0.4 мс, затем изменялись частота модуляции или режим модуляции и работа стенда продолжалась. Данные этого эксперимента анализировались на основе полной трехмерной волновой модели генерации низкочастотного радиоизлучения и распространения этого излучения [Cohen et al., 2010b]. Эта модель здесь была названа 3D моделью.

На рисунке 3 показаны зависимости отношения амплитуд индукции магнитного поля волны на поверхности Земли при круговой (аксиально-симметричной) геометрической модуляции и

амплитудной модуляции ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) от частоты в трех анализируемых пунктах по экспериментальным данным, по 3D модели и разработанной модели, т.е. по уравнению (3). Отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ названо относительной амплитудой магнитного поля на поверхности Земли при круговой геометрической модуляции для краткости изложения.

Выше отмечалось, что на расстоянии $d \approx 70\text{--}80$ км от стенда происходит захват анализируемых волн в волновод Земля-ионосфера, и для приближенных оценок можно принять, что отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ почти не меняется по мере дальнейшего распространения волн в этом волноводе. Поэтому в уравнении (3) принято, что $d = 75$ км, если расстояние от анализируемого пункта до стенда больше 75 км. Это учтено в данных вычислений по разработанной модели на рис. 3.

Из данных на рисунке 3 видно, что разработанная модель в целом согласуется с экспериментальными данными, включая появление максимума отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ на частотах модуляции $F \approx 6$ кГц на большом удалении от HAARP и отсутствие этого максимума вблизи HAARP. Следует отметить, что нам неизвестны точное время эксперимента (внутри широкого интервала 13:00–16:00 UT) и точная несущая частота ($f = 2.75$ или 3.25 МГц), но для разработанной модели эти параметры не требуются, поскольку отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ не зависит от них и многих других параметров. Необходимо только, чтобы измерения ΔB_{geom} и ΔB_{amp} были проведены при близких условиях, что было выполнено в данном эксперименте. По этой же причине зависимости $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ от F по разработанной модели совпадают для Juneau и Kodiak. Соответствие разработанной модели экспериментальным данным косвенно означает, что были оправданы предположения, на которых основана разработанная модель. В данном случае 3D модель уступает по точности разработанной модели, что особенно заметно для частот модуляции $F \geq 6$ кГц. Одна из причин этого связана с тем, что в 3D модели вычисления ΔB_{geom} и ΔB_{amp} были выполнены отдельно.

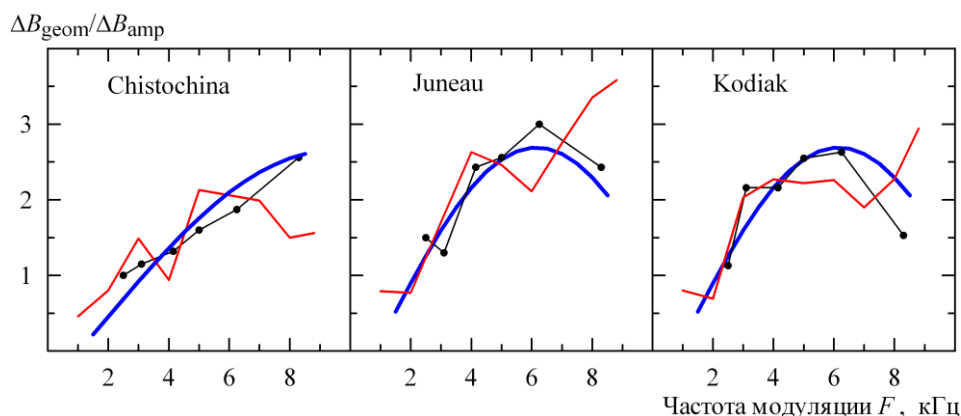


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды магнитного поля радиоволн на поверхности Земли при круговой геометрической модуляции ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) в трех пунктах Chistochina (примерно 37 км от HAARP), Juneau и Kodiak (примерно 700 км от HAARP на юго-восток и юго-запад) 16.03.2008 года по экспериментальным данным (точки), по 3D модели (тонкие красные линии) и по разработанной модели (толстые синие линии)

Выше отмечалось, что разработанная модель применима и для пилообразной геометрической модуляции, которую называют также направленной модуляцией, поскольку движение луча радара на высоте максимума нагрева ионосферы происходит горизонтально вдоль линии определенного направления (туда и обратно между крайними точками). В этом случае вдоль этого направления отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ описывается уравнением (3), а поперек этого направления $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} \approx 1$, т.е. эффективности геометрической и амплитудной модуляций совпадают. Сравнение разработанной модели с экспериментальными данными и 3D моделью для пилообразной геометрической модуляции приведено на рисунке 4. Это был эксперимент 16.03.2008 года, который был упомянут выше.

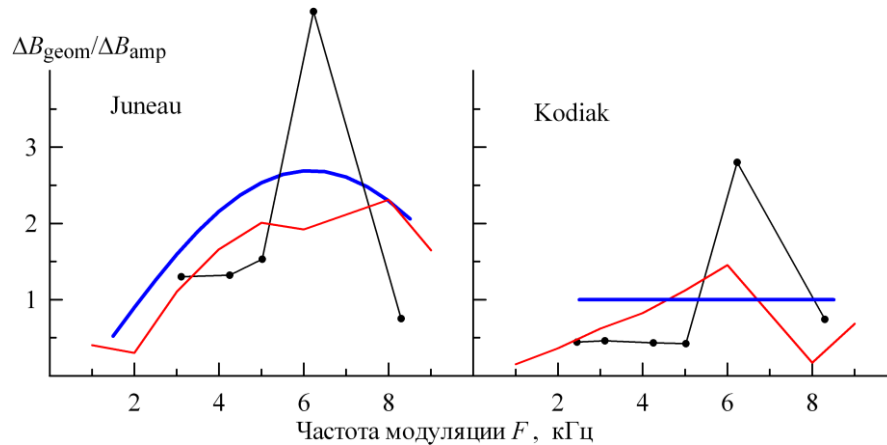


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды магнитного поля радиоволн на поверхности Земли при пилообразной геометрической модуляции ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) в направлении Juneau по данным измерений в Juneau и в Kodiak 16.03.2008 года по экспериментальным данным (точки), по 3D модели (тонкие красные линии) и по разработанной модели (толстые синие линии). Пункты Juneau и в Kodiak расположены в почти ортогональных направлениях на расстояниях ~ 700 км от HAARP

Из данных на рисунке 4 можно видеть, что в целом разработанная модель передает тенденции изменения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ с частотой модуляции F . Экспериментальные данные и разработанная модель показывают, что отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ в Juneau больше, чем в Kodiak, почти на всех частотах F . В Juneau максимум этого отношения на частоте $F \approx 6$ кГц наблюдается как по экспериментальным данным, так и по разработанной модели. В данном случае, 3D модель и разработанная модель обладают примерно одинаковой точностью, т.е. 3D модель в целом передает общие тенденции в зависимости $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ от частоты.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные оценки и сопоставления с экспериментом на рисунках (3) и (4) показали, что разработанная модель относительной амплитуды магнитного поля радиоволн на поверхности Земли при геометрической модуляции ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) передает тенденции изменения этой амплитуды с частотой модуляции F . Это означает, что является оправданным предположение о постоянстве отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ на расстоянии больше 75 км от стенда из-за захвата низкочастотных радиоволн в волновод Земля-ионосфера. Следовательно, по данным отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ на больших расстояниях от стенда можно судить о степени захвата низкочастотных радиоволн в волновод Земля-ионосфера.

Из экспериментальных данных и результатов расчетов по разработанной модели следует, что на расстоянии ~ 700 км от стенда отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} > 1$ на частотах $F > 3$ кГц и максимально на частоте модуляции $F = 6$ кГц, когда $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} \approx 2.8$ (рис. 3). Этот максимум виден и на рис. 2 на расстоянии 75 км от стенда, поскольку на расстоянии больше 75 км от стенда отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ остается постоянным (не зависит от расстояния) из-за захвата низкочастотных радиоволн в волновод Земля-ионосфера. Из приведенных данных следует, что на расстоянии больше 75 км на частоте модуляции $F = 6$ кГц геометрическая модуляция гораздо эффективнее амплитудной модуляции, поскольку при геометрической модуляции стенд включен постоянно. Кроме того, эффективный радиус излучения (r на рис.1) для геометрической модуляции больше радиуса a пятна засветки ионосферы мощным КВ излучением для амплитудной модуляции. При круговой геометрической модуляции пятно засветки радиуса a движется по кругу радиуса r и $r > a$.

Подстановка уравнения (2) в (3) позволяет получить уравнение для абсолютного значения амплитуды магнитного поля радиоволн на поверхности Земли при геометрической модуляции ΔB_{geom} . Это полученное уравнение имеет гораздо больше ограничений, чем (3), и реально применимо только для горизонтальных расстояний меньше 70 км от стенда, поскольку в нем не учтен захват низкочастотных волн в волновод Земля-ионосфера. Кроме того, не учтены резонансы волновода Земля-ионосфера, которые могут быть существенны даже на расстоянии меньше 70 км. В этом основная

причина, почему сравнение с экспериментом на больших расстояниях стенда приведено для отношения $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ и не приведено для величины ΔB_{geom} .

Геометрическая модуляция не является единственным способом амплитудно-фазовой модуляции мощного КВ излучения для генерации низкочастотного излучения с помощью такого типа модуляции. К одному из способов амплитудно-фазовой модуляции КВ излучения стенда относят точечную модуляцию, когда движение луча происходит от точки к точке со скоростью меньше скорости света, сам луч является амплитудно-модулированным сигналом. Эксперименты показали, что на большом расстоянии от стенда геометрическая модуляция эффективнее точечной модуляции, по крайней мере на частотах модуляции больше 3 кГц [Cohen et al., 2010a]. Одна из причин этого состоит в том, что при точечной модуляции излучение амплитудно-модулировано, при геометрической модуляции оно непрерывно.

Еще один способ генерации низкочастотного излучения основан на использовании двух разнесенных источников КВ излучения (на расстоянии D) с разными частотами ω_1 и ω_2 , которые облучают одну и ту же область нижней ионосферы, и требуемая низкая частота $\Omega = \omega_1 - \omega_2$. Такое излучение происходит непрерывно, т.е. без амплитудной модуляции. Поэтому данный способ создания низкочастотного излучения называют «незатухающее колебание» (CW, continuous wave) [Barr and Stubbe, 1997] или «двойная частота» (DF, double frequency) [Villasenor et al., 1996] или «волна биений» (BW, beat wave) [Cohen et al., 2012], чтобы отличить от амплитудной модуляции [Barr and Stubbe, 1997]. Ниже использован термин «волна биений» (BW). Эксперименты на различных нагревных стендах показали, что модуляция на волне биений эффективнее амплитудной модуляции на частотах модуляции $F > 5$ кГц [Котик и др., 1986; Villasenor et al., 1996; Barr and Stubbe, 1997]. Результаты численного моделирования подтвердили этот вывод [Cohen et al., 2012].

Из представленных результатов следует, что амплитудная модуляция эффективнее геометрической модуляции на частотах модуляции меньше примерно 3 кГц. Этот вывод, по-видимому, справедлив и для других видов амплитудно-фазовой модуляции, включая точечную модуляцию и модуляцию на волне биений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Представлена упрощенная модель для амплитуды магнитного поля низкочастотных радиоволн на поверхности Земли (ΔB_{geom}), генерируемых в нижней ионосфере при нагреве ионосферы мощным КВ излучением стенда с геометрической модуляцией. Амплитуда КВ излучения стенда не меняется со временем при такой модуляции и пятно излучения стенда (главный лепесток диаграммы направленности антенно-фидерной системы стенда) в нижней ионосфере описывает замкнутую траекторию с низкой частотой, что и является источником генерации радиоизлучения на этой низкой частоте. Элементом модели является отношение амплитуд магнитного поля низкочастотных радиоволн для геометрической и амплитудной модуляций ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) на поверхности Земли при прочих равных условиях. Это отношение, по-видимому, получено впервые, содержит только частоту модуляции стенда и геометрические факторы, т.е. зависит от гораздо меньшего числа параметров, чем ΔB_{geom} или ΔB_{amp} . В разработанной модели учтено, что на расстояниях 70-80 км от стенда происходит захват низкочастотных радиоволн в волновод Земля-ионосфера и отношение $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ для захваченных волн перестает зависеть от расстояния до стенда по мере распространения этих волн вдоль волновода.

2. На основе сопоставления с данными экспериментов получено, что модель правильно отражает экспериментально наблюдаемые зависимости $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ от частоты модуляции стенда F , включая большие расстояния от стенда, где $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} > 1$ на частотах $F > 3$ кГц с максимумом этого отношения на частоте $F \approx 6$ кГц для круговой геометрической модуляции.

3. Амплитудная модуляция эффективнее геометрической модуляции на частотах $F < 3$ кГц. Этот вывод, по-видимому, справедлив и для других видов амплитудно-фазовой модуляции, включая так называемые точечную модуляцию и модуляцию на волне биений.

ЛИТЕРАТУРА

- Алпатов В.В., Высоцкий А.Г., Гребнев И.А., Деминов М.Г., Репин А.Ю. Эффекты нагрева нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением. 1. Температура электронов // Гелиогеофизические исследования. Вып. 36. С. 40-49. 2022а.
- Алпатов В.В., Высоцкий А.Г., Гребнев И.А., Деминов М.Г., Репин А.Ю. Эффекты нагрева нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением. 2. Проводимости ионосферы // Гелиогеофизические исследования. Вып. 36. С. 50-56. 2022б.
- Алпатов В.В., Высоцкий А.Г., Гребнев И.А., Деминов М.Г., Репин А.Ю. Эффекты нагрева нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением. 3. Амплитудная модуляция // Гелиогеофизические исследования. Вып. 36. С. 57-66. 2022в.
- Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.Л., Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Трахтенгерц В.Ю., Эйрман В.Я. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // Письма в ЖЭТФ. Т. 20. Вып. 4. С. 229-232. 1974.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т. 177, № 11. С. 1145-1177. 2007.
- Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков С.Н., Рапопорт В.О., Сольнин В.А., Тамойкин В.В. О возможности формирования сверхсветового источника черенковского излучения с помощью эффекта Гетманцева // Модификация ионосферы мощными радиоволнами – М.: ИЗМИРАН. С. 91-92. 1986.
- Barr R., Stubbe P. ELF and VLF wave generation by HF heating: A comparison of AM and CW techniques // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 59. P. 2265-2279. 1997.
- Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M.A. Geometric modulation: A more effective method of steerable ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere // Geophys. Res. Lett. V. 35, L12101, doi:10.1029/2008GL034061. 2008.
- Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M.A., McCarrick M.J. ELF/VLF wave generation via ionospheric HF heating: Experimental comparison of amplitude modulation, beam painting, and geometric modulation // J. Geophys. Res. V. 115, A02302, doi:10.1029/2009JA014410. 2010a.
- Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M.A., Lehtinen N.G. On the generation of ELF/VLF waves for longdistance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere // J. Geophys. Res. V. 115, A07322, doi:10.1029/2009JA015170. 2010b.
- Cohen M.B., Moore R.C., Golkowski M., Lehtinen N.G. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources, J. Geophys. Res. V. 117, A12310, doi:10.1029/2012JA018140. 2012.
- Villasenor J., Wong A.Y., Song B., Pau J., McCarrick M., Sentman D. Comparison of ELF/VLF generation modes in the ionosphere by the HIPAS heater array // Radio Sci. V. 31. P. 211-226. 1996.

HEATING EFFECTS OF THE LOWER IONOSPHERE BY POWERFUL HF RADIO EMISSION. 4. GEOMETRIC MODULATION

Alpatov V.V., Vysotsky A.G., Grebnev I.A., Deminov M.G., Repin A.Yu.

A simplified model is presented for the amplitude of the magnetic field of low-frequency radio waves on the Earth's surface (ΔB_{geom}), generated in the lower ionosphere when the ionosphere is heated by high-power HF radiation from the facility with geometric modulation. The facility HF radiation amplitude does not change with time with such modulation, and the facility radiation spot (the main beam of the facility antenna-feeder system) in the lower ionosphere moves along a closed trajectory with a low frequency, which is the source of radio emission generation at this low frequency. An element of the model is the ratio of the amplitudes of the magnetic field of low-frequency radio waves for geometric and amplitude modulations ($\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$) on the Earth's surface, all other conditions being equal. This ratio, apparently obtained for the first time, contains only the modulation frequency of the facility and geometric factors, i.e. depends on far fewer parameters than ΔB_{geom} or ΔB_{amp} . The developed model takes into account that, at distances of 70–80 km from the facility, low-frequency radio waves are captured into the Earth-ionosphere waveguide and the ratio $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ for the trapped waves ceases to depend on the distance to the facility as these waves propagate along the waveguide. Based on a comparison with experimental data, it was found that the model correctly reflects the experimentally observed dependences of $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}}$ on the modulation frequency F of the facility, including long distances from the facility, where $\Delta B_{\text{geom}}/\Delta B_{\text{amp}} > 1$ at frequencies $F > 3$ kHz with a maximum of this ratio at a frequency $F \approx 6$ kHz for circular geometric modulation.

KEYWORDS: LOWER IONOSPHERE, HEATING, LOW-FREQUENCY RADIO EMISSION, GENERATION, MODEL