

УДК 533.9.01

СВОЙСТВА УНЧ/ОНЧ СИГНАЛОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СТЕНДОМ «СУРА» В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Д. С. Котик¹, А. В. Рябов¹, Е. Н. Ермакова¹, А. В. Першин¹,
В. Н. Иванов², В. П. Есин²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

² Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск Калужской обл., Россия

В работе представлены результаты исследований явления генерации низкочастотных излучений в ионосфере при воздействии на неё мощным коротковолновым модулированным излучением стенда «Сура». Впервые на средних широтах был получен большой объём данных о характеристиках УНЧ/ОНЧ искусственных сигналов, наблюдаемых в ночное время. Эти характеристики указывают на проявление нового механизма генерации сигналов, не связанного с эффектом модуляции квазистационарных ионосферных токов. Представлены результаты исследований зависимости уровня сигнала от наклона луча волны накачки и удаления точки наблюдения от стенда. Показано, что сигналы бывают как с правой, так и с левой поляризациями в зависимости от уровня геомагнитной активности. Измерено время задержки КНЧ сигнала, которое указывает на локализацию источника в максимуме F -слоя. Дана интерпретация наблюдаемых характеристик искусственных низкочастотных сигналов на базе пондеромоторного механизма возбуждения кольцевого диамагнитного тока вокруг луча волны накачки на частоте модуляции, согласующаяся с основными результатами эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях физики ионосферно-магнитосферных связей особый интерес представляют экспериментальные методы, использующие контролируемые источники низкочастотных радиоволн. Одним из таких методов является метод генерации УНЧ/ОНЧ волн непосредственно в ионосферной плазме мощными нагревными стендами.

Впервые эффект генерации сигналов комбинационных частот в ОНЧ диапазоне (эффект Гетманцева) был обнаружен на стенде средней мощности ($P = 150$ кВт), располагавшемся вблизи г. Горький [1]. Первые эксперименты по генерации искусственных низкочастотных сигналов мощным коротковолновым излучением в диапазоне магнитных микропульсаций были проведены на более мощных стендах «Сура» (Нижегородская область) и EISCAT (Тромсё, Норвегия) в 80-х годах [2–4]. Считалось, что механизм генерации УНЧ сигналов тот же самый, что и в ОНЧ диапазоне: вторичный источник формируется в нижней ионосфере при модуляции проводимости короткими радиоволнами в области ионосферных квазистационарных токов [5]. В средних широтах это токи динамо, в высоких — авроральная электроструя. В этих экспериментах интенсивность сигнала явным образом коррелировала с уровнем геомагнитной активности.

Первый эксперимент по генерации сигналов на частотах $3 \div 6$ Гц в условиях ночной ионосферы был проведён на стенде Аресибо (Пуэрто-Рико) в 1985 году [6]. Результаты этого эксперимента не могли быть объяснены в рамках общепринятой на тот момент теории модуляции ионосферных токов. Авторы более поздних экспериментов (2009–2010 годы, субавроральный стенд HAARP, Аляска) по генерации искусственных микропульсаций в условиях отсутствия электроструи связывают механизм генерации низкочастотных сигналов с дрейфовым током, возникающим в магнитном поле Земли (дрейфовый ток обусловлен наличием градиента давления при омическом нагреве плазмы верхней ионосферы полем волны накачки [7]).

Аналогичные эксперименты были проведены в лабораторных условиях на установке «Крот» (ИПФ РАН), где исследовалась генерация низкочастотных волн свистового диапазона в поле двух пучков волн накачки с небольшой отстройкой по частоте [8]. В этой же работе предложен механизм генерации волн на разностной частоте, в основе которого лежит пондеромоторная сила (сила Миллера), возникающая благодаря наличию поперечного градиента электрического поля волны накачки. В работах [9, 10] данные механизмы были взяты за основу для численного расчёта структуры ионосферного источника, создаваемого нагревными стендами. Было показано, что в условиях ионосферы основную роль играет пондеромоторная сила, создающая кольцевой ток на градиенте давления. В ночных условиях это приводит к формированию ионосферного источника в виде соленоида, вытянутого вдоль луча волны накачки, с размерами порядка 30 км в поперечнике и порядка 100÷150 км по вертикали.

В первых экспериментах на стенде «Сура», проведённых в ночное время, также были обнаружены УНЧ сигналы на частоте модуляции [11]. В течение последних трёх лет на стенде «Сура» было проведено интенсивное исследование искусственной ионосферной генерации сигналов в УНЧ/ОНЧ диапазонах. В период с 2010 по 2012 годы проводилось по две экспериментальные кампании в различных ионосферных и геомагнитных условиях при различных режимах работы стенда. В данной работе суммированы основные особенности искусственных УНЧ/ОНЧ сигналов, наблюдаемых в приёмных пунктах в окрестностях стенда «Сура».

1. ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стенд «Сура» состоит из трёх передатчиков ПКВ-250, каждый из которых работает на свою секцию антенной решётки из 12×4 скрещённых диполей (всего 144 диполя), излучающих волны с обыкновенной (О) или необыкновенной (Х) поляризациями в диапазоне 4,5÷9 МГц. Угловые размеры луча составляют 10° на нижней частоте диапазона и 5° на верхней. Имеется возможность менять направление луча в вертикальной плоскости север—юг с шагом 4° от зенита. В эксперименте мощность передатчиков составляла 500÷600 кВт в режиме без модуляции, а при огибающей в форме меандра — 250÷300 Вт. Направление луча в различных сериях менялось в зависимости от программы, принимая следующие значения: зенит, 12° или 16° к югу от зенита. Рабочие частоты выбирались согласно ионосферным условиям, которые контролировались ионозондом.

Измерительные пункты располагались в 2,6 км (д. Барковка), 9,5 км (д. Сосновка) и 13,7 км (полевой пункт) к востоку от стенда практически на одной линии. В первых двух пунктах измерения проводились одновременно почти во всех кампаниях, в третьем измерения проводились эпизодически в 2012 году. В октябре 2011 года выносной пункт был установлен в 10 км к западу от стенда (с. Петровское). Дополнительно измерения в УНЧ диапазоне проводились в режиме мониторинга в п. Новая Жизнь в 30 км к юго-западу от стенда. Для регистрации искусственных УНЧ сигналов в диапазоне 2÷20 Гц применялись индукционные магнитометры, данные с которых оцифровывались с помощью аналого-цифрового преобразователя (NI PCI-6123) и сохра-

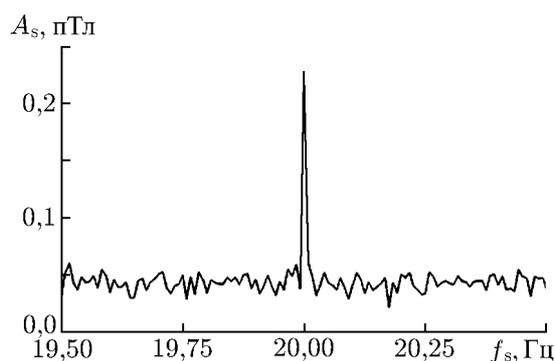


Рис. 1. Пример регистрации сигнала на частоте 20 Гц в ночное время 25.09.2010

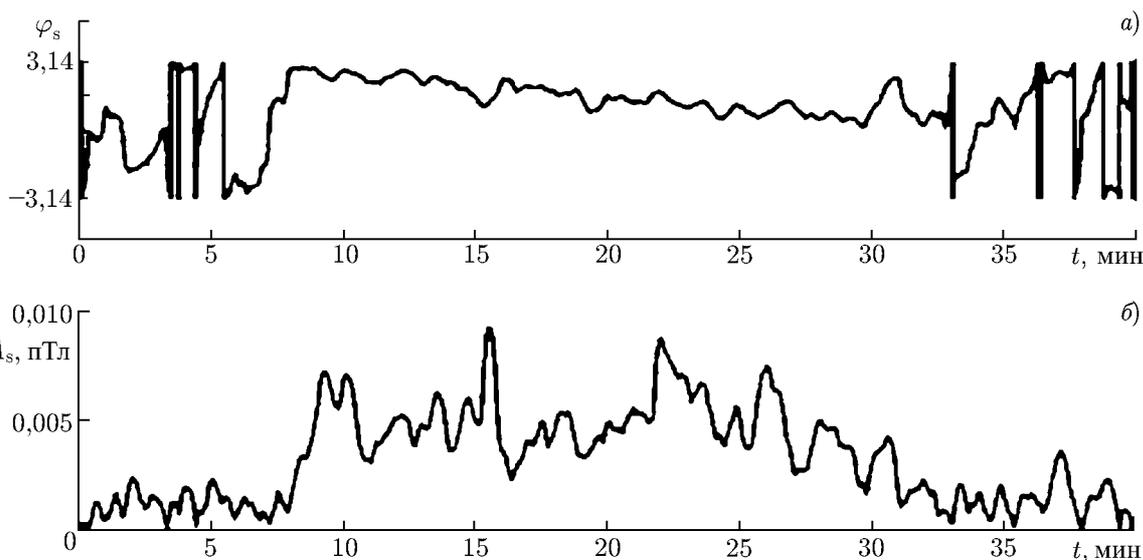


Рис. 2. Пример обработки сигнала методом синхронного детектирования 25.09.2010, амплитудная модуляция с частотой 20 Гц с 8-й по 30-ую минуты. Время отсчитывается от момента включения передатчика

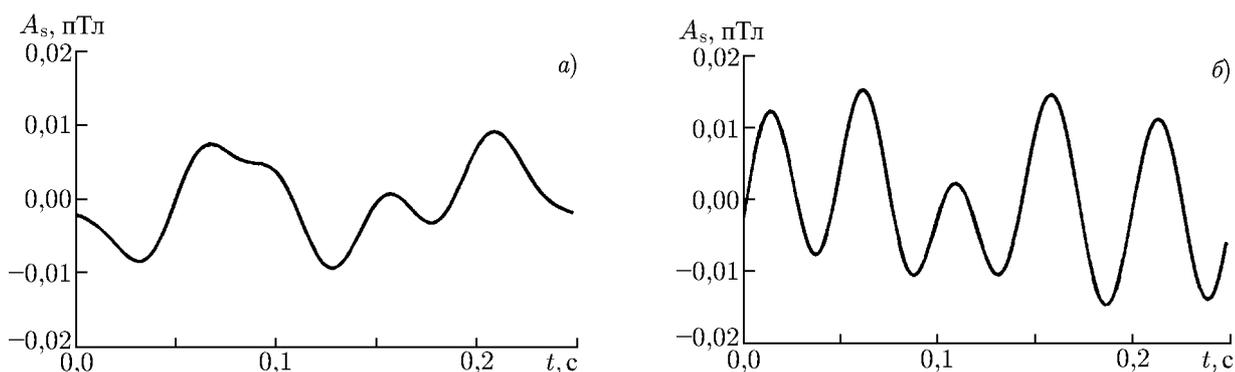


Рис. 3. Обработка сигнала на частоте 20 Гц методом наложения эпох, компонента по линии север—юг: шум (а), сигнал (б)

нялись на жёстком диске компьютера. Измерялись две компоненты магнитного поля по линиям север—юг и восток—запад.

Обработка данных проводилась как стандартным методом быстрого преобразования Фурье, так и по оригинальным методикам, разработанным для того или иного эксперимента. Пример регистрации сигнала методом спектрального анализа показан на рис. 1 (здесь и далее A_s , φ_s и f_s — амплитуда, фаза и частота сигнала соответственно). На рис. 2 показан пример обработки сигнала методом синхронного детектирования, позволяющим измерять фазу сигнала. В ряде экспериментов применялся метод наложения эпох (см. рис. 3).

Для исследования поляризации искусственных сигналов строились спектры компонент сигнала с правой и левой поляризациями. Пусть амплитуда магнитной компоненты по линии север—юг $H_{СЮ} = A$, а компоненты по линии восток—запад $H_{ВЗ} = n^* A e^{i\varphi}$, где φ — сдвиг фазы между компонентами. Правая и левая поляризации определены как $H_R = (H_{СЮ} + iH_{ВЗ})/\sqrt{2}$ и $H_L = (H_{СЮ} - iH_{ВЗ})/\sqrt{2}$ соответственно. Наличие сдвига фазы определяет отличие амплитуд H_R и

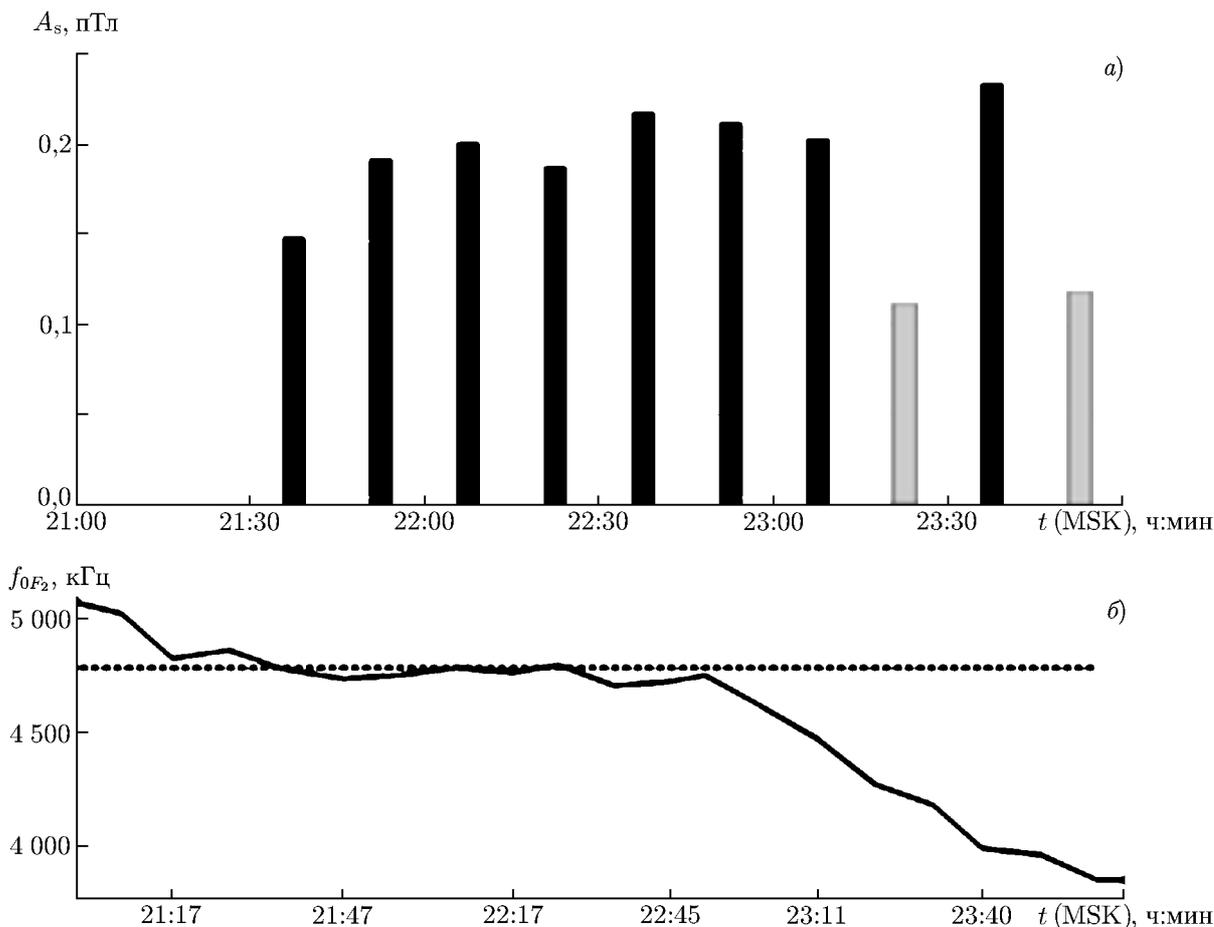


Рис. 4. Амплитуды сигналов на частоте 20 Гц при полной (чёрный цвет) и половинной (серый цвет) мощности излучения (а); зависимость критической частоты f_{0F_2} от времени (б). Штриховая линия соответствует частоте излучения ($P_0 = 500$ кВт, X-мода)

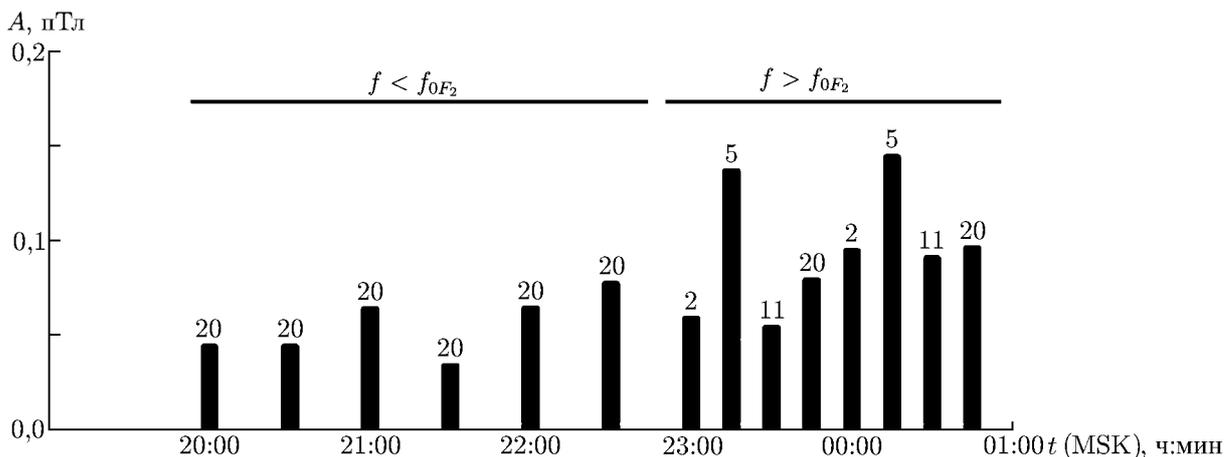


Рис. 5. Увеличение амплитуды УНЧ сигналов при превышении критической частоты f_{0F_2} . Числами на гистограмме обозначены частоты сигнала f_s в герцах

H_L и свидетельствует об эллиптичности поляризации искусственных сигналов. Если $\varphi = 0$, то амплитуды H_R и H_L равны, а поляризация излучения линейная.

В экспериментах 2012 года ставилась задача определения времени задержки приходящего УНЧ сигнала относительно модулированного сигнала станда. Для этого был применён специально разработанный модулятор с использованием высокостабильных генераторов и привязкой к системе точного времени GPS. Аналогичная техника была использована в приёмном пункте.

Эксперименты проводились в различных геомагнитных условиях. Мониторинг проводился по данным магнитовариационной станции ИЗМИРАН, широта которой близка к широте станда «Сура» (см. веб-сайт [12]). Ионосферные данные контролировались непосредственно на станде с помощью цифрового ионозонда SADI.

В течение 2010–2012 годов было проведено 7 кампаний по исследованию характеристик УНЧ сигналов, генерируемых в ионосфере стандом «Сура», в общей сложности 479 сеансов. Сеанс определён как временной интервал работы станда на одной частоте модуляции (обычно 10÷15 мин).

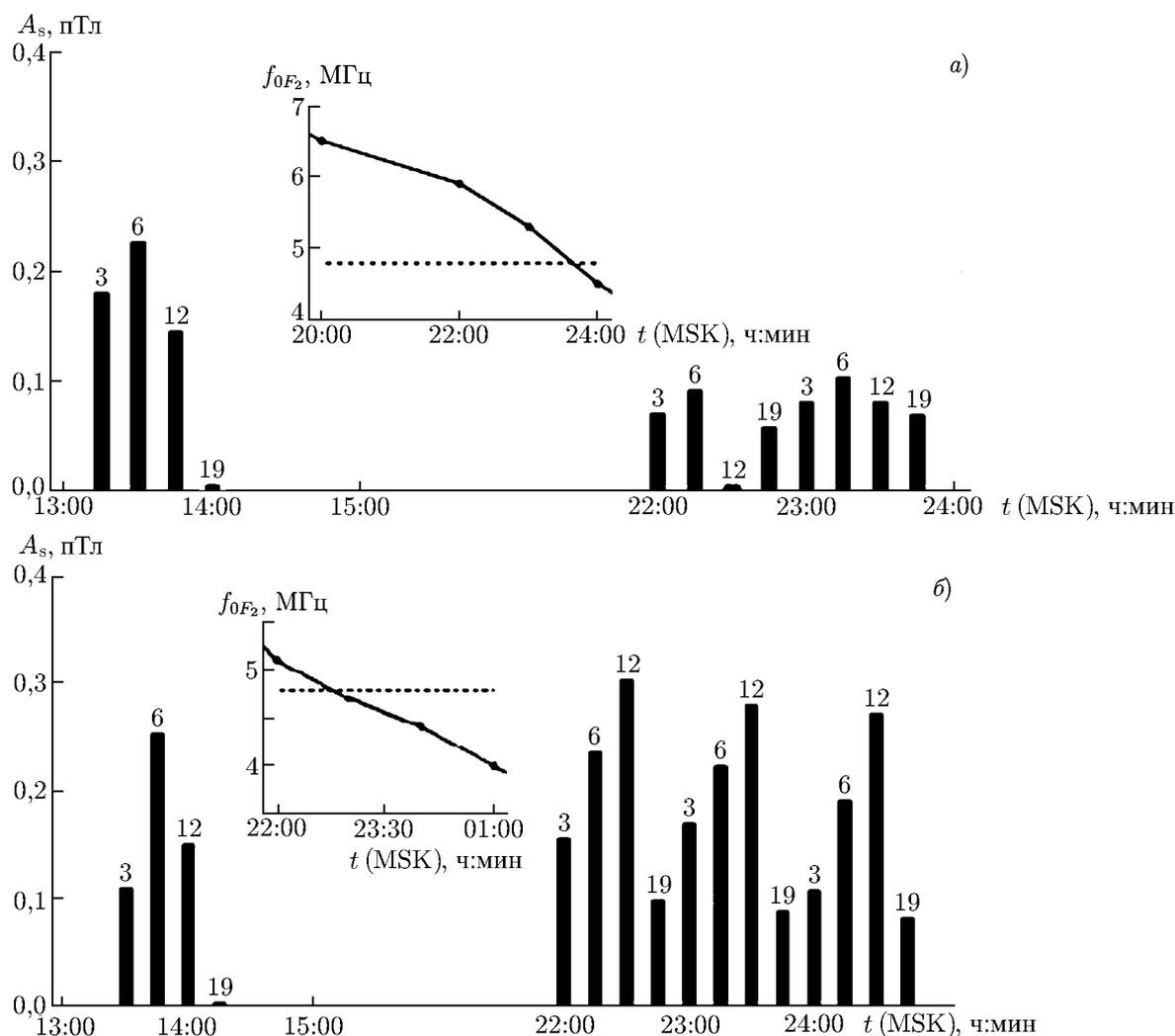


Рис. 6. Сравнение амплитуд УНЧ сигналов при работе станда на частотах ниже (докритический режим) и выше (закритический режим) критической частоты слоя F_2 02.10.2011 (а) и 04.10.2011 (б). Штриховой линией на вложенных графиках показано время работы станда и рабочие частоты 4,785 МГц (а) и 5,828 МГц (б) на фоне зависимости критической частоты от времени. Цифрами на гистограмме обозначены номинал частоты сигнала в герцах

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Основные свойства

В первых экспериментах, проведённых в мае 2010 года в ночных условиях в ближнем пункте д. Барковка, были обнаружены УНЧ сигналы во всём диапазоне измерений $2 \div 20$ Гц. При уменьшении мощности передатчиков в два раза амплитуда сигнала также уменьшалась примерно в два раза (см. рис. 4), что говорит о нелинейном эффекте, пропорциональном квадрату поля волны накачки. Эта проверка проводилась в условиях превышения рабочей частотой критической частоты f_{XF_2} при Х-поляризации волны накачки.

Основная наблюдаемая тенденция искусственных УНЧ сигналов заключалась в росте амплитуды в полтора–два раза при превышении рабочей частотой короткой волны критической частоты F -слоя, как это показано на рис. 5. Более наглядно зависимость от соотношения рабочей частоты и частоты f_{0F_2} проявилась в октябрьском эксперименте 2011 года (см. рис. 6). При спокойных геомагнитных условиях и сравнимых ионосферных параметрах амплитуда УНЧ сигналов 2 октября в докритическом режиме была примерно в 2 раза меньше, чем 4 октября в закритическом режиме.

На рис. 7 представлены усреднённые по частотам и по кампаниям наблюдений данные по модулю амплитуд УНЧ сигналов на каждой из используемых частот. Режимы работы стенда в каждую из кампаний приведены в табл. 1. Максимальных значений, втрое превышающих значения амплитуд в других кампаниях, сигналы достигали при направлении луча почти вдоль магнитного поля Земли и номинале рабочей частоты стенда 6 500 кГц, что близко к значению 5-й гармоники гирочастоты электронов в верхней ионосфере. Во время июньской кампании 2012 года также использовался луч в направлении магнитного поля и частота 6 500 кГц (иногда 6 780 кГц и излучение в зенит). В этой кампании амплитуда сигналов превышала среднее значение только примерно в 2 раза. Обсуждение данного результата будет приведено в следующем разделе; здесь отметим, что кампания 2012 года проводилась на фоне достаточно сильных геомагнитных возмущений.

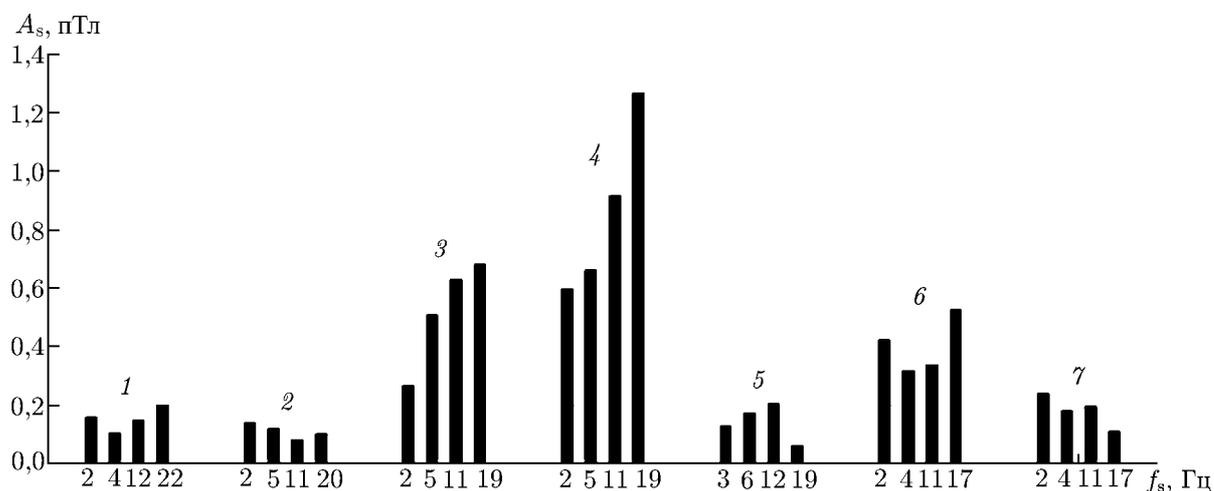


Рис. 7. Усреднённые данные по амплитудам УНЧ сигналов по всем кампаниям 2010–2012 годов. Числами на гистограмме обозначены частоты сигнала. Кампания 1 — май 2010 года, приёмный пункт д. Барковка, 2 — сентябрь 2010 г, д. Барковка, 3 — июнь 2011 г., д. Сосновка, 4 — июнь 2011 г., д. Барковка, 5 — октябрь 2011 г., с. Петровское, 6 — июнь 2012 г., д. Барковка, 7 — октябрь 2012 г., д. Барковка

Таблица 1. Режимы работы стенда во время кампаний 2010–2012 годов. Обозначения кампаний такие же, как на рис. 7

кампания	частота излучения, кГц	мода	направление излучения
1	4 785,00	X, O	зенит или 12° к югу
2	4 785,55	X, O	зенит или 12° к югу
3, 4	6 500,00	X, O	16° к югу (почти вдоль магнитного поля Земли)
5	4 785,58	X	зенит
6	6 780,00 6 500,00	X, O	зенит или 16° к югу
7	4 785,00 6 500,00	X, O	зенит или 12° к югу

2.2. Поляризационные свойства УНЧ сигналов

На рис. 8 приведены примеры спектров сигналов с правой и левой поляризациями на частоте 17,24 Гц для 15.06.2012 (спокойный период) и 17.06.2012 (геомагнитная буря). Как видно из рис. 8, 17 июня правая поляризация стала преобладающей по сравнению с аналогичными периодами при спокойной геомагнитной обстановке, что типично для всех наблюдаемых частот и может быть связано с изменением параметров ионосферной плазмы во время магнитной бури. Амплитуды компонент приведены в относительных единицах, т. к. для анализа поляризации нам важно только соотношение этих компонент.

В случае, когда амплитуда излучения имеет огибающую в форме меандра, сигнал наблюдается как на основной частоте модуляции излучения, так и на всех гармониках, попадающих в полосу приёма (например, при частоте модуляции $f = 4,55$ Гц наблюдаются 5 гармоник). В спокойных геомагнитных условиях характер поляризации, как правило, одинаков для основной частоты и для гармоник. Излучение имеет эллиптическую поляризацию на всех частотах с преобладанием излучения с левой поляризацией. Иногда наблюдается линейная поляризация.

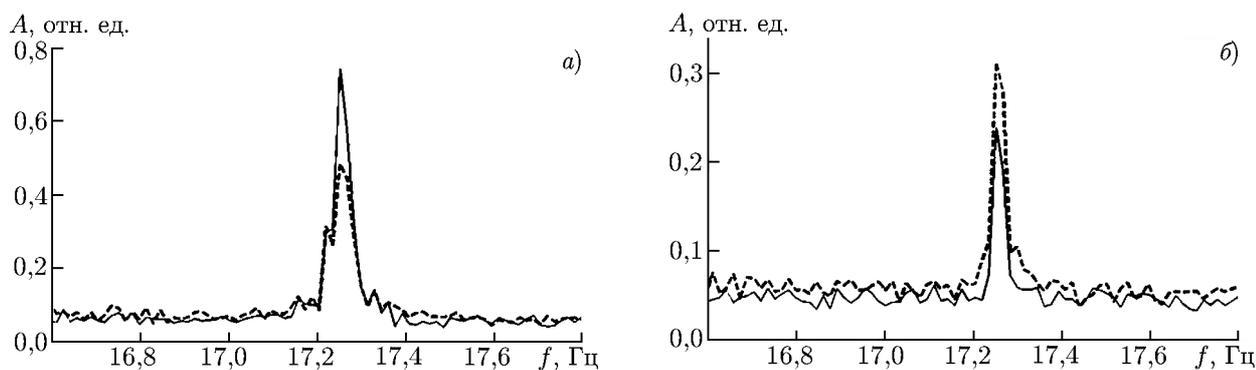


Рис. 8. Спектры компонент искусственных сигналов с правой (пунктирные линии) и левой (сплошные линии) поляризациями на частотах модуляции коротковолнового излучения стенда «Сура». Панель (а) соответствует сеансу 00:46÷00:56 MSK 15.06.2012 (спокойное геомагнитное поле), панель (б) — сеансу 00:45÷00:59 MSK 17.06.2012 (геомагнитная буря)

2.3. Определение времени задержки сигнала

В июньской кампании 2012 года был поставлен эксперимент по локализации ионосферного источника УНЧ сигналов в ночных условиях. Время распространения сигнала до точки приёма на поверхности Земли непосредственно связано с высотой, на которой расположен источник. Для определения времени задержки УНЧ сигнала проводились измерения разности фаз между пришедшей и излучённой волнами, для чего непосредственно на стенде сигнал модуляции оцифровывался и регистрировался на отдельном компьютере.

Частоты модуляции выбирались с достаточно близкими значениями, чтобы не возникало дополнительного набега фазы, кратного 2π , что привело бы к неоднозначности в определении времени задержки. Обработка проводилась по завершении измерений. Время задержки τ вычислялось по формуле

$$\tau = \frac{\Phi_N - \Phi_{N-1}}{2\pi(f_N - f_{N-1})},$$

где в числителе стоит разность фаз на двух соседних частотах, в знаменателе — разность этих частот.

На рис. 9 показан пример обработки фазы принятых сигналов относительно излучённой волны для шести последовательных измерений на сетке частот УНЧ сигнала.

Всего было проведено три подобных эксперимента, из результатов которых определено, что среднее время распространения УНЧ сигнала составляет 320 ± 95 мс.

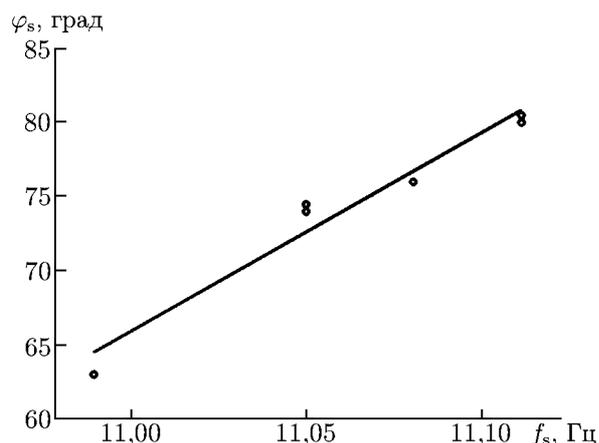


Рис. 9. Пример обработки данных фазовых измерений 00:00÷02:00 MSK 12.06.2012. Символами отмечены экспериментальные данные

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По данным июньской кампании 2011 года было проведено тщательное сопоставление соотношений амплитуд в пунктах в д. Барковка и д. Сосновка. Усреднённые по дням значения отношения амплитуд составили $1,5 \pm 0,5$; $1,9 \pm 1,0$; $1,9 \pm 1,2$ и $2,1 \pm 1,0$ для 16, 17, 18 и 19 июня соответственно. Отметим, что наблюдается разброс значений от 1 до 5 на каждой из частот, использовавшихся в эксперименте (см. рис. 10).

На рис. 11 показаны амплитуды УНЧ сигналов, усреднённые по результатам измерений в трёх пунктах (по оси абсцисс отложено расстояние S от передающей антенны). Измерения проводились одновременно во всех трёх пунктах в дневные часы. Усреднение проводилось по двум сеансам на каждой частоте из использованных в эксперименте (2,6; 4,5; 11,1 и 17,24 Гц, всего 8 значений для каждого из пунктов, отмечены точками с указанием ошибки измерений). Знаком « \times » отмечено среднее значение амплитуды УНЧ сигналов в диапазоне 0,5÷10 Гц, полученное в первых экспериментах на стенде «Сура» в 1982–1983 годах (см. [2]). Знаком «*» отмечено среднее значение амплитуды УНЧ сигналов в диапазоне 1÷11 Гц в экспериментах 1985–1986 годов (см. [3]).

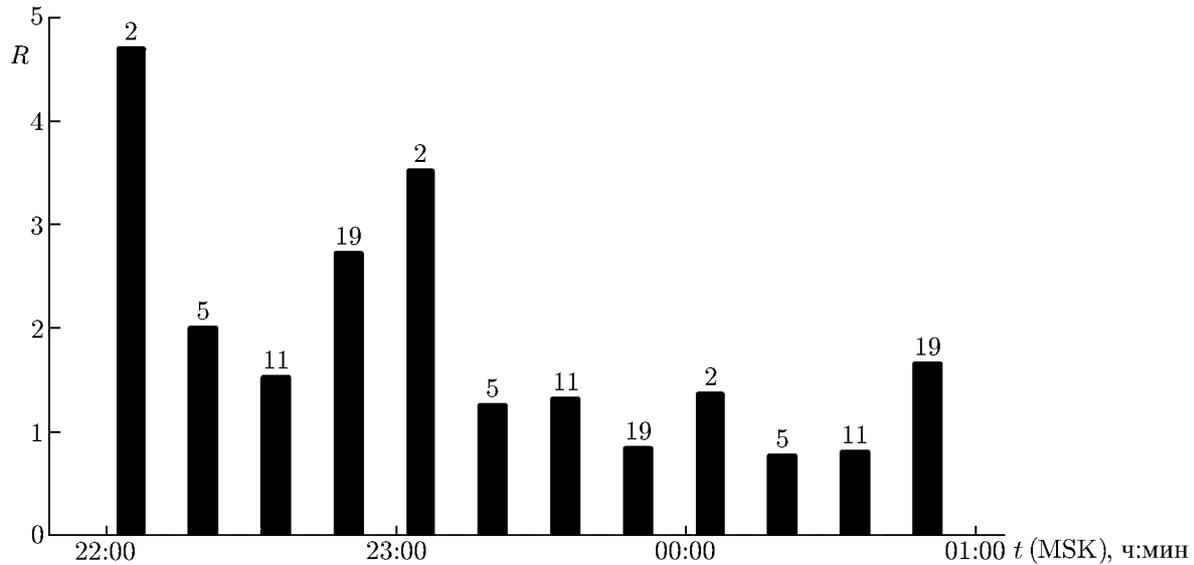


Рис. 10. Отношение R амплитуд сигналов на одной и той же частоте в д. Барковка и д. Сосновка 18, 19 июня 2011 года. Числами на гистограмме обозначены частоты сигналов в герцах

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

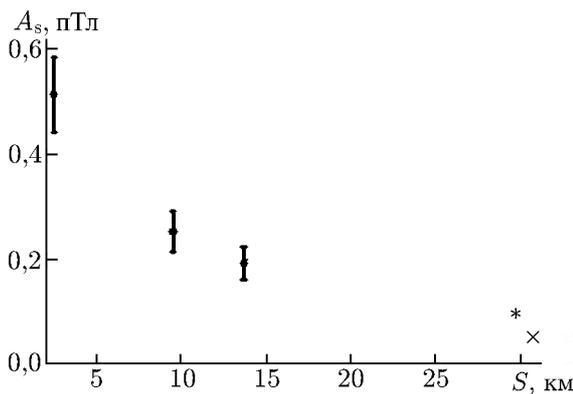


Рис. 11. Средние значения амплитуды УНЧ сигнала, полученные в разных экспериментах

Согласно предложенным в работах [7, 9, 10] механизмам, основную роль в формировании ионосферного источника искусственных УНЧ сигналов в F -слое играет пондеромоторная сила, возникающая благодаря наличию градиента давления в области омического нагрева плазмы пучком мощного электромагнитного излучения. В результате возникает диамагнитный кольцевой ток

$$\mathbf{j}_\varphi = -cn_e \frac{[\nabla_\perp T_e, \mathbf{B}_0]}{B_0^2}, \tag{1}$$

где n_e и T_e — концентрация и температура электронов соответственно, B_0 — магнитное поле Земли, c — скорость света.

Расчёт температуры электронов проводится на основе теории тепловой нелинейности [13]. Учитывая эффект самовоздействия, легко получить выражение для возмущения температуры на частоте модуляции Ω :

$$|T_{e\Omega}| = \frac{2e^2 E_0^2 \sqrt{(2\delta\nu_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\nu_0^2 \Omega^2}}{3m [(\omega_0 \pm \omega_L)^2 + \nu_0^2] (\Omega^2 + \delta^2 \nu_0^2)}, \tag{2}$$

где e и m — заряд и масса электрона соответственно, ν_0 — частота столкновений, δ — доля энергии, теряемая электроном в одном столкновении, ω_0 — частота волны накачки, $\omega_L = \omega_H \cos \alpha$, ω_H — гирочастота, α — угол между магнитным полем и направлением волны накачки. В формуле (2) поле волны накачки E_0 имеет сильную неоднородность поперёк оси луча, и, следовательно, градиент температуры параллелен градиенту поля волны накачки. На рис. 12 показана расчётная структура источника, формируемая узким пучком в ночной ионосфере. Расчёты для дневных

условий также дают подобную структуру, но она сосредоточена в E -слое, и плотность тока в ней на порядок ниже.

Структура источника на рис. 12 рассчитана для случая превышения рабочей частотой стэнда критической частоты F -слоя [9, 10]. Естественно, что в обратном случае, когда точка отражения находится вблизи максимума F -слоя (или значительно ниже), размеры источника будут значительно меньше, хотя максимум тока будет по-прежнему расположен в верхней ионосфере. Это обстоятельство объясняет наблюдаемый экспериментально факт увеличения амплитуды УНЧ сигналов при прохождении критической частоты F -слоя (см. рис. 5, 6).

Рассмотрим зависимость эффекта генерации УНЧ сигналов от наклона луча. Как видно из рис. 7, максимальных значений сигнал достигал в летних кампаниях 2001 и 2012 годов, когда луч был направлен вдоль магнитного поля Земли. В этих случаях применялась также частота 6,5 МГц, близкая к 5-й гармонике гирочастоты электрона. Однако проверка с переходом на частоту 6,78 МГц, проведённая в кампании 2012 года, не показала явного преимущества применения частоты 6,5 МГц. Также в эксперименте не выявлено преобладание X -поляризации над O -поляризациями, что должно было иметь место в случае работы на гармонике гирочастоты.

Мы полагаем, что в этом эффекте основную роль играет расположение измерительного пункта. Напомним, что расстояние до него от стэнда составляет 3 км. В случае наклона луча вдоль магнитного поля точка измерения попадает в область проекции силовой линии на поверхность Земли, т. е. на ось ионосферного источника. При излучении в зенит проекция силовой линии, проходящей через максимум возмущённой области, смещается к северу на $50 \div 60$ км.

Тот факт, что в 2012 году при том же наклоне луча сигналы были примерно в два раза слабее, чем в 2011, объясняется различием в геомагнитных условиях (см. рис. 7). В июне 2011 года кампания проводилась при минимальных значениях индекса K_p . Ионосферные параметры носили регулярный характер, мощные спорадические слои в ионосфере отсутствовали. При этом июньская кампания 2012 года проходила во время магнитных бурь, которые сопровождалась крайней нестабильностью ионосферных параметров. В ночные часы наблюдались мощные спорадические слои, скорее всего, связанные с высыпаниями частиц из радиационных поясов. В свою очередь, это обстоятельство сказалось на повышенном поглощении коротковолнового излучения в нижней ионосфере и уменьшении энергии волны накачки на высотах F -слоя.

Для оценки высоты источника искусственных УНЧ сигналов по данным фазовых измерений необходимо рассчитать время распространения низкочастотной волны от максимума F -слоя до точки приёма. Для этого было рассчитано время распространения сигнала в модели ионосферы IRI-2007 [14], скорректированной по данным ионозонда на момент проведения измерений. Расчёт проводился в приближении кусочно-однородной среды (640 слоёв с толщиной 0,5 км). Показатель преломления для нормальных волн был рассчитан по известным формулам [15], обобщённым на случай многокомпонентной плазмы. В предположении, что источник сигнала располагается в области максимума F -слоя, было получено расчётное значение времени запаздывания, равное

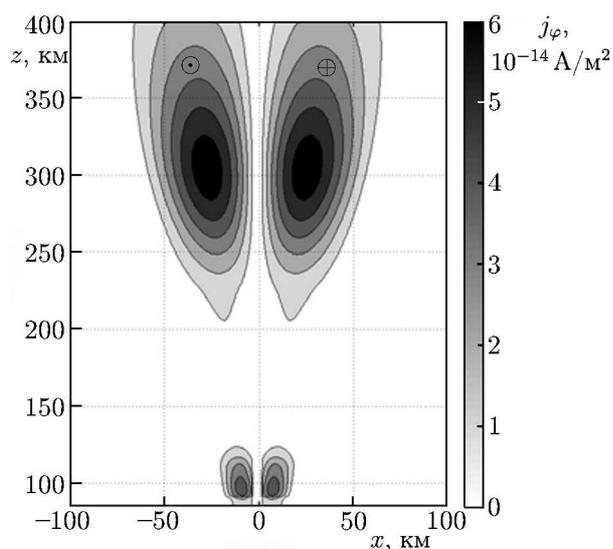


Рис. 12. Соленоидальная структура ионосферного источника УНЧ сигналов в верхней ионосфере (z — высота, x — горизонтальное расстояние)

300 мс. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическим расчётом; это означает, что исходное предположение о высоте источника является верным. Таким образом, источник наблюдаемых УНЧ сигналов расположен на высоте 325 ± 75 км.

Рассмотрим теперь уровень УНЧ сигналов при измерениях на различном удалении от станда (см. рис. 11). Первые три точки на этом рисунке получены одновременно в дневных условиях на удалениях 2,6; 9,5 и 13,7 км и показывают довольно резкое спадание амплитуды сигнала при удалении от источника.

Отметим, что в наших кампаниях 2010–2012 годов сигналы в п. Новая Жизнь (удаление 30 км) не были обнаружены. С другой стороны, в более ранних экспериментах, проведённых на стенде «Сура» в 1982–1983 годах (п. Дорогуча, удаление 30,7 км к северо-западу от станда, см. [2]) были зарегистрированы сигналы в УНЧ диапазоне на уровне порядка и ниже 0,1 пТл (см. рис. 11). Также были обнаружены УНЧ сигналы в экспериментах 1985–1986 годов (в том же п. Новая Жизнь, см. [3]).

Эксперименты в п. Дорогуча проводились при длительностях сеансов 50 мин, что более чем в три раза превышает длительность сеансов в последних кампаниях (соответственно, время накопления сигнала методом наложения эпох было большим). В экспериментах 1982–1983 годов (см. [2]) не было обнаружено явной зависимости вероятности наблюдения сигналов ни от местного времени, ни от несущей частоты. В двух из четырёх ночных сеансов наблюдались сигналы на частоте 0,4 Гц при частоте накачки $f = 4,785$ МГц и частоте 4,4 Гц при $f = 9,03$ МГц. Было также обнаружено, что при обыкновенной поляризации волны накачки вероятность наблюдения искусственных сигналов в три раза выше, чем при необыкновенной.

Эксперименты 1985–1986 годов в п. Новая Жизнь проводились в зимнее время, когда уровень атмосферных помех имеет сезонный минимум. В п. Новая Жизнь сигналы регистрировались как в дневное, так и в ночное время. Кроме того, следует отметить, что в середине 80-х годов передатчики станда имели полную мощность, которая была на $25 \div 30\%$ выше современных возможностей.

В работе [2] сделан вывод о необходимости поиска нового механизма генерации искусственных сигналов в средних широтах, поскольку весь набор экспериментальных данных не мог быть объяснён модуляцией квазистационарных ионосферных токов. Выявленные в ранних экспериментах особенности сигналов в диапазоне магнитных пульсаций очень схожи с наблюдаемыми характеристиками УНЧ сигналов в экспериментах 2010–2012 годов. Это обстоятельство позволяет утверждать, что в ранних экспериментах мы имели дело с тем же самым механизмом формирования ионосферного источника, который рассмотрен выше (см. рис. 12 и [9–11]).

В заключение обсудим вопрос о возможности наблюдения искусственных УНЧ сигналов на значительном удалении от источника на поверхности Земли на борту искусственного спутника. Очевидно, что исчерпывающий ответ дало бы моделирование распространения УНЧ волн в МГД волноводе на основе полноволнового метода (см. [16]). С другой стороны, очевидно, что выход захваченного МГД волноводом УНЧ излучения к поверхности Земли возможен на значительных удалениях от источника в том случае, если на этих дальностях низкочастотная волна встретит область сильной горизонтальной неоднородности, которая будет способствовать выходу излучения в волновод Земля–ионосфера. Такими неоднородностями могут быть область ионосферного провала или терминатор. Следовательно, точка наблюдения должна быть размещена на удалении порядка $600 \div 700$ км к северу от станда на магнитном меридиане.

Для спутниковых измерений желательнее использовать низкоорбитальный аппарат на подлёте к источнику непосредственно в МГД волноводе. Естественно, особый интерес представляют пролёты аппарата, траектория которого пересекает луч волны накачки. Имеет смысл также проводить измерения характеристик энергичных протонов и УНЧ волн на среднеорбитальных

аппаратах при пересечении ими силовой трубки магнитного поля, опирающейся на область воздействия мощным коротковолновым излучением (параметр трубки $L \approx 2,6$ для широты стенда «Сура»).

В наземных экспериментах необходимо развивать методы зондирования магнитосферы искусственными УНЧ сигналами, уделяя особое внимание периодам сильной геомагнитной возмущённости. В эти периоды радиационные пояса Земли наполняются высокоэнергичными протонами, и следует ожидать проявления эффектов взаимодействия типа волна—частица.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11–02–00419) и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 14.518.11.7056 и проект 14.В37.21.0901).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гетманцев Г. Г., Зуйков Н. А., Котик Д. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, № 4. С. 229.
2. Гульельми А. В., Зотов О. Д., Котик Д. С. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. 1985. Т. 25, № 1. С. 102.
3. Беляев П. П., Котик Д. С., Митяков С. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 248.
4. Stubbe P., Kopka H., Dowden R. L. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, No. 11. P. 9073.
5. Котик Д. С., Трахтенгерц В. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21, № 2. С. 114.
6. Ganguly S. // Nature. 1986. V. 320, No. 6062. P. 511.
7. Papadopoulos K., Gumerov N. A., Shao X., et al. // Geophys. Res. Lett. V. 38. Art. no L12103.
8. Гуцин М. Е., Коробков С. В., Костров А. В., Стриковский А. В. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 11. С. 752.
9. Котик Д. С., Рябов А. В. // Труды XXIII Всерос. научной конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 23–26 мая 2011 г. Т. 1. С. 243.
10. Рябов А. В., Котик Д. С. // Вестник ННГУ. 2012. № 3. С. 65.
11. Котик Д. С., Рябов А. В., Ермакова Е. Н. и др. // Труды XXIII Всерос. научной конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 23–26 мая 2011 г. Т. 1. С. 156.
12. <http://forecast.izmiran.rssi.ru/index.html>.
13. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
14. <http://onniveb.gsfc.nasa.gov/vitmo>.
15. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
16. Lehtinen N. G., Inan U. S. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no L03104.

Поступила в редакцию 24 мая 2013 г.; принята в печать 28 июня 2013 г.

PROPERTIES OF THE ULF/VLF SIGNALS GENERATED BY THE “SURA” FACILITY IN THE UPPER IONOSPHERE

D. S. Kotik, A. V. Ryabov, E. N. Ermakova, A. V. Pershin, V. N. Ivanov, and V. P. Esin

The results of studying the generation of low-frequency radiation phenomena in the ionosphere affected by high-power modulated HF radiation of the Sura facility are presented. A large amount of data on characteristics of the ULF/VLF artificial signals observed in the night time, which indicate the manifestation of a new generation mechanism not related to the quasistationary ionospheric current

modulation effect, have been obtained for the first time at the mid-latitudes. The results of studying the dependence of the signal value on the beam inclination of the pump wave and the distance to the observation point from the facility are presented. It is shown that the signals can be both right- and left-polarized depending on the level of geomagnetic activity. The measured time delay of the ULF signal indicates the location of the source at the F -layer maximum. Interpretation of the observed characteristics of artificial low-frequency signals based on a ponderomotive excitation mechanism of the diamagnetic ring current around the HF radiation beam at a modulation frequency agrees with the main results of the experiment.