

УДК 523.62.726

## РЕГИСТРАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ-СИГНАЛОВ НА МАГНИТНОЙ СТАНЦИИ СТАРАЯ ПУСТЫНЬ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА FENICS-2019

© 2021 г. А. В. Рябов<sup>1, \*</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2, 3, \*\*</sup>, Е. Н. Ермакова<sup>1, \*\*\*</sup>, Н. Г. Мазур<sup>4</sup>,  
Е. Н. Федоров<sup>4</sup>, А. А. Жамалетдинов<sup>5</sup>, А. Н. Шевцов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский Радиофизический институт Нижегородского университета  
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Геофизический Центр РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН,  
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

\*e-mail: alexr@nirfi.unn.ru

\*\*e-mail: pilipenko\_va@mail.ru

\*\*\*e-mail: l.ermakova@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 19.04.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

В сентябре 2019 г. на Кольском п-ове проводился эксперимент по генерации УНЧ- и СНЧ-сигналов (УНЧ (0.38–6.4 Гц) и СНЧ (9.4–194 Гц)) в ночные часы с использованием двух выведенных из работы линий электропередач в качестве горизонтальной излучающей антенны. Сила тока изменялась от 240 А на низких частотах (0.382 Гц) до 20 А – на самых высоких (194 Гц). Представлены результаты регистрации УНЧ-сигналов на магнитной станции Старая Пустынь, удаленной от передающей линии на 1610 км. Зарегистрированы сигналы с частотами от 0.6 до 6.4 Гц с амплитудами, нормированными на величину тока излучателя, ~0.4–0.7 фТл/А. Для теоретических оценок использованы три модели: 1) формулы из теории возбуждения СНЧ-поля над проводящей поверхностью; 2) численная модель УНЧ-поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным приземным током бесконечной длины, и 3) численная модель горизонтального диполя в многослойной среде Земля–атмосфера–ионосфера. Модель 2 основана на численном решении системы уравнений Максвелла в вертикально неоднородных атмосфере и ионосфере, и ее принципиальная особенность заключается в учете вклада ионосферного волноводного распространения в возбуждаемое поле на больших удалениях. Наилучшее согласие с амплитудами зарегистрированных сигналов продемонстрировала модель 3. Однако, вопреки предсказаниям моделей 1 и 3, зависимость от частоты амплитуды искусственных сигналов в диапазоне 2–8 Гц имеет немонотонный характер, что может быть проявлением эффектов волноводного распространения вдоль ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794021030147

### 1. ВВЕДЕНИЕ

#### ВОЗБУЖДЕНИЕ УНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ НАЗЕМНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Электромагнитные возмущения ультранизкочастотного (УНЧ) диапазона (от долей Гц до первых десятков Гц) используются для магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры [Гульельми, 1989], наземной диагностики плазмы ионосферы [Ротаров et al., 2017] и мониторинга динамики поровой жидкости в горных породах [Pilipenko and Fedorov, 2014]. Искусственная генерация излучений этого диапазона возможна ан-

теннами с эффективной длиной не менее десятков – сотен км. Источниками с такими масштабами могут быть линии электропередач (ЛЭП). Основные отличительные особенности низкочастотных волн заключаются в крайне малом затухании с расстоянием при распространении в волноводе Земля–ионосфера и в глубоком проникновении в подстилающую среду [Bernstein et al., 1974].

Специальные эксперименты с контролируруемыми источниками электромагнитных полей УНЧ- (ultra-low-frequency, 1–30 Гц) и СНЧ- (extremely-low-frequency, 30–300 Гц) диапазонов с

использованием выведенных из работы ЛЭП в качестве горизонтальной излучающей антенны проводились на Кольском п-ове [Велихов и др., 1994; Жамалетдинов и др., 2015, 2019]. Важным, но окончательно не выясненным, аспектом проблемы остается вопрос о влиянии ионосферы на возбуждение и распространение искусственных УНЧ-сигналов. Во время экспериментов вблизи от излучателя (~80 км) амплитуда регистрируемых сигналов в диапазоне частот 10–100 Гц оставалась постоянной, но на частотах ниже 10 Гц средний уровень поля в некоторые дни заметно менялся до ~10%, что объяснялось влиянием ионосферных условий [Терещенко и др., 2018]. Во время экспериментов с регистрацией сигналов ЛЭП с частотами порядка первых Гц на больших удалениях от источника (550–1000 км) анализ амплитудно-частотных и поляризационных характеристик сигналов показал, что ионосферные условия влияют на свойства принимаемого сигнала [Беляев и др., 2002; Ермакова и др., 2005]. Было отмечено, что величина нормированного принимаемого сигнала значительно отличалась в различные сезоны днем и ночью [Терещенко и др., 2007], что авторы также связывали с влиянием ионосферы. Во время экспериментов по приему на арх. Шпицберген УНЧ- (0.1–10 Гц) излучения от заземленной ЛЭП на Кольском п-ове на расстоянии 1200 км частотная зависимость амплитуды напряженности зарегистрированных сигналов имела характерное осцилляторное поведение, что связывалось с резонансными свойствами ионосферы [Терещенко и др., 2010].

Для теоретической интерпретации экспериментальных результатов обычно пользуются соотношениями из различных теорий распространения УНЧ/СНЧ-сигналов вдоль земной поверхности в волноводе Земля–ионосфера [Макаров и др., 1993; Вайслейб и Собчаков, 1979]. Однако, хотя теория распространения электромагнитных волн диапазона 0.1–1000 Гц в волноводе Земля–ионосфера развивается более 100 лет и предложено не менее десятка различных подходов, общепринятой теории не создано [Bannister, 1979]. Учет влияния ионосферы обычно сводится к введению поправок, описывающих отражение волны от проводящего слоя на высоте нижней ионосферы. Аналитическая теория поля в плоском волноводе между идеально проводящей Землей и однородной гиротропной ионосферой, находящейся в вертикальном геомагнитном поле, на больших удалениях от источника была построена Собчаковым и др. [2003]. Терещенко и др. [2018] решена задача о возбуждении поля в среде из трех слоев с однородными и изотропными проводимостями, образующими плоский волновод, горизонтальным гармоническим излучателем с конечной длиной, находящимся на границе раздела. Помимо точной волновой постановки

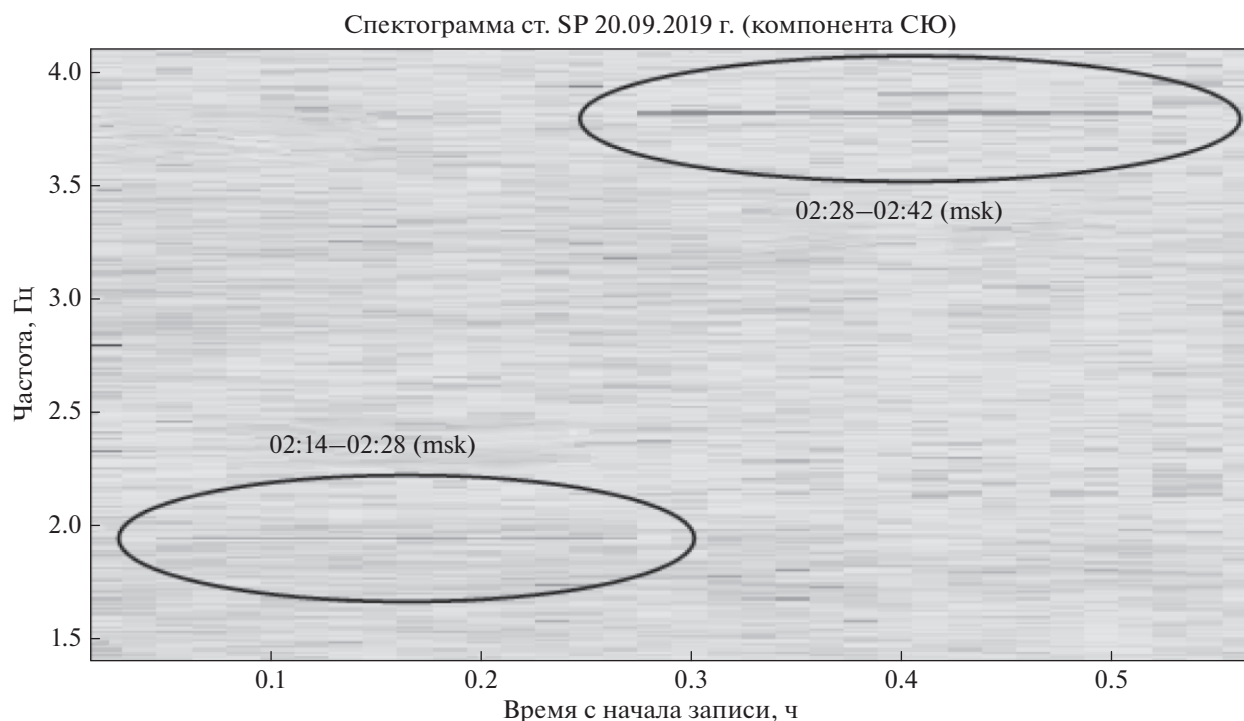
задачи, расчет УНЧ/СНЧ-поля в волноводе Земля–ионосфера проводился с помощью двумерного телеграфного уравнения [Кириллов, 1996].

Однако в большинстве предшествующих работ ионосфера моделировалась довольно упрощенно, как проводящий однородный слой. В реальной ионосфере распределение плазмы с высотой резко неоднородно, в результате чего образуются ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) и волновод для быстрых магнитозвуковых волн. Проводимость плазмы сильно анизотропна и гиротропна, что приводит к зацеплению между собой волноводных мод и колебаний в ИАР. В высоких широтах фундаментальная частота ИАР порядка первых Гц, а критическая частота волновода ~0.5–1.0 Гц. Волноводное распространение возмущений от магнитосферных источников с частотами выше критической наблюдается до расстояний несколько тысяч км [Pilipenko et al., 2011]. Ионосферные резонатор и волновод могут возбуждаться как широкополосными магнитосферными излучениями, так и приземными атмосферными источниками – грозowymi разрядами [Mazur et al., 2018]. Наличие ИАР приводит к особенностям в возбуждении и распространении УНЧ-сигналов в ночные часы в волноводе Земля–ионосфера [Кириллов и Копейкин, 2003].

В данной работе представлены результаты регистрации УНЧ-сигналов на магнитной ст. Старая Пустынь (SP), удаленной от передающей линии в эксперименте FENICS-2019 на 1610 км. Экспериментальные наблюдения дополнены аналитическими оценками и численным моделированием УНЧ электромагнитных полей в атмосфере и ионосфере, возбуждаемых горизонтальным электрическим током, по различным моделям.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ FENICS-2019 И СТАНЦИЯ СТАРАЯ ПУСТЫНЬ

Эксперимент FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from soundings with the Natural and Controlled Sources) проводился на Кольском п-ове в период с 09 по 21 сентября 2019 г. с использованием двух промышленных ЛЭП с длиной  $L = 100$  км и  $L = 120$  км в качестве излучающих антенн, расположенных под углом  $120^\circ$  относительно друг друга. Основные задачи эксперимента включали МТЗ Фенноскандинавского щита с целью построения квазитрехмерной модели литосферы и изучение особенностей распространения УНЧ/СНЧ электромагнитного поля в волноводе Земля–ионосфера. В ходе эксперимента генератор мощностью 200 кВт создавал в выведенных из работы ЛЭП переменный ток с амплитудой от 240 А на низких частотах (0.382 Гц) до 20 А – на самых высоких (194 Гц). Генерация тока проводилась путем попеременного подключения генератора к линиям ЛЭП-403 (L1) в четные ночи и ЛЭП-



**Рис. 1.** Пример спектрограммы (динамического спектра) искусственного сигнала ( $B_x$ -компонента), зарегистрированного 20 сентября 2019 г. во время эксперимента FENICS на ст. SP. Эллипсами выделены два узкополосных сигнала и указано время регистрации (Московское).

153/154 (L2) – в нечетные. Ток в ЛЭП подавался с 01:20 до 05:00 московского времени по расписанию частот (по мировому времени в интервале с 22:20 до 02:00 UT, т.к. LG = UT + 3). Географические координаты линий: L1 (Кола–Никель)  $68^{\circ}50'$ ,  $33^{\circ}04'$ – $69^{\circ}40'$ ,  $30^{\circ}78'$  и L2 (Кола–Мончегорск)  $68^{\circ}50'$ ,  $33^{\circ}04'$ – $67^{\circ}06'$ ,  $32^{\circ}49'$ .

Для изучения особенностей сверхдальнего распространения УНЧ-сигналов велось наблюдение на новой магнитной ст. Старая Пустынь (СП, SP), удаленной от передающей линии на 1610 км. Эта станция была открыта на территории радиофизического полигона НИРФИ ННГУ с координатами  $55.66^{\circ}$  N,  $43.63^{\circ}$  E [Ермакова и др., 2019]. Оборудование приемного пункта включает комплект индукционных высокочувствительных магнитометров для измерения двух горизонтальных компонент магнитного поля ( $B_x$  – С–Ю,  $B_y$  – В–З), усилитель сигналов с низкочастотным фильтром и режекторным фильтром на 50 Гц, и 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с частотой оцифровки 64 Гц. Датчики отличаются высокой линейностью преобразования, сверхнизкие шумы на низких частотах и большой динамический диапазон, что позволяет производить измерения даже при относительно высоких уровнях промышленных помех. В датчиках используется отрицательная обратная связь по полю, чтобы сделать амплитудно-частотную харак-

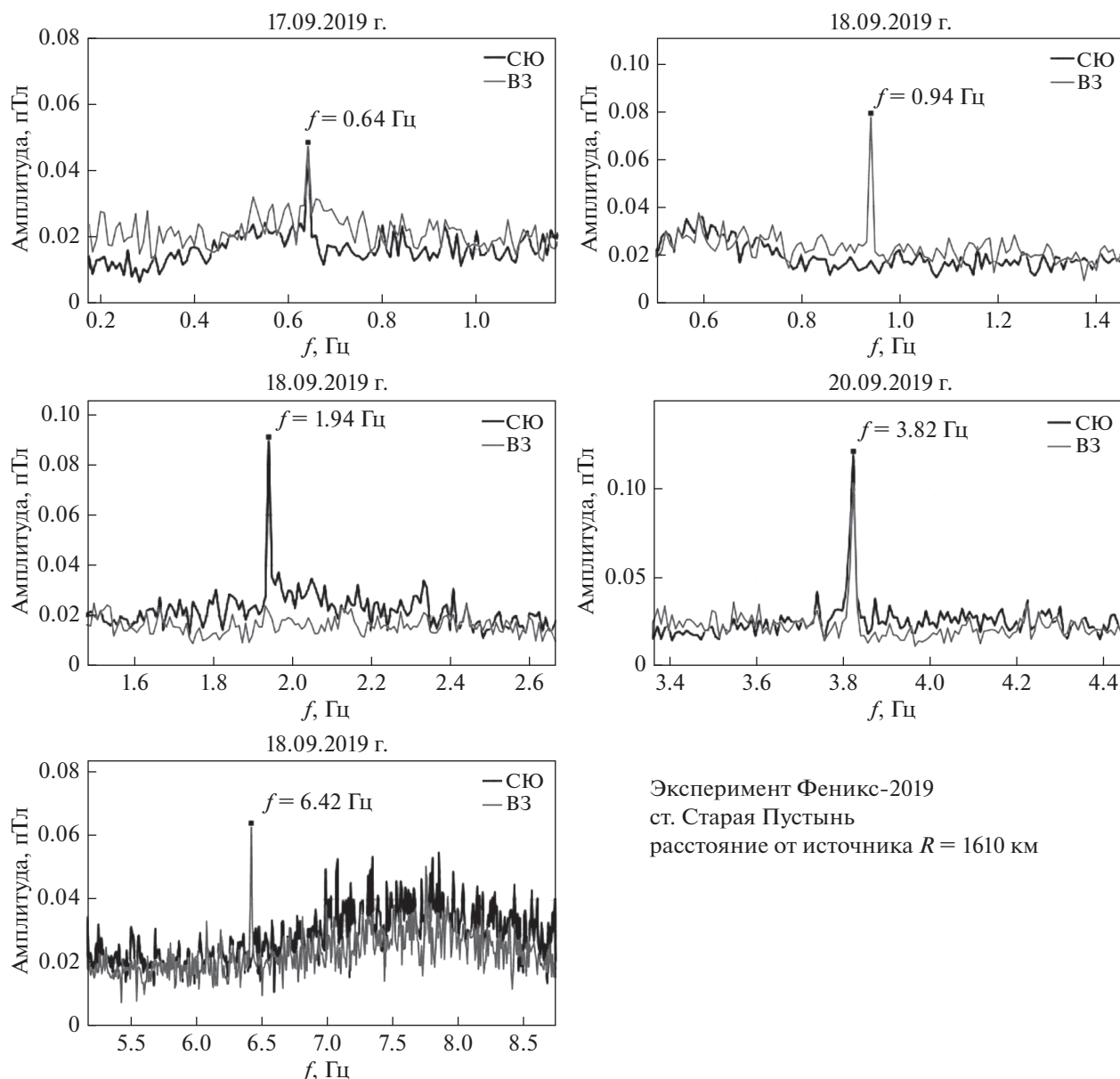
теристику стабильной и плоской в широком частотном диапазоне. Калибровка регистрирующего тракта проводится узкополосным сигналом от магнитной рамки с током. Данные индукционного магнитометра ст. SP выкладываются в свободный доступ на сервер Аналитического центра геомагнитных данных Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru>).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ

Во время сеансов FENICS излучаемые ЛЭП искусственные сигналы были зарегистрированы на ст. SP. Пример сонограммы зарегистрированных излучений дан на рис. 1. Хотя сигналы на частотах 1.94 и 3.82 Гц слабые, но они выделяются на фоне фоновых шумов достаточно уверенно.

Примеры статических спектров калиброванной записи показаны на рис. 2. Во время эксперимента зарегистрированы сигналы с частотами от 0.64 до 6.43 Гц как от линии L1, так и линии L2. Сигналы регистрировались по обоим горизонтальным компонентам с сопоставимой амплитудой.

Общая картина измеренной в разных сеансах полной амплитуды (среднеквадратичное двух горизонтальных компонент) принятых сигналов, нормированной на величину тока излучателя (т.е. приведенной к  $J_0 = 1$  А), показана на рис. 3.



Эксперимент Феникс-2019  
 ст. Старая Пустынь  
 расстояние от источника  $R = 1610$  км

**Рис. 2.** Примеры спектров искусственных сигналов с различными частотами, зарегистрированных на ст. SP во время сеансов работы излучающей установки. Амплитуда сигналов указана в пТл.

Характерные значения нормированных амплитуд сигналов варьируются от 0.4 до 0.7 фТл/А.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УНЧ-СИГНАЛОВ ВДОЛЬ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для частот УНЧ/КНЧ-диапазона длина волны в атмосфере сопоставима с расстоянием до принимающей станции, поэтому распространение УНЧ электромагнитного поля вдоль земной поверхности и в ионосфере нельзя представлять на языке геометрической оптики. Для оценки ам-

плитуд сигналов в точках регистрации можно использовать аналитические соотношения из теории низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля–ионосфера [Bannister, 1979]. Учет влияния ионосферы в этой теории сводится к введению поправок, описывающих отражение волны от импедансного слоя на высоте нижней ионосферы.

На малых удалениях от ЛЭП магнитный эффект можно оценить по формуле для горизонтального поля, создаваемого бесконечным линейным проводом с током, подвешенным на



**Рис. 3.** Амплитуды сигналов, нормированные на величину тока излучающей установки (в фТл/А), которые были зарегистрированы на станции SP для различных дней (по мировому времени). 17, 19 и 21 сентября излучала ЛЭП Л-154 (суб-меридиональная), в остальные дни – Л-403 (северо-западная ориентация).

высоте  $z_d$  над поверхностью Земли с конечной проводимостью  $\sigma$  [Boteler and Pirjola, 1998],

$$B_x(x, \omega) = \frac{\mu J_0}{2\pi} \left[ \frac{z_d}{z_d^2 + x^2} + \frac{z_d + 2p}{(z_d + 2p)^2 + x^2} \right], \quad (1)$$

где  $p = \frac{1+i}{2} \delta = -(1+i)/\sqrt{2\omega\mu\sigma}$  – комплексная глубина мнимого тока;  $\delta = \sqrt{2/\mu\sigma\omega}$  – скин-длина;  $\mu$  – магнитная постоянная. На низких частотах, где  $x \ll \delta(\omega)$  и  $z_d \ll \delta(\omega)$ , из (1) следует, что магнитное поле в точке приема должно расти с частотой  $B_x(\omega) \propto \sqrt{\omega}$ , а на высоких частотах, где  $x \gg \delta(\omega)$ , поле падает  $B_x(\omega) \propto 1/\sqrt{\omega}$ . Таким образом, соотношение (1) дает возможность качественно объяснить образование немонотонной зависимости создаваемого возмущения от частоты, но только на небольших удалениях (несколько сотен км).

**Модель 1.** Для оценок величины поля на больших удалениях от излучателя воспользуемся аналитической теорией поля в плоском волноводе между идеально проводящей Землей и однородной гиротропной ионосферой на высоте  $h$ , находящимися в вертикальном геомагнитном поле [Собчаков и др., 2003]. Предполагается, что ток ЛЭП длиной  $L$  и замыкающий его ток в земной коре на глубине  $\delta$  образуют точечный магнитный диполь с моментом  $M(\omega) = J_0 L \delta(\omega) / \sqrt{2}$ . Поле

(компоненту, ортогональную антенне) на больших расстояниях (при  $r \gg L, h$ ) можно оценить из соотношения

$$B = \frac{i\mu M(\omega)}{2\pi r^2 h} \left[ 1 - \frac{i\beta}{k_0 h} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $k_0 = \omega/c$  – вакуумное волновое число. Для грубых оценок множитель, учитывающий влияние верхней гиротропной стенки  $[1 - i\beta/k_0 h]$ , можно заменить единицей, так как при выполнении условия применимости импедансного соотношения на ионосферной стенке  $k_0 n_{1,2} h \gg 1$ , коэффициент  $\beta \approx 1/n_1 + 1/n_2$  (где  $n_1, n_2$  – показатели преломления электромагнитных волн в ионосфере) мал [Ермакова et al., 2006]. Согласно соотношению (2), амплитуда поля спадает с расстоянием от источника как  $B(r) \propto r^{-2}$ , а зависимость амплитуды сигнала от частоты в пункте приема согласно (2) должна соответствовать  $B(\omega) \propto 1/\sqrt{\omega}$ . На частоте 1 Гц соотношение (2), в котором пренебрежено влиянием ионосферной гиротропной стенки, дает на  $r = 1610$  км при  $h = 100$  км амплитуду возмущения  $\sim 3$  фТл/А. Это значение заметно превышает измеренные на этой частоте на ст. SP значения  $\sim 0.5$  фТл/А.

**Модель 2.** Хотя все имеющиеся модели волновода Земля–ионосфера качественно верно описывают спадание электромагнитного поля с рас-

стоянием, но учет ионосферы в них возможно было провести лишь приближенно. В частности, эти модели не допускают возможности ионосферного канала распространения УНЧ-полей. Для описания возможного проявления ионосферных эффектов, мы использовали численную модель поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным призменным излучателем. Эта модель наиболее полным образом учитывает вертикально-неоднородную структуру ионосферы, и она успешно использовалась для расчета величины отклика в верхней ионосфере на работу передатчика ЗЕВС [Pilipenko et al., 2019] и промышленных ЛЭП [Fedorov et al., 2020]. Модель основана на численном решении полной системы уравнений Максвелла в вертикально неоднородных атмосфере и ионосфере. Вертикальная структура параметров ионосферы рассчитывается на основе модели International Reference Ionosphere – IRI ([https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)) для электронов и ионов и модели NRLMSISE-00 (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>) для нейтральных частиц. По полученным из этих моделей концентрациям ионов, нейтралов и их температурам рассчитываются частоты столкновений в ионосферной плазме и, далее, компоненты тензора проводимости как функции высоты  $z$  над Землей и частоты  $\omega$ .

Система уравнений Максвелла дополнена импедансным условием на поверхности Земли и условием излучения в верхней ионосфере. Решение уравнений Максвелла с указанными дополнительными условиями ищется в виде интеграла Фурье по горизонтальным координатам. В результате для расчета пространственных гармоник получается краевая задача для системы четырех обыкновенных дифференциальных уравнений с условиями на Земле ( $z = 0$ ) и на бесконечности, а также условием сшивки решения на уровне источника ( $z = z_d$ ). Последнее условие состоит в том, что горизонтальная электрическая компонента непрерывна, а горизонтальная магнитная компонента испытывает скачок, пропорциональный величине тока излучателя  $J_0$ .

Чтобы свести решение этой краевой задачи к задаче Коши, которую можно численно решать с помощью стандартных программ, мы используем метод адмиттанса. Матрица адмиттанса  $\mathbf{Y}$  связывает между собой электрическую  $\mathbf{E}$  и магнитную  $\mathbf{H}$  горизонтальные компоненты поля:  $\mathbf{H} = \mathbf{Y}\mathbf{E}$ . Матрица  $\mathbf{Y}$  удовлетворяет обобщенному уравнению Риккати, коэффициенты которого определяются коэффициентами системы уравнений Максвелла. Преимущество используемого адмиттансного метода в том, что он позволяет избежать неустойчивости процесса вычислений методом Рунге–

Кутта, вызванной наличием экспоненциально растущих решений [Fedorov et al., 2020].

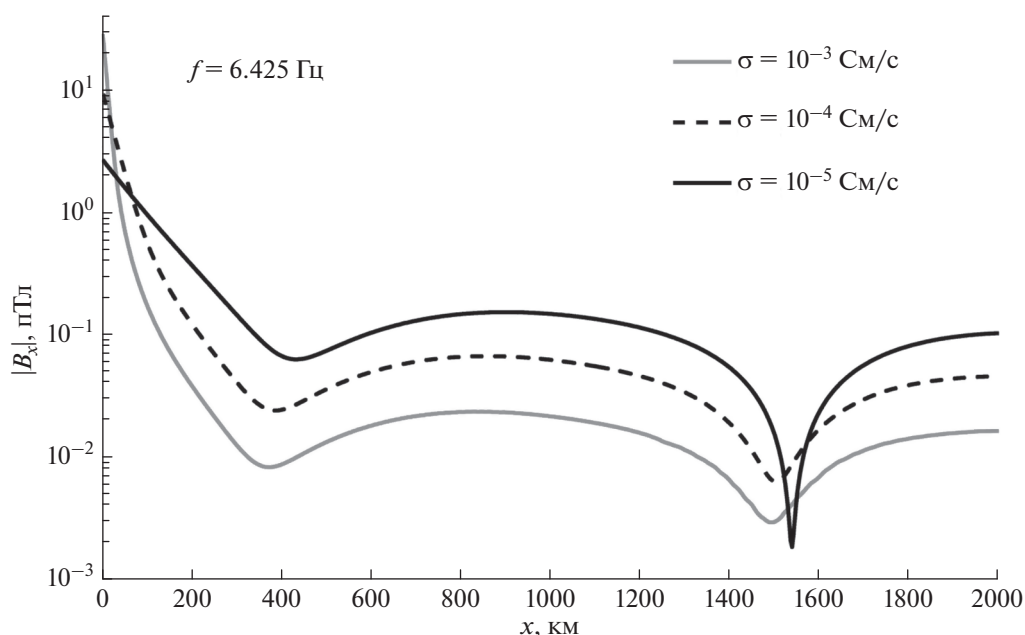
Параметры IRI были выбраны соответствующими ночным условиям в 23 UT 20.09.2019 г. и широте  $69^\circ$ , на которой находится излучающая ЛЭП. Ионосферные интегральные проводимости Педерсена и Холла, полученные из модели IRI,  $\Sigma_p = 0.05$  См,  $\Sigma_H = 0.12$  См. ЛЭП расположена на кристаллическом щите с очень низкой удельной электропроводимостью, среднее значение по трассе принимается  $\sigma \sim 10^{-4}$  См/м. Согласно модели геомагнитного поля IGRF (<http://www.geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/IGRF.html>), наклон магнитного поля в точке излучателя составляет  $I = 78^\circ$ . Поскольку отличие от вертикального магнитного поля мало, мы полагаем  $I = 90^\circ$ .

В качестве первого шага мы полагаем, что линейный ток источника бесконечно длинный. Это предположение приводит к завышению оценки эффекта от реалистичного тока с конечной длиной  $L = 100\text{--}120$  км, поскольку сводит задачу распространения вдоль земной поверхности фактически к одномерной. Вычисленные компоненты поля соответствуют току источника  $J_0 = 1$  А, направленному по оси  $y$  ( $\mathbf{B}-3$ ).

Рисунок 4 показывает пространственную структуру амплитуды СЮ-компоненты магнитного поля  $B_x(x)$  для расстояний  $x = 0\text{--}2000$  км поперек токового источника на частоте  $f = 6.425$  Гц для трех значений удельной электропроводности Земли. Расчеты показывают, что проводимость заметно влияет на величину возбуждаемого поля: уменьшение  $\sigma$  на 2 порядка приводит к увеличению поля почти на порядок. Качественно, возбуждаемое поле можно представить как суперпозицию поля горизонтального наземного тока и поля мнимого тока в Земле на глубине скин-длины  $\delta(\sigma, f)$ . Чем выше  $\sigma$ , тем ближе оказываются источник и мнимый ток, и тем в большей степени они компенсируют друг друга, что приводит к уменьшению магнитного эффекта с ростом проводимости.

Пространственная структура возбуждаемого электромагнитного поля имеет характерную особенность. Вблизи излучателя ( $x < 400$  км) амплитуда поля  $|B_x(x)|$  резко спадает с расстоянием, однако на больших расстояниях ( $x > 500$  км) поле имеет осциллирующий характер с медленно убывающей амплитудой. Минимумы поля вдоль трассы образуются на расстояниях  $\sim 400$  км и  $\sim 1500$  км, при этом отношение величин возбуждаемого поля в максимуме и в минимуме может достигать порядка величины. В принципе, это обстоятельство может приводить к ослаблению отклика на определенных частотах при наблюдениях.

Для выяснения физического механизма распространения УНЧ-сигнала на большие расстояния рассмотрим пространственные структуры

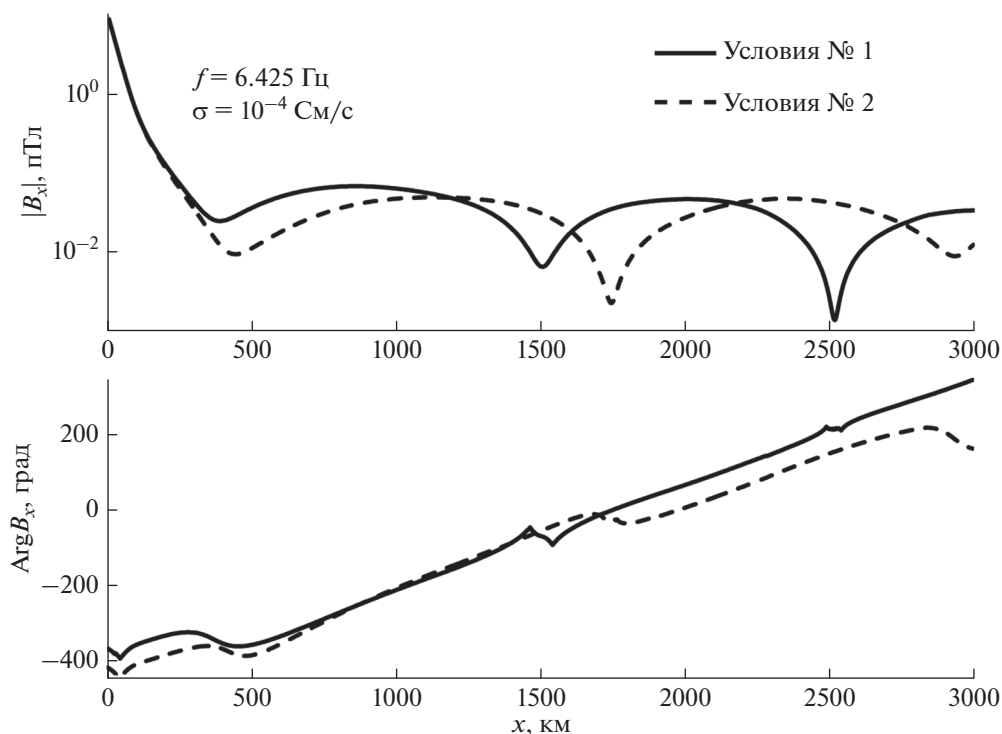


**Рис. 4.** Пространственная структура магнитного поля (компонента  $B_x(x)$ ), возбуждаемого бесконечным линейным током на частоте 6.425 Гц при разных проводимостях  $\sigma$  земной коры.

амплитуды  $|B_x(x)|$  и фазы  $\text{Arg } B_x(x)$  возбуждаемого поля (рис. 5). Почти линейный рост фазы с расстоянием, с отклонениями в области минимумов поля, соответствует фазовой скорости распространения  $V \sim \lambda f$ , где длина волны  $\lambda$  — это расстояние, на котором набег фазы составляет  $360^\circ$ . При наличии волноводного распространения излучаемой энергии вдоль ионосферы, возбуждаемое поле должно зависеть от свойств ионосферы. Рисунок 5 дает сравнение пространственной структуры поля для двух ночных ионосферных условий, характеризуемых параметрами модели IRI: условия № 1 (20.09.2019 г., 23 UT,  $\Sigma_p = 0.05$  См,  $\Sigma_H = 0.12$  См) — сплошная линия и условия № 2 (08.12.2007 г., 19 UT,  $\Sigma_p = 0.04$  См,  $\Sigma_H = 0.11$  См) — пунктирная линия. В обоих случаях поле имеет немонотонно спадающий с расстоянием характер, но с разными пространственными масштабами. Кажущаяся скорость распространения, определяющая скорость нарастания фазы с расстоянием, также различна для разных ионосферных условий. Для ионосферных условий № 1 фазовая скорость  $V \sim 8 \times 10^3$  км/с, для условий № 2 —  $V \sim 10^4$  км/с. На частотах ниже критической частоты ионосферного волновода распространение возмущения вдоль ионосферы становится невозможным. Расчет структуры поля на частотах, меньших критической частоты волновода, показывает, что спадание поля становится монотонным, и осцилляционная структура возмущения пропадает.

На удалении 1610 км, соответствующем ст. SP, характерные амплитуды магнитного возмущения для  $J_0 = 1$  А при проводимости  $\sigma \sim 10^{-4}$  См/м составляют  $|B_x| \sim 30$  фТл (рис. 4). Это значение значительно превышает зарегистрированные на SP величины  $\sim 0.5$  фТл/А (рис. 3). Такое завышение оценки вызвано грубостью численной модели, в которой в качестве источника взят бесконечный ток. Это упрощение приводит к более медленному геометрическому убыванию поля на больших расстояниях от источника. В реалистичном двумерном случае, как показывает соотношение (2), поле должно спадать как  $r^{-2}$ , поэтому в расчеты пространственной структуры поля с бесконечным током следует ввести дополнительный геометрический фактор  $\sim (L/r)$ . Эта корректировка приведет к уменьшению теоретической оценки в  $\sim 16.1$  раз. Полученные значения  $\sim 2-4$  фТл/А примерно согласуются с теоретической оценкой (2), однако обе оценки по крайней мере в несколько раз превышают измеренные на ст. SP значения. Особенности частотной зависимости принимаемых сигналов и моделирование этой зависимости будут рассмотрены ниже.

**Модель 3.** В этой плоскостной модели горизонтальный электрический диполь размером  $L$  расположен на границе раздела между однородно проводящей Землей и атмосферным промежуток с конечным сопротивлением. С удалением от источника волна в Земле быстро затухает и в зоне квазистационарного приближения достигает точки наблюдения по воздуху. На своем пути она



**Рис. 5.** Пространственные структуры амплитуды  $|B_x(x)|$  и фазы  $\text{Arg } B_x(x)$  возбуждаемого поля на частоте  $f = 6.425$  Гц над Землей с проводимостью  $\sigma = 10^{-4}$  См/м для двух ионосферных условий: № 1 (сплошная) и № 2 (пунктирная).

преломляется на границе Земля–воздух и проникает в нижнее полупространство и распространяется вертикально вниз в виде плоской волны с экспоненциальным затуханием по глубине. При расчете электромагнитных полей учитывается влияние проводящего ионосферного слоя, характеризуемого высотой слоя и удельной электропроводностью. Математическое решение одномерной прямой задачи основано на использовании матриц полоидальных и тороидальных мод в многослойной среде. Численное решение задачи распространяется на все зоны источника (стационарную, квазистационарную и волновую) и учитывает влияние токов смещения и ионосферы [Жамалетдинов и др., 2015].

Пример расчета поля в зависимости от расстояния  $R$  (компонента  $B_x(R)$ ) на частоте 1.0 Гц в рамках модели 3 от заземленного электрического диполя с линейным размером  $L = 100$  км с учетом влияния ионосферного проводящего слоя и токов смещения при разных проводимостях земной коры дан на рис. 6. Ионосферный слой с сопротивлением  $\rho = 10^4$  Ом м расположен на высоте 100 км и отделен от Земли слоем атмосферы с сопротивлением  $10^{14}$  Ом м. Расчет показывает, что с хорошей точностью спадание амплитуды магнитной компоненты следует закону  $\sim R^{-2}$ . На удалении  $R = 1610$  км амплитуда возмущения составляет

$\sim 0.1\text{--}1.0$  фТл/А в зависимости от проводимости подстилающей поверхности.

### 5. ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА ОТ ЧАСТОТЫ

Влияние ионосферы вносит дополнительные особенности в частотную зависимость принимаемых сигналов. Во время экспериментов с ЛЭП были обнаружены локальные минимумы в частотной зависимости принимаемых сигналов. Ермакова и др. [2005] при наблюдениях на сети финских магнитометров, удаленных на расстоянии от 500 до  $10^3$  км от передающей линии, не обнаружили ожидаемого из теоретической модели 1 спадания амплитуды сигнала с частотой. В то время как расчеты пространственного спадания амплитуды поля  $|B(x)| \sim x^{-2}$  качественно согласовались с наблюдениями при  $\sigma = 10^{-3}$  См/м, теоретически предсказанное уменьшение поля как  $\propto 1/\sqrt{f}$  расходилось с наблюдениями: на 480 км при изменении  $f$  от 1 до 4 Гц сигнал увеличивался более чем в 2 раза. В эксперименте по приему УНЧ-излучений от заземленной ЛЭП на Кольском п-ове на арх. Шпицберген измеренные амплитуды сигналов на расстоянии 1200 км в диапазоне 0.9–10 Гц варьировались в диапазоне 1–4 фТл/А [Терещенко и др., 2010]. При этом частотная зависимость амплитуды зарегистриро-



ванных сигналов имела характерное немонотонное поведение. Для сигналов, принятых на ст. SP, также не наблюдается предсказываемая соотношением (2) падающая зависимость от частоты. Напротив, образуется небольшой максимум на частотах  $\sim 2\text{--}4$  Гц (рис. 7, нижняя панель).

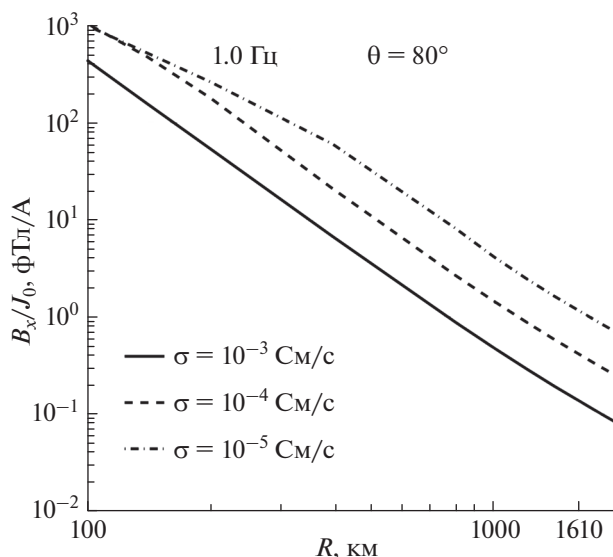
Модель 1, основанная на аналитическом соотношении (2), дает медленно падающую с частотой амплитуду принимаемого сигнала, что не соответствует немонотонной зависимости экспериментально зарегистрированных сигналов (рис. 7, верхняя панель). Спектральные особенности зарегистрированных сигналов на больших удалениях могут быть вызваны волноводным ионосферным распространением. Расчеты по численной модели 2 с корректным учетом реалистичной ионосферы показывают, что зависимость  $|B_x|(x)$  от расстояния на частотах 2–8 Гц на больших расстояниях ( $x > 500$  км) имеет осциллирующий характер, несколько различающийся для разных частот. Рассчитанная по численной модели амплитуда сигнала  $|B_x(f)|$  в зависимости от частоты в пункте наблюдения SP показана на рис. 7 (верхняя панель). Полученный график указывает на возможность появления осциллирующей зависимости от частоты. Однако неоднократно отмечалось, что модель IRI плохо применима для ионосферы высоких широт, поэтому детального согласия рассчитанной частотной зависимости с наблюдениями трудно ожидать.

Результаты рассчитанной зависимости  $B(f)$  по модели 3 даны на рис. 7 (нижняя панель). Модель предсказывает монотонно растущую с частотой зависимость, в отличие от модели 1. Хотя модель 3 дает качественно хорошее согласие с амплитудами зарегистрированных на SP сигналов, но она не может объяснить более тонкие особенности — их немонотонную зависимость от частоты.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

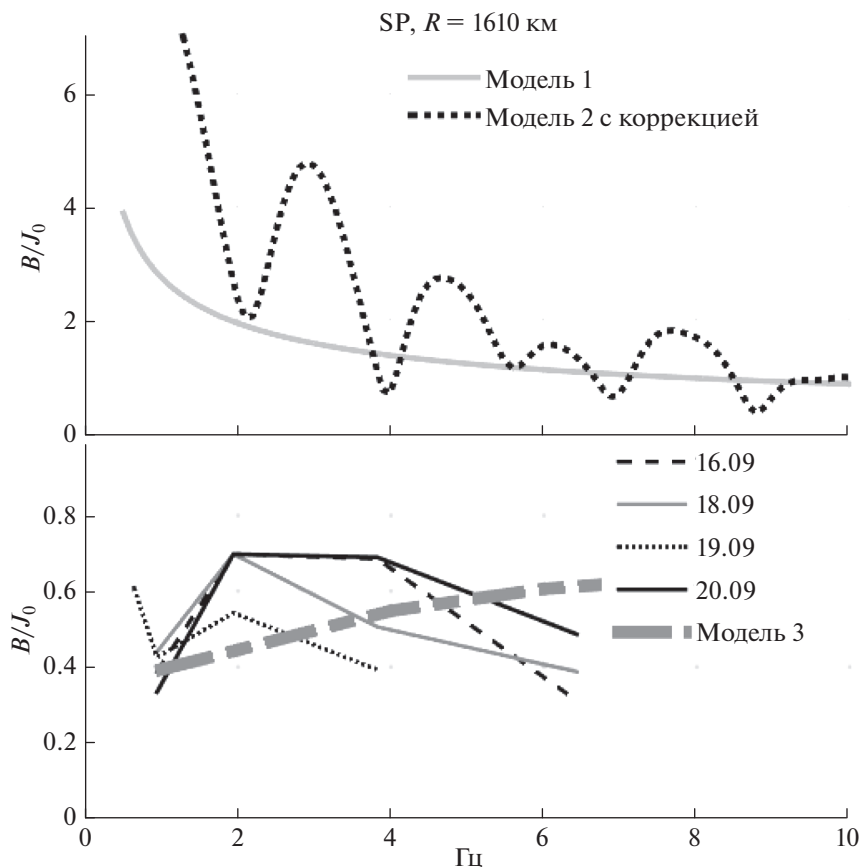
Соотношения из аналитической теории возбуждения волновода Земля–ионосфера (модель 1) дают завышенную оценку магнитного поля на больших расстояниях от горизонтальной антенны и монотонно падающую зависимость от частоты. Источник предполагается точечным, хотя его размеры сопоставимы с высотой ионосферы, и отсутствуют эффекты волноводного распространения вдоль ионосферы.

Принципиальное различие результатов численной модели 2 по сравнению с моделями 1 и 3 состоит в том, что ионосферное волноводное распространение, которое ранее не учитывалось, в этой модели дает заметный вклад в возбуждаемое поле в УНЧ-диапазоне на больших удалениях, в частности — приводит к немонотонной зависимости амплитуды принимаемого сигнала от ча-



**Рис. 6.** Пример расчета поля в зависимости от расстояния  $R$  (компонента  $B_x(R)$ ) заземленного электрического диполя линейным размером  $L = 100$  км на частоте 1.0 Гц в плоско-слоистой модели с учетом влияния верхнего проводящего слоя (ионосферы) и токов смещения при разных проводимостях земной коры. Ионосферный слой с удельным сопротивлением  $10^4$  Ом м расположен на высоте 100 км и отделен от Земли слоем атмосферы с сопротивлением  $10^{14}$  Ом м. Угол  $\theta$  измеряется между направлением на точку наблюдения и осью источника.

стоты. Хотя учет влияния ионосферы проводится достаточно полно и корректно, модель 2 содержит ряд существенных упрощений. Наиболее существенный недостаток модели состоит в том, что линейный источник считается бесконечным. Предположение о бесконечном размере излучающего токового источника приводит к отсутствию геометрического затухания и более эффективно возбуждению ионосферного волновода, чем от источника конечных размеров, и тем самым переоценивает амплитуды сигнала вдали от источника. При корректировке расчетов путем введения дополнительного геометрического фактора, модель 2 дает лучшее согласие с амплитудами зарегистрированных сигналов. Кроме того, бесконечный провод возбуждает только волны типа ТЕ (магнитная мода), которые непосредственно возбуждают ионосферный волновод. Волны типа ТН (электрическая мода), которые и обеспечивают сверхдальнее распространение в волноводе Земля–ионосфера, в нашей модели генерируются только за счет зацепления мод в гиротропном  $E$ -слое ионосферы. Конечный же токовый источник возбуждает обе моды. Таким образом, модель 2 может давать качественно верные результаты только вблизи источника больших размеров, но для расчета поля на больших удалениях она тре-



**Рис. 7.** Зависимость от частоты нормированной амплитуды магнитного сигнала  $|B_x(f)/J_0(f)|$  [в пТл/А] в пункте наблюдения на  $R = 1610$  км: верхняя панель — теоретическая зависимость по модели 1 (серая кривая) и модели 2 (черная точечная кривая); нижняя панель — экспериментально измеренная частотная зависимость амплитуды сигналов на ст. SP в разных сеансах и теоретически предсказанная по модели 3 (штрихпунктирная серая линия).

бует существенной модификации на случай конечной длины излучателя.

Наилучшее согласие с амплитудами зарегистрированных сигналов продемонстрировала модель 3. Однако, согласно этой модели, амплитуда принимаемых сигналов должна медленно увеличиваться с частотой, что не соответствует наблюдаемой немонотонной зависимости. Возможно, модель может дать лучшее согласие с экспериментом, если вместо однородной проводимости земной коры учесть реальную зависимость поверхностного импеданса земной поверхности от частоты.

Для интерпретации осцилляторной структуры спектра принимаемого искусственного сигнала на арх. Шпицберген от заземленной ЛЭП на Кольском п-ове, Терещенко и др. [2010] проводили расчет поля горизонтального источника в волноводе, образованном двумя изолированными проводящими пластинами, с помощью метода двумерного телеграфного уравнения. Когда расстояние между проводниками мало по сравнению с длиной волны, распространение волн в таком

волноводе успешно описывается двумерным телеграфным уравнением (дифференциальным уравнением в частых производных второго порядка), что значительно проще описания в рамках системы уравнений Максвелла [Кириллов, 1996]. Коэффициентами такого двумерного телеграфного уравнения являются введенные поверхностная плотность емкости и локальная индуктивность ионосферы. Наблюдаемая осцилляторная зависимость от частоты была качественно объяснена влиянием ИАР. Используемая нами численная модель также предсказывает немонотонную частотную зависимость амплитуды принимаемых сигналов, однако на больших расстояниях ( $>1000$  км) она обусловлена не наличием ИАР, а волноводным распространением в ионосферном канале.

К сожалению, непосредственно по трассе распространения нет ионосферных станций чтобы проверить зависимость прохождения от ионосферных условий. Поэтому мы воспользовались данными ст. Москва (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/foF2>), чтобы грубо охарактеризо-

вать ионосферные условия в Европейской части РФ в моменты сеансов ( $UT = 0$ ). По данным геомагнитных индексов и ионозонда параметры  $F2$ -слоя были в целом стабильные  $foF2 \sim 2.1\text{--}2.9$  МГц. Только 17 сентября наблюдается скачок  $foF2$  более чем в 2 раза до 4.5 МГц. В более плотной ионосфере затухание волноводной моды должно быть больше [Mazur et al., 2018]. На характерной частоте 1.94 Гц амплитуда сигнала на SP падает (хотя и немного) именно в ночь с 16 на 17 сентября.

Успешность проведения экспериментов серии FENICS подводит к идее, что излучение ЛЭП можно использовать в качестве контролируемого источника УНЧ-волн, излучаемых в верхнюю ионосферу. Геомагнитная широта установок типа FENICS на Кольском п-ове соответствует сердцевине внешнего радиационного пояса Земли ( $\sim 5.5\text{--}6.5 R_E$ ). Электроны релятивистских энергий, образующие радиационный пояс, могут резонансно рассеиваться по питч-углам на ионноциклотронных волнах герцового диапазона и высыпаться в атмосферу. Таким образом, в перспективе, наземный излучатель УНЧ- волн можно использовать для контроля уровня интенсивности внешнего радиационного пояса. Для оценки теоретической возможности этого механизма необходимо рассчитать прохождение в верхнюю ионосферу электромагнитных УНЧ-излучений, возбуждаемых наземной линейной антенной, и апробировать расчеты с помощью архива спутниковых наблюдений во время экспериментов FENICS.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент FENICS-2019 показал, что наблюдательный пункт с хорошим индукционным магнитометром может уверенно регистрировать УНЧ-сигналы линейного излучателя с токами порядка нескольких десятков ампер на удаленях до 2000 км. Такие излучатели действительно можно использовать в качестве искусственного источника для проведения глубинного МТЗ на громадной площади. Из трех рассмотренных теоретических моделей ни одна не дала удовлетворительного согласия с наблюдениями на ст. SP. Наилучшее согласие с амплитудами зарегистрированных сигналов продемонстрировала модель 3, хотя предсказываемая ей частотная зависимость не соответствует наблюдаемой немонотонной зависимости. Численное моделирование структуры поля по модели 2, показало возможность волноводного распространения герцовых сигналов вдоль ионосферы и немонотонной зависимости амплитуды принимаемых сигналов от частоты. Однако допущение о бесконечном размере токового источника приводит к сильно завышенным оценкам амплитуды сигнала. Об эффективности ионосферного канала распространения можно

будет окончательно судить после усовершенствования модели 2 для источника конечных размеров и проведения специализированных наблюдений на профиле станций.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность рецензенту за конструктивные замечания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований, № 18-05-00108 и № 18-05-00528 (ЖАА, ШАН).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н. и др. Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ излучений (0.3–12 Гц) на дистанции 1500 км // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 45. № 2. С. 156–162. 2002.
- Вайслейб Ю.В., Собчаков Л.А. Диполь вблизи плоской границы раздела двух сред // Антенны: Сб. науч. статей. Вып. 27. Редкол.: А.А. Пистолькорс (гл. ред.) и др. М.: Связь. С. 98–109. 1979.
- Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ диапазона // Докл. АН. Т. 338. № 1. С. 106–109. 1994.
- Гульельми А.В. Гидромагнитная диагностика и геоэлектрическое зондирование // УФН. Т. 158. С. 605–637. 1989.
- Ермакова. Е.Н., Котик Д.С., Собчаков Л.А., Поляков С.В., Васильев А.В., Бёзингер Т., Белова Н.И. Экспериментальные исследования распространения искусственных электромагнитных сигналов в диапазоне 0.6–4.2 Гц // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 48. № 9. С. 788–799. 2005.
- Ермакова Е.Н., Рябов А.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Кудин Д.В. Новая станция для мониторинга космических и атмосферных электромагнитных излучений // Вестник ОНЗ РАН. Т. 11. NZ1105. 2019. <https://doi.org/10.2205/2019NZ000362>
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П. и др. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент “FENICS”) // Геофизические процессы и биосфера. Т. 14. № 2. С. 5–49. 2015.
- Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н., Скобыходов А.А., Колобов В.В., Ивонин В.В., Колесников В.В. Эксперимент “Мурман-2018” по дистанционному зондированию с целью исследования границы “непроницаемости” на переходе между хрупким и пластичным состояниями кристаллической земной коры // Докл. АН. Т. 486. № 3. С. 91–96. 2019.
- Кириллов В.В. Двумерная теория распространения электромагнитных волн СНЧ-диапазона в волноводе Земля–ионосфера // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 39. № 12. С. 1103–1112. 1996.

- Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Формирование резонансной структуры локальной индуктивности ионосферы в диапазоне 0.1–10 Гц // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 46. № 1. С. 1–12. 2003.
- Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земли-ионосфера и в ионосфере // М.: Наука, 148 с. 1993.
- Собчаков Л.А., Астахова Н.Л., Поляков С.В. Возбуждение электромагнитных волн в плоском волноводе с анизотропной верхней стенкой // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 46. № 12. С. 1027–1037. 2003.
- Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е. и др. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1–10 Гц // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 6. С. 855–856. 2007.
- Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Жамалетдинов А.А. Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне // Журн. технической физики. Т. 6. С. 907–913. 2018. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.06.4602453>
- Терещенко Е.Д., Иванов Н.В., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Исследование особенностей распространения в высоких широтах искусственного электромагнитного сигнала в диапазоне 0.1–10 Гц // Геомагнетизм аэрномия. Т. 50. № 5. С. 660–670. 2010.
- Bannister P.R. Extremely Low Frequency (ELF) Propagation // Naval Underwater Systems Center. NewPort. 1979.
- Bernstein S.L., Burrows M., Evans J.E. et al. Long range communication at extremely low frequencies // Proc. IEEE. V. 62. № 3. P. 292–312. 1974.
- Boteler D.H., Pirjola R.J. The complex image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the Earth by the auroral electrojet // Geophysical J. International. V. 132. P. 31–40. 1998.
- Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V. et al. A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km. // J. Geophys. Res. V. 111. A04305. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011420>
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. Modeling ELF electromagnetic field in the upper ionosphere from power transmission lines // Radio Sci. V. 55. e2019RS006943. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019RS006943>
- Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning // J. Geophys. Res. V. 123. P. 6692–6702. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025622>
- Pilipenko V.A., Chugunova O.M., Engebretson M.J., Lesard M. Trans-polar propagation of Pi1 wave burst as observed by an Antarctic array during the Themis 2007/03/23 substorm // “Physics of Auroral Phenomena”. Proc. 34 Annual Seminar. Apatity. P. 86–89. 2011.
- Pilipenko V., Fedorov E. Coupling mechanism between geoaoustic emission and electromagnetic anomalies prior to earthquakes // Research in Geophysics. 4:5008. 2014. <https://doi.org/10.4081/rg.2014.5008>
- Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., Mazur N.G. Electromagnetic field in the upper ionosphere from ELF ground-based transmitter // J. Geophys. Res. V. 124. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JA026929>
- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Tsegmed B. et al. Considering the potential of IAR emissions for ionospheric sounding // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 164. P. 229–234. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.026>