

УДК 550.388

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕВС И ЛЭП «СЕВЕРНЫЙ ТРАНЗИТ» В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CSES

© 2025 г. Н. В. Савельева^{1, *}, В. А. Пилипенко^{1, 2}, Н. Г. Мазур¹, Е. Н. Федоров¹, Ш. Чжао³¹Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия³Национальный центр космических наук Китайской академии наук, Пекин, Китай

*E-mail: nasa2000@yandex.ru

Одно из проявлений воздействия деятельности человечества на околоземную среду, которое будет рассмотрено в данном обзоре, – это распространение электромагнитных излучений, генерируемых при работе ЛЭП и КНЧ передатчиков, через ионосферу в ближний космос. Низкоорбитальный спутник CSES, высота орбиты которого составляет 528 км, при пролетах над Кольским полуостровом регистрировал излучение передатчика ЗЕВС на частоте 82 Гц и излучение линии электропередачи «Северный Транзит» на частоте 50 Гц. Сигнал ЗЕВС был обнаружен на расстоянии от 600 до 2500 км между подспутниковой точкой и передатчиком. Электрическая антенна и магнитометр CSES зафиксировали узкополосное излучение на частотах 82 и 50 Гц. Для передатчика ЗЕВС исследована зависимость амплитуды сигнала от расстояния до источника. Для сопоставления с результатами численного моделирования рассмотрено поведение сигнала на малых (сотни км) и больших (тысячи км) расстояниях. В целом, данные измерений согласуются с результатами моделирования пространственной структуры волнового поля в верхней ионосфере вблизи переменного горизонтального тока конечной длины. Удивительной особенностью зарегистрированного события оказалось медленное спадание амплитуды 82 Гц излучения на удалениях от 600 до 1000 км по сравнению с модельными расчетами. Результаты наблюдений могут быть использованы для оценки степени электромагнитного «загрязнения» околоземной среды промышленной деятельностью.ⁱ

Ключевые слова: электромагнитное загрязнение, ионосфера, магнитосфера, ЗЕВС, ЛЭП, КНЧ радиоволны, CSES.

Для цитирования: Савельева Н.В., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Чжао Ш. Электромагнитные поля передатчика ЗЕВС и ЛЭП «Северный Транзит» в верхней ионосфере по данным спутника CSES // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 35–48. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_35

Введение

Возможное воздействие космической погоды на спутниковые и наземные технологические системы является одной из горячих точек современной космической геофизики, и число публикаций по этой теме растет лавинообразно [см. литературу в обзорах Пилипенко и др., 2021; 2024]. Одно из проявлений опасного воздействия космической погоды — это возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередачи (ЛЭП) и промышленных высоковольтных трансформаторах при сильных возмущениях геомагнитного поля. В то же время можно задаться вопросом: а существует ли обратное влияние технологических систем на околоземную среду? Оказывается, ответ на этот вопрос – положительный. Одно из проявлений воздействия промышленной деятельности человечества на околоземную среду, которое будет рассмотрено в данном обзоре, – это генерация электромагнитных излучений в ближнем космосе при работе ЛЭП и мощных наземных радиопередатчиков. Признаки такого влияния были обнаружены несколько десятков лет назад, но значимость этих эффектов постоянно возрастает по мере промышленного развития.

ⁱ По материалам доклада на VII Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах».

Электромагнитный отклик ионосферы на искусственные воздействия (радиопередатчики) был обнаружен в диапазоне от очень низких частот (ОНЧ) (3–30 кГц) до крайне низких частот (КНЧ) (30 Гц–3 кГц). Заметной эффективности излучения в КНЧ диапазоне можно ожидать только для крупномасштабных излучающих систем. Такие КНЧ передатчики действительно работают в России, Китае, США. Просачивание сигнала КНЧ передатчика в верхнюю ионосферу было обнаружено по данным низкоорбитального спутника DEMETER [Pilipenko et al., 2019].

Таковыми крупномасштабными излучателями являются и сети ЛЭП, протянутые на многие сотни километров [Пилипенко и др., 2021]. Различают два типа излучений, создаваемых ЛЭП. Первый – PLE (*power line emission*) излучение на основной промышленной частоте 50–60 Гц и ее первых гармониках (обычно наблюдается третья гармоника). Излучение ЛЭП на частоте 50–60 Гц – один из наиболее распространенных видов электромагнитного излучения антропогенного происхождения, исходящего от Земли и проникающего в ближний космос [Dudkin et al., 2015; Zhao et al., 2022; Ma et al., 2024]. Вторым – PLHR (*power line harmonic radiation*) излучение в ОНЧ диапазоне на гармониках промышленной частоты 50–60 Гц. Особенностью данного типа является наличие интенсивного излучения на частотах гармоник с высокими номерами (> 20), что представляется странным, так как, казалось бы, интенсивность излучения должна падать с увеличением номера гармоники. Высокая интенсивность излучений типа PLHR связана с тем, что на этих частотах длина электромагнитной волны становится сопоставимой с длиной магистральной ЛЭП, и ЛЭП начинает работать как эффективная излучающая антенна. Оказалось, что оба типа излучений могут проникать в околоземное пространство и наблюдаться не только на низких орбитах, но и в сердцевине магнитосферы [Nemec et al., 2015] и даже в сопряженной ионосфере [Wu et al., 2019]. В данной работе в качестве примера обнаружения излучений наземного КНЧ передатчика и ЛЭП в верхней ионосфере представлены случаи пролётов низкоорбитального спутника CSES-01 над Кольским полуостровом в течение 2022 г.

КНЧ передатчики и ЛЭП на Кольском полуострове

КНЧ передатчик ЗЕВС (рис. 1) расположен в центре Кольского полуострова, недалеко от Мурманска, на высокоомном Балтийском кристаллическом щите, проводимость которого доходит до $\sigma_g \sim 10^{-5}$ См/м. Установка состоит из двух заземленных параллельных горизонтальных антенн длиной по 60 км каждая, проложенных на расстоянии 10 км друг от друга в направлении с востока на запад. Антенны представляют собой натянутые между вышками высоковольтные провода, в которых создается переменный ток 200–300 А и частотой 82 Гц. Общая мощность установки достигает 2.5 МВт.

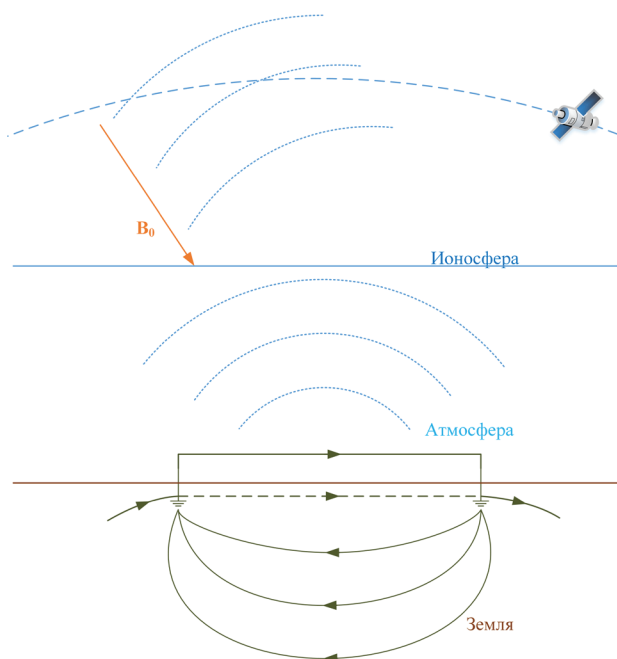


Рис. 1. Схематичное изображение электромагнитного поля, создаваемого заземленной горизонтальной линией в атмосфере, ионосфере и магнитосфере. При моделировании излучающая антенна смещается под землю на небольшую глубину (пунктир)

На территории Кольского полуострова периодически проводятся эксперименты FENICS (*Fennoscandian Electrical conductivity from Natural and Induction Controlled Sources soundings*) для глубинного зондирования литосферы [Жамалетдинов и др., 2015]. В качестве источника электромагнитного поля используются участки промышленных ЛЭП, подключаемых к генератору тока мощностью до 200 кВт с выходным напряжением до 1000 В. Генератор обеспечивает амплитуду тока в ЛЭП от 30 до 250 А в диапазоне частот зондирования от 200 до 0.1 Гц (с ростом частоты амплитуда тока уменьшается).

Вдоль Кольского полуострова от Мурманска до Петрозаводска идет магистральная трехфазная ЛЭП «Северный Транзит» с напряжением 330 кВ [Селиванов и др., 2023]. Если ЛЭП становится асимметричной (несбалансированной), т.е. нарушается симметрия между тремя фазами тока, то это приводит к потерям передаваемой мощности из-за излучения электромагнитной энергии на 50–60 Гц и их гармониках, т.к. суммарный пульсирующий ток отличен от нуля.

При рассмотрении возможных эффектов таких систем зачастую предполагается, что через ионосферу в космос «просачивается» очень малая часть электромагнитных волн. Тем не менее, современная спутниковая аппаратура позволяет регистрировать излучение таких систем на низких околоземных орбитах. Эта возможность была продемонстрирована при анализе данных китайского низкоорбитального спутника CSES-01 над Кольским полуостровом [Pilipenko et al., 2024]. В данной работе продолжено изучение возможностей спутника CSES-01 для регистрации излучений ЛЭП и передатчика ЗЕВС в северо-западной части России.

Аппаратура спутника CSES

Первый китайский сейсмо-электромагнитный спутник CSES-01 (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*) был запущен в феврале 2018 г. на солнечно-синхронную полярную орбиту высотой ~ 528 км с наклоном 97.4° и периодом обращения 95 минут для изучения сейсмо-электромагнитных явлений [Liu et al., 2024]. В составе оборудования спутника имеются 4.5-метровые антенны детектора электрического поля EFD для измерений в частотном диапазоне от 0 (DC) до 3.5 МГц [Diego et al., 2021]. Данные EFD выдаются в виде спектральной плотности мощности W_E [(мВ/м)²/Гц] с шагом по времени 0.408 секунды. В состав оборудования также входит индукционный магнитометр SCM, который измеряет вариации магнитного поля в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц, и выдает значения спектральной плотности мощности W_B [Тл²/Гц] с шагом по времени 0.004 секунды. Данные представлены в спутниковой системе координат (X_s , Y_s , Z_s), где ось X_s сонаправлена с вектором скорости спутника, Z_s направлена к центру Земли, а Y_s – дополняет ортогональную правостороннюю тройку. Чтобы избежать трудностей с переводом данных в систему координат, ориентированную по текущему геомагнитному полю, в настоящей работе анализируется модуль векторов электрической и магнитной компонент. Достоинством наблюдений на CSES по сравнению с аналогичной миссией DEMETER является постоянная работа в режиме с высокой частотой опроса (*burst mode*). На авроральных широтах высокочувствительная аппаратура спутника переходит в насыщение, поэтому на широтах выше 65° она обычно отключается.

Одновременная регистрация излучения ЗЕВС и ЛЭП «Северный Транзит»

Нами были проанализированы данные спутника CSES за год измерений и найдены несколько случаев одновременной регистрации излучения передатчика ЗЕВС и ЛЭП «Северный Транзит» на частотах 82 и 50 Гц. Ниже приводится описание одного из случаев регистрации излучений ЗЕВС и ЛЭП, когда сигналы от обоих источников были видны наиболее отчетливо. При пролете 21 марта 2022 г. в ночные часы аппаратура спутника CSES начала регистрировать узкополосное излучение с частотой 82 Гц примерно с 22:55:30 UT (удаление от передатчика ~ 2000 км). Также вдоль всей восходящей орбиты регистрировалось излучение на частоте 50 Гц (рис. 2).

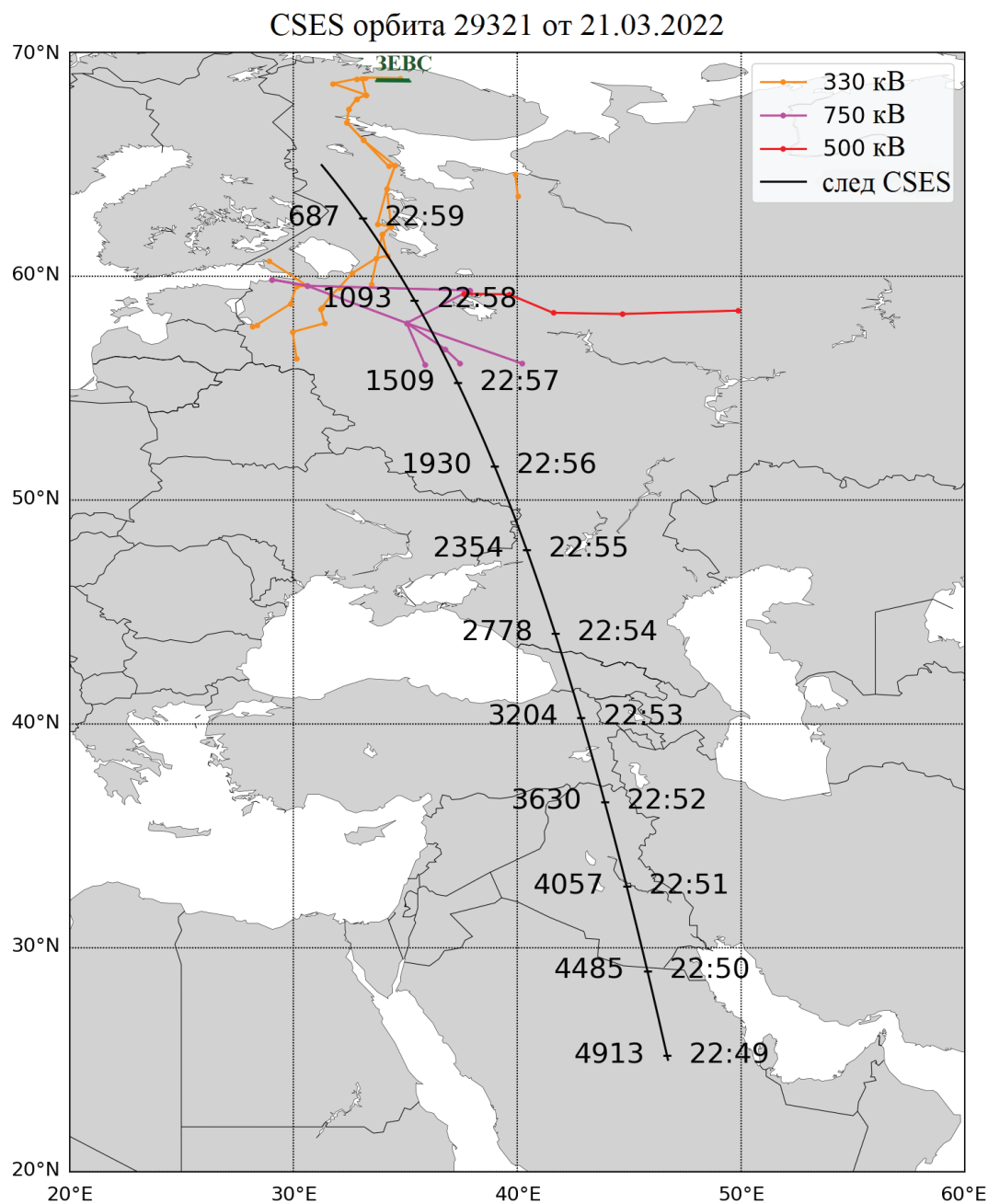


Рис. 2. Траектория подспутниковой точки (черная линия). Оранжевыми линиями схематично показаны участки 330 кВ ЛЭП «Северный Транзит». Фиолетовым и красным показаны участки других ЛЭП 750 и 500 кВ соответственно. Передатчик ZEBC обозначен зеленой чертой

На рис. 3 показаны спектрограммы полной мощности электрической компоненты поля $W_E = W_x + W_y + W_z$ (верхняя панель). На нижней панели приведены графики логарифма спектральной мощности в момент времени 22:58:59 UT, когда CSES был на удалении ~ 680 км от ZEBC. В спектрах мощности электрических шумов отчетливо выделяются максимумы на частотах 82 и 50 Гц.

На рис. 4 (верхняя панель) показаны спектрограммы полной мощности магнитной компоненты поля W_B вдоль той же орбиты. В спектре суммарной мощности магнитных шумов для указанного на рисунке момента времени также четко выделяются спектральные максимумы на частотах 82 и 50 Гц (рис. 4, нижняя панель).

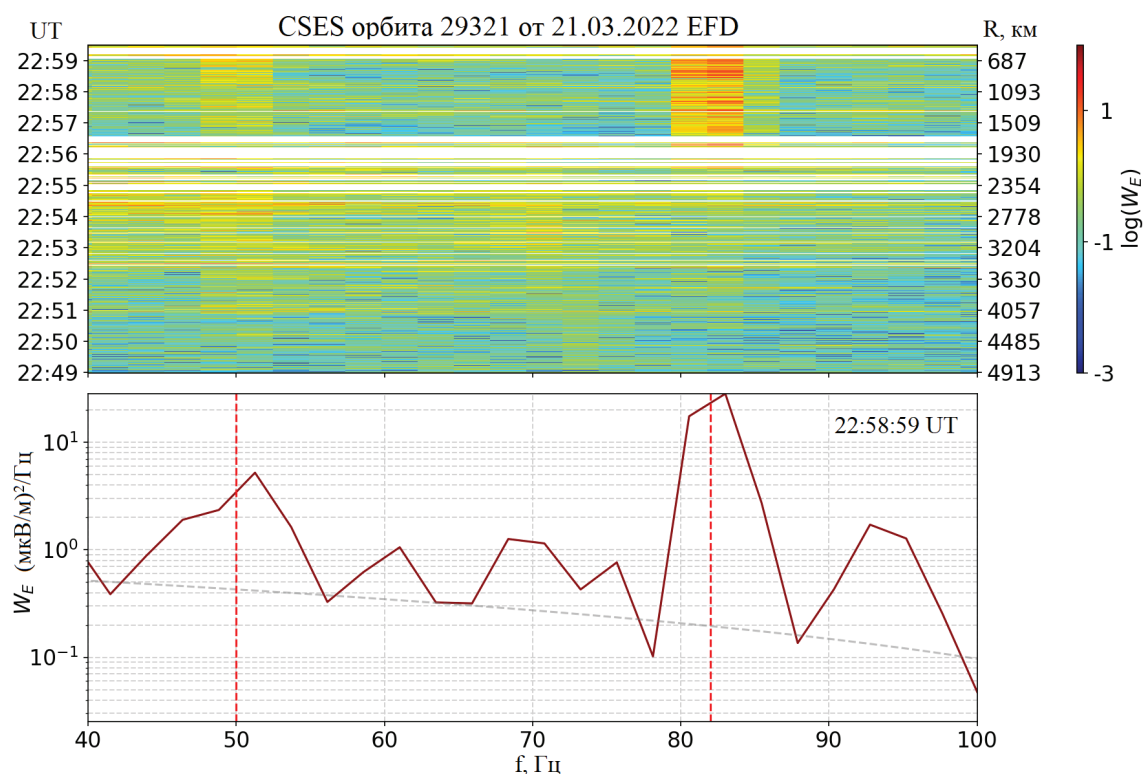


Рис. 3. Спектрограмма полной мощности электрической компоненты поля W_E [(мкВ/м)²/Гц] для события 21 марта 2022 г. (верхняя панель) и спектр мощности в указанный момент времени (нижняя панель). Пробелы на спектрограмме соответствуют участкам, сильно искаженным помехами, которые были удалены. На спектре пунктиром показан уровень фонового шума

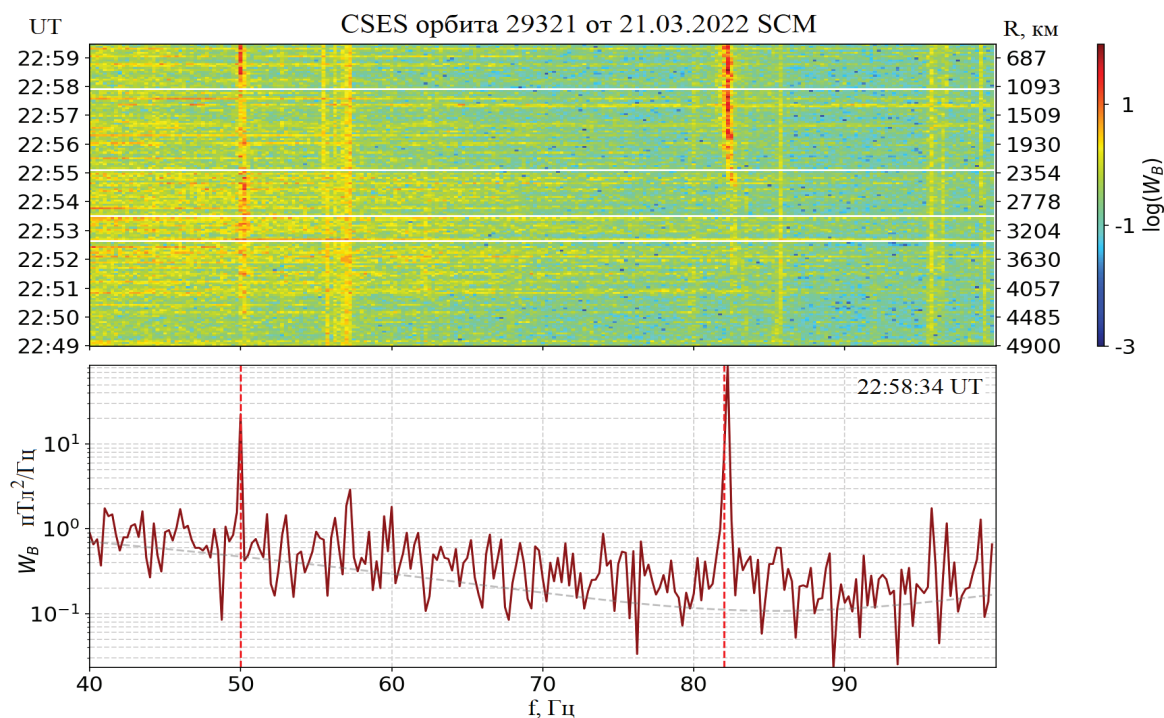


Рис. 4. Спектрограмма суммарной плотности мощности магнитной составляющей W_B [пТл²/Гц] для события 21 марта 2022 г. (верхняя панель) и спектр мощности в момент времени, указанный на рисунке (нижняя панель). Белые полосы на спектрограмме соответствуют измерениям, сильно искаженным помехами. Пунктиром обозначена фоновая составляющая шумов

На рисунках 5 и 6 приведены спектрограммы мощности и вариации амплитуд электрической и магнитной составляющей сигналов на частоте 82 Гц в зависимости от времени/расстояния. Участки, сильно искаженные всплесками широкополосных шумов, удалены. Амплитуда сигнала была оценена по соотношению $|E, B| = \sqrt{\tilde{W}_{E,B} \times \Delta f}$, где Δf – полоса пропускания принятого сигнала, а $\tilde{W}_{E,B}$ – относительная спектральная мощность сигнала над уровнем фона. Ширина полосы пропускания была рассчитана на уровне половины амплитуды сигнала относительно фона.

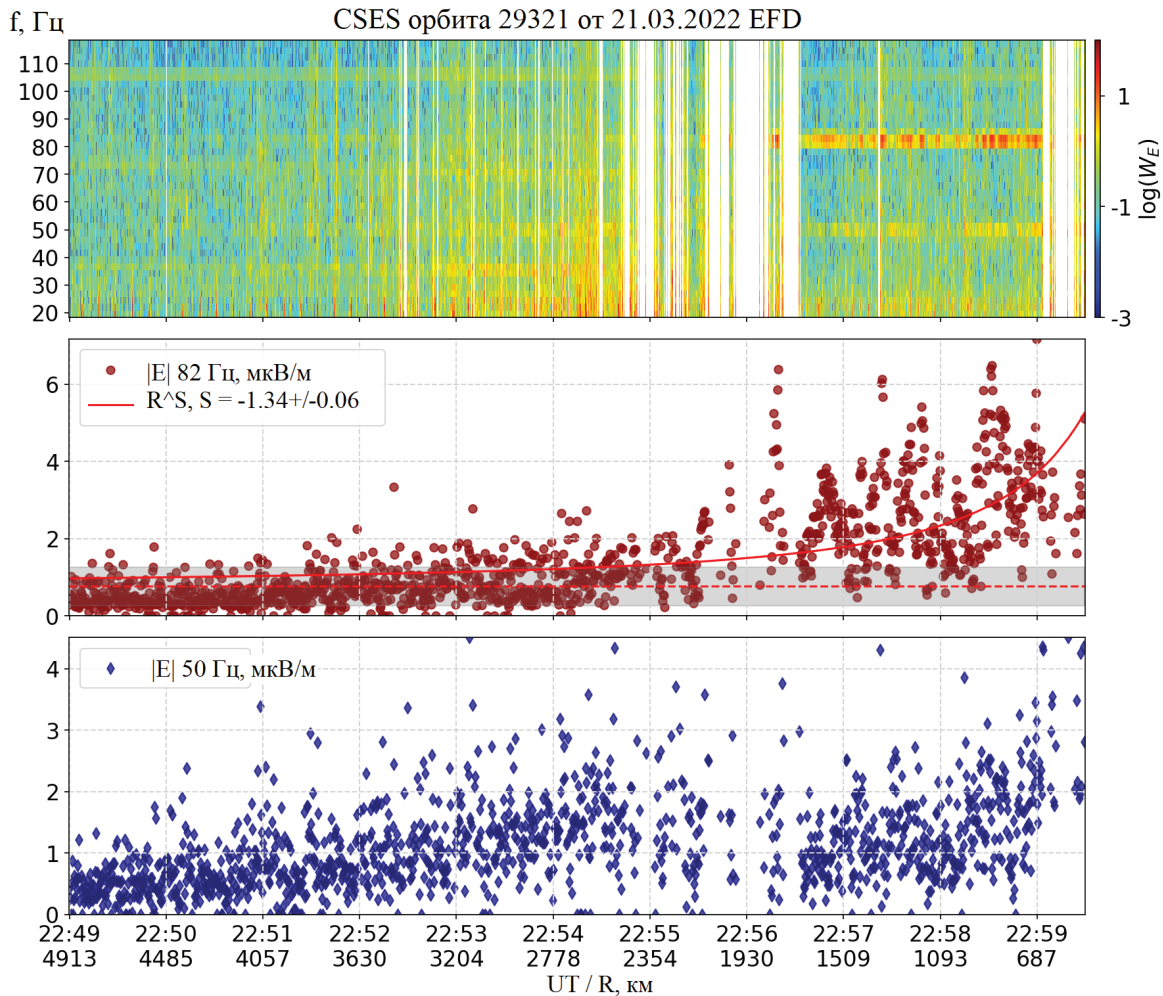


Рис. 5. Спектрограмма (верхняя панель) и зависимость амплитуды электрической компоненты сигнала $|E|$ на частотах 82 Гц (средняя панель) и 50 Гц (нижняя панель) от времени/расстояния. Сплошной линией показана степенная аппроксимация вариаций средней амплитуды. Красным пунктиром показан средний уровень шума, измеренный на удалении более 2000 км от источника сигнала 82 Гц; серым цветом обозначен диапазон в одно стандартное отклонение

На средней панели рис. 5 приведены данные об амплитуде сигнала 82 Гц и сплошной линией показана степенная аппроксимация вида: $|E(R)| \sim R^S$ зависимости амплитуды сигнала $|E(R)|$ от расстояния до источника R . Видна общая тенденция роста амплитуды $|E(R)|$ при приближении к передатчику, хотя дисперсия этой зависимости довольно велика. Степенное приближение дает значение показателя $S \sim -1.34 \pm 0.06$. На больших удалениях (> 1000 км) амплитуда спадает очень медленно. Спектральная мощность электрической компоненты поля на частоте 82 Гц достигает наибольших значений $W_E \sim 20$ (мкВ/м)²/Гц при минимальном удалении от передатчика (рис. 3).

На нижней панели рис. 5 представлена зависимость амплитуды электрической компоненты сигнала 50 Гц. Ввиду сложной формы сети ЛЭП в зоне видимости спутника, включающей несколько веток

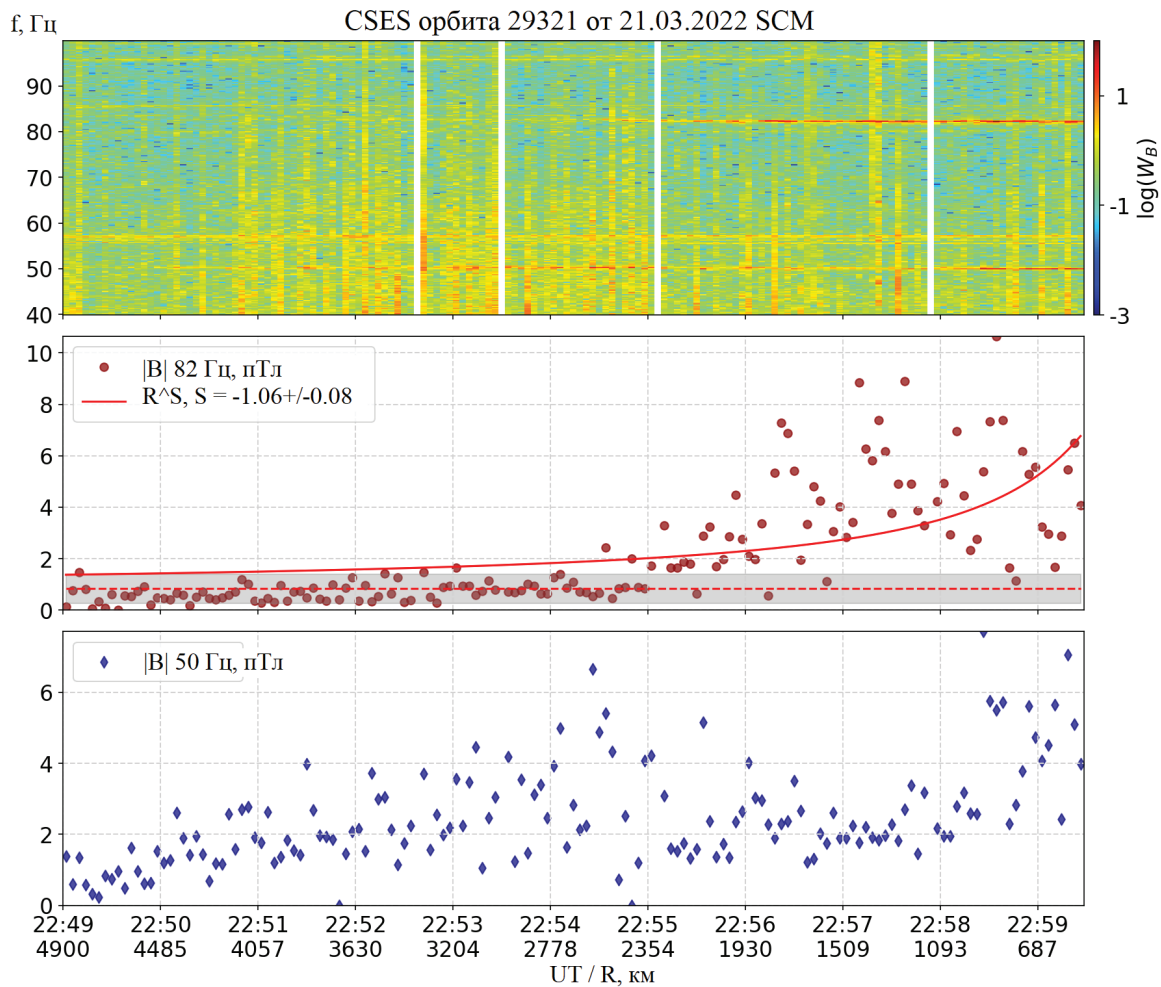


Рис. 6. Спектрограмма (верхняя панель) и зависимость амплитуды магнитной компоненты сигнала $|B|$ на частотах 82 и 50 Гц от времени/расстояния (средняя и нижняя панели). Сплошной линией показана степенная аппроксимация вариаций средней амплитуды. Красным пунктиром показан средний уровень шума, измеренный на удалении более 2000 км от источника сигнала 82 Гц; серым цветом обозначен диапазон в одно стандартное отклонение

мощных различных ЛЭП, зависимость амплитуды от времени имеет сложный характер. Спектральная мощность электрической компоненты сигнала 50 Гц достигает ~ 5.0 (мкВ/м)²/Гц относительно фона (рис. 3), а амплитуда сигнала в среднем составляет $|E| \sim 1.2$ мкВ/м (рис. 5).

На рис. 6 приведены спектрограмма мощности и вариации амплитуд магнитной составляющей сигналов на частотах 82 и 50 Гц в зависимости от времени/расстояния. Сплошной линией показана степенная аппроксимация вида $|B(R)| \sim R^S$ зависимости амплитуды магнитного сигнала $|B(R)|$ от расстояния до источника R . Степенное приближение дает значение индекса $S \sim -1.06 \pm 0.08$.

Магнитная компонента поля W_B на частоте 50 Гц прослеживается практически на всем протяжении измерений. Мощность сигнала достигает $W_B \sim 20.0$ (пТл)²/Гц относительно фона (рис. 4), среднее значение амплитуды составляет ~ 2.5 пТл (рис. 6). В Табл. 1 приведены расчетные значения мощности и амплитуды сигнала 82 Гц на заданных расстояниях от источника, необходимые для сравнения полученных результатов с данными теоретических расчетов.

Аппроксимация зависимости амплитуды от расстояния $E/B(R) = A \cdot R^S$ проводилась с использованием алгоритма Левенберга–Макварда [Gevin, 2019]. Основные «сложности» алгоритм испытал при определении коэффициента A : стандартное отклонение составило 38% от расчетной величины в случае электрической компоненты и 52% – магнитной компоненты. Причина заключается в полном отсутствии данных о мощности сигнала в диапазоне от 0 до 600 км, а также большой дисперсии

значений мощности сигнала в диапазоне от 600 до 2000 км, который сильно искажен шумами (рисунки 5 и 6). Значения стандартного отклонения показателя степени S составили примерно 4.5% от расчетного значения для электрической и 7.5% – магнитной составляющей.

Таблица 1.

Расчетные значения амплитуды электрической ($|E|$) и магнитной ($|B|$) компонент сигнала 82 Гц в зависимости от расстояния R от источника (ЗЕВС)

R , км	$ E (R)$, мкВ/м	$ B (R)$, пТл
600	3.53	5.09
700	2.87	4.32
800	2.40	3.75
900	2.05	3.31
1000	1.78	2.95

Моделирование электромагнитного поля горизонтального линейного проводника с током конечной длины над проводящей землей

Используя теорию возбуждения УНЧ-КНЧ волн в ионосфере заземленным горизонтальным током конечной длины [Федоров и др., 2022], нами разработана численная модель, которая была применена для расчета амплитуды излучения на спутниковых высотах для излучателей типа ЗЕВС ЛЭП «Северный Транзит» с учетом их реальных размеров. Численная схема расчета УНЧ-КНЧ поля в горизонтально-однородной модели ионосферы с реалистичным горизонтально-слоистым вертикальным профилем подробно описана в предыдущих работах [Fedorov et al., 2020; 2021; 2023], поэтому здесь мы приводим лишь краткое описание модели. Предполагается, что поле возбуждается горизонтальным заземленным на концах током, текущим вдоль оси X , которая направлена на запад, ось Y направлена на юг, а вертикальная ось Z направлена вверх.

При моделировании поля заземленной антенны, подвешенной над поверхностью земли, необходимо учитывать электрические токи, растекающиеся внутри земли. Самый простой способ – формально сместить изолированный источник тока вниз под поверхность земли на небольшую глубину (пунктирная линия на рис. 1). Это небольшое смещение антенны вниз не оказывает влияния на поле, создаваемое в атмосфере и ионосфере, но автоматически учитывает растекание электрического тока в земной коре [Федоров и др., 2022].

Мы ищем временную гармонику $\propto \exp(-i\omega t)$ магнитного $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ и электрического $\mathbf{e}(x, y, z, t) \equiv c^{-1} \mathbf{E}$ поля (c – скорость света) решения уравнений Максвелла с плотностью стороннего тока $\mathbf{j}(x, y, z)$. Представление электромагнитного поля через волновые потенциалы позволяет разделить ток возбуждения на потенциальную и вихревую составляющие, генерирующие ТЕ (поперечную электрическую) и ТМ (поперечную магнитную) моды соответственно. Исходная задача, очевидно, аксиально-несимметрична, тогда как потенциальная и вихревая составляющие тока возбуждения по отдельности являются аксиально-симметричными. Благодаря этому становится возможным разделить переменные с помощью преобразования Ганкеля и прийти к граничной задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений отдельно для безвихревой и вихревой составляющих тока возбуждения. В ионосфере продольная электрическая компонента e_z оказывается пренебрежимо малой, $\propto \epsilon_{\parallel}^{-1}$, из-за высокой проводимости плазмы вдоль геомагнитного поля $\mathbf{B}_0$. Продольная магнитная компонента B_z также оказывается на один-два порядка меньше по сравнению с горизонтальными компонентами.

В атмосфере электромагнитное возмущение является почти квазистатическим и затухает из-за геометрического расхождения, но в ионосфере, как в среде с очень высокой диэлектрической проницаемостью, длина волны и ее скорость сильно уменьшаются. Распространение КНЧ волн в

ионосфере оказывается сложным процессом, который отнюдь не сводится к прохождению через слой с конечной проводимостью. Процесс распространения включает в себя разложение исходного линейно-поляризованного возмущения на лево- и право-поляризованные моды с различными свойствами: циклотронный резонанс с ионосферными ионами, появление точек отражения и перекрестных частот, на которых происходит трансформация мод. Теоретический анализ осложняется невозможностью использовать квазиклассическое приближение и осевой несимметричностью задачи. Вопросы, связанные со спецификой прохождения КНЧ волн через реальную ионосферу, детально рассмотрены в [Fedorov et al., 2021], а физическая интерпретация численных расчетов путем сопоставления с приближенными аналитическими выражениями проведена в [Lizunov et al., 2023]. Рассматриваемый частотный диапазон PLE ближе всего по свойствам к ионным свистам.

Сопоставление результатов моделирования со спутниковыми данными

Естественно, возникает вопрос, какова должна быть интенсивность токов, протекающих в антеннах ЗЕВС и ЛЭП «Северный Транзит», чтобы возбудить излучение в верхней ионосфере, которое было зарегистрировано спутником? Для интерпретации наблюдений были проведены расчеты с использованием описанной выше численной модели отклика системы атмосфера-ионосфера на горизонтальный проводник конечной длины L с переменным током и частотой f , расположенный над землей с проводимостью σ_g [Fedorov et al., 2023].

Вертикальный профиль компонент тензора диэлектрической проницаемости среды рассчитывался по плазменным параметрам, задаваемым моделью IRI. Параметры IRI были выбраны соответствующими дневным условиям во время зарегистрированного события в месте расположения ЗЕВС. Атмосферная проводимость принята равной $\sigma_a = 10^{-14}$ См/м на поверхности земли и увеличивается экспоненциально до высоты 80 км, чтобы соответствовать профилю проводимости, полученному с помощью IRI. Поскольку отклонение от вертикали геомагнитного поля в месте расположения ЗЕВС небольшое (магнитное склонение $I = 78.6^\circ$), предположение о вертикальном $\mathbf{B}_0$ является разумным. Была рассчитана пространственная структура составляющих электрического и магнитного полей, генерируемого источником с длиной $L = 60$ км (ЗЕВС) и $L = 500$ км («Северный Транзит»). Орбита спутника (высота $z = 500$ км) примерно перпендикулярна антеннам установки ЗЕВС и проходит вдоль ЛЭП «Северный Транзит». Расчеты пространственной структуры амплитуды излучения даются соответственно поперек (ось Y) и вдоль (ось X) токового источника.

Для сравнения результатов модельных расчетов со средними амплитудами излучения, зарегистрированными на спутнике, рассматриваются удаления от передатчика ЗЕВС $\rho = 600$ и 1000 км. Поскольку орбита CSES проходила вблизи ЛЭП «Северный Транзит», удаление от линии полагалось $\rho = 200$ км. Расчеты проведены для силы тока в 1 А. На обеих частотах амплитуды поперечных компонент электрического поля оказались практически одинаковы, что указывает на круговую поляризацию зарегистрированного излучения в верхней ионосфере. Нормированная амплитуда достигает максимальной величины над источником ($\rho = 0$).

Согласно результатам модельных расчетов (рис. 7) и данным измерений (Табл. 1), для того, чтобы создать возмущение с амплитудами $|E| \sim 3.5$ мкВ/м и $|B| \sim 5.1$ пТл на удалении $\rho = 600$ км в антенне ЗЕВС величина тока должна быть $J_E (R = 600) = 3.5/9 \cdot 10^{-3} \sim 388$ А и $J_B (R = 600) = 5.1/7 \cdot 10^{-3} \sim 728$ А соответственно. Однако оценки для удаления $\rho = 1000$ км дают заметно большие величины необходимой амплитуды тока $J_E (R = 1000) = 1.8/4 \cdot 10^{-3} \sim 450$ А и $J_B (R = 1000) = 2.9/1.5 \cdot 10^{-3} \sim 1970$ А. Явно завышенные оценки для больших удалений спутника получаются, по-видимому, из-за некорректности применения модели с вертикальным геомагнитным полем для таких удалений.

В то же время, несбалансированный ток в ЛЭП «Северный Транзит» должен быть $J_E (R = 200) = 1.2/0.8 \sim 1.5$ А и $J_B (R = 200) = 2.5/0.4 \sim 6.2$ А, чтобы создать в верхней ионосфере на удалении $\rho = 200$ км излучение 50 Гц с регистрируемой на спутнике амплитудой. Поскольку

несбалансированный ток в ЛЭП обычно достигает 5–10% от передаваемого тока, то полученная по спутниковым измерениям оценка представляется разумной. Хотя, точное значение тока в момент наблюдения как в антенне ЗЕВС, так и ЛЭП, неизвестно.

Удивительной особенностью зарегистрированного события оказалось медленное спадание амплитуды 82 Гц излучения по мере удаления от передатчика ЗЕВС по сравнению с модельными расчетами. Наблюдаемое значение $S \sim -1.34$ для электрической и $S \sim -1.06$ для магнитной составляющей поля в диапазоне R от 600 до 1000 км оказалось существенно ниже величины, предсказанной численной моделью на больших расстояниях (> 300 км) и равной -1.75 . Это расхождение, предположительно,

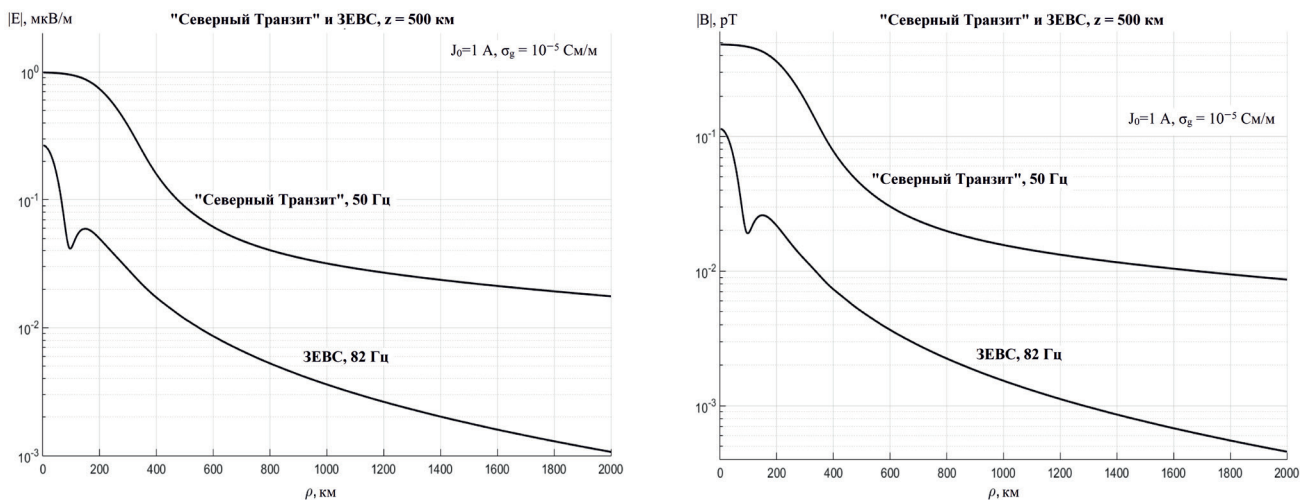


Рис. 7. Пространственная структура нормированных амплитуд горизонтальных компонент электрического $|E(\rho)|$ и магнитного $|B(\rho)|$ полей антенны ЗЕВС (0–2000 км) ($f = 82$ Гц, $L = 60$ км) и ЛЭП ($f = 50$ Гц, $L = 500$ км). Проводимость подстилающей поверхности $\sigma_g = 10^{-5}$ См/м, высота спутника над поверхностью Земли $z = 500$ км. Модель IRI рассчитана для 21.03.2022 г., 23:00:00 UT для широты установки ЗЕВС

вызвано неучетом наклонения геомагнитного поля в использованной модели. В то же время волна КНЧ диапазона в ионосферной плазме частично канализируется геомагнитным полем, как было показано в [Fedorov et al., 2021] для бесконечного источника. В результате изотропное излучение в атмосфере, в ионосфере формирует направленный «пучок» волн почти вдоль силовых линий геомагнитного поля. В пределах такого пучка амплитуда КНЧ излучения может изменяться незначительно. Также, на больших удалениях (> 1000 км) становится неприменимым приближение плоскостной однородной модели. Это предположение должно быть проверено более совершенной численной моделью.

Обсуждение и Заключение

Амплитуды 50 Гц излучения, зарегистрированные на CSES, качественно согласуются с результатами измерения интенсивностей PLE на других низкоорбитальных спутниках – порядка первых мкВ/м для электрической компоненты и порядка первых пТл – для магнитной. Отмечалось, что интенсивность PLE ночью обычно больше, чем днем [Nemec et al., 2015]. Численное моделирование показало, что эта асимметрия дня и ночи вызвана большим затуханием волн при распространении в дневной ионосфере [Fedorov et al., 2020]. На средних и низких широтах с наклонным геомагнитным полем максимальный отклик в верхней ионосфере на излучение наземных ЛЭП должен наблюдаться смещенным к экватору. Например, для 50 Гц излучения на широте 44° ($I = 60^\circ$) сдвиг максимума излучения должен составлять ~ 250 км на высоте 660 км [Fedorov et al., 2021]. Это смещение PLE к более низким широтам относительно ЛЭП, действительно, наблюдалось спутником «Чибис-М».

То обстоятельство, что PLE/PLHR обнаруживается на большом расстоянии от трехфазной ЛЭП (и даже в космосе) является показателем ее несбалансированной работы. Нарастание асимметрии и нарушение баланса ЛЭП может быть вызвано, помимо других причин, воздействием ГИТ на энергетические системы. Согласно многолетним наблюдениям спутника DEMETER, интенсивность PLE увеличивается во времена высокой вариабельности магнитного поля, то есть больших значений dB/dt , рассчитанных по данным наземного магнитометра [Nemec et al., 2015]. Интенсивности PLE на основной частоте энергосистемы и ее третьей гармонике над Европой и Северной Америкой, наблюдаемые при больших значениях вариабельности поля, оказываются систематически выше, чем интенсивности, наблюдаемые во время периодов спокойного геомагнитного поля.

Проведенные численные оценки проникновения КНЧ излучения от наземного источника конечной длины в ионосферу на малых удалениях (< 400 км) дают разумные значения токов излучателя [Pilipenko et al., 2024]. По данным миссии CSES впервые удалось определить закон спада в верхней ионосфере амплитуды КНЧ излучения наземного передатчика с расстоянием. Удивительной особенностью зарегистрированного события оказалось медленное падение амплитуды 82 Гц излучения по мере удаления от передатчика ЗЕВС по сравнению с модельными расчетами. В результате, численные расчеты для объяснения амплитуд 82 Гц излучения на больших удалениях (> 600 км) дают завышенные значения амплитуды тока в передатчике. Это расхождение модельных расчетов с наблюдениями на больших удалениях, предположительно, вызвано неучетом наклонения геомагнитного поля и сферичности Земли в использованной модели.

Высокая эффективность передатчиков типа ЗЕВС открывает возможность нового класса активных экспериментов. В мире имеется несколько гражданских УНЧ/КНЧ передатчиков с крупномасштабными горизонтальными излучающими антеннами: установка FENICS с длиной антенны ~ 100 км в России на Кольском полуострове [Жамалетдинов и др., 2015], и в Китае система CSELF (*Control Source Extremely Low Frequency*) и проект WEM (*Wireless Electromagnetic Method*), включающий две перекрестные антенны 60 км по ширине и 100 км в длину [Su et al., 2012]. Электромагнитные УНЧ волны герцового диапазона благодаря резонансному взаимодействию волна-частица, могут приводить к высыпанию электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом снижать уровень потоков электронов-«убийц» до безопасного для спутниковой электроники. Естественно, возникает идея использовать установку типа FENICS/WEM для возбуждения в ионосфере искусственных УНЧ излучений. Теоретическое моделирование показало, что установка FENICS с током ≥ 140 А может обеспечить при благоприятных условиях в ночные часы стимуляцию излучения в герцовом диапазоне с амплитудами ≥ 1 пТл и ≥ 10 мкВ/м, характерными для естественных сигналов Pc1 в верхней ионосфере [Пилипенко и др., 2024]. Поэтому установки типа FENICS/WEM могут эффективно использоваться как дешевый и эффективный инструмент для частичного опустошения радиационного пояса.

К настоящему времени наша планета оказалась в электромагнитной среде, по крайней мере в некоторых диапазонах частот, созданной скорее промышленной деятельностью, чем естественными процессами. Все больше появляется свидетельств антропогенного воздействия на природные процессы в околоземном пространстве. Это влияние было обнаружено не только в специальных активных экспериментах, но и как непреднамеренный побочный продукт развития техносферы. Интенсивность PLE в околоземном пространстве постепенно увеличивается со временем, она значительно возросла после внедрения в энергетику сверх-высоковольтных ЛЭП [Wu et al., 2019]. Электромагнитное загрязнение околоземного космического пространства наземными ЛЭП будет постоянно возрастать по мере индустриального развития общества и каких последствий можно ожидать, пока трудно предсказать.

Финансирование.

Работа поддержана госфинансированием ИФЗ РАН и ИКИ РАН.

Благодарности

В работе использованы данные спутника CSES, финансируемого Национальным космическим управлением Китая (*China National Space Administration*) и Управлением по борьбе с землетрясениями Китая (*China Earthquake Administration*).

Список литературы

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. 2015. Т. 14. № 2. С. 5–49. <https://elibrary.ru/tymjih>

Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Климов С.И. Электромагнитное загрязнение околоземного космического пространства излучением ЛЭП // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 111–119. <https://doi.org/10.12737/szf-73202107>

Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Шевцов А.Н. О возможности экспериментов по возбуждению искусственных УНЧ излучений в ионосфере установкой FENICS на Кольском полуострове // Изв. РАН. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 3. С. 386–394. <https://doi.org/10.31857/S0367676524030079>

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 72–110. <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>

Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А., Колобов В.В., Сахаров Я.А. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит» // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 100–110. <https://doi.org/10.12737/szf93202311>

Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А. Электромагнитные поля в верхней ионосфере от горизонтального крайне низкочастотного наземного излучателя конечной длины // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 9. С. 697–712. https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_09_697

Diego P., Huang J., Piersanti M., Badoni D., Zeren Z. et al. The electric field detector on board the China Seismo Electromagnetic Satellite – In-orbit results and validation // Instruments. 2021. Vol. 5 (1). P. 1. <https://doi.org/10.3390/instruments5010001>

Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1–60 Hz // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 5686–5693. <https://doi.org/10.1002/2015GL064595>

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Vakhnina V. Modeling ELF electromagnetic field in the upper ionosphere from power transmission lines // Radio Science. 2020. Vol. 121 (55). P. e2019RS006943. <https://doi.org/10.1029/2019RS006943>

Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A. Electromagnetic response of the mid-latitude ionosphere to power transmission lines // J. Geophysical Research. 2021. Vol. 126. P. e2021JA029659. <https://doi.org/10.1029/2021JA029659>

Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system // J. Geophysical Research. 2023. Vol. 128. P. e2023JA031590. <https://doi.org/10.1029/2023JA031590>

Gevin H.P. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems // Department of Civil and Environmental Engineering Duke University. 2019. Vol. 3. <https://people.duke.edu/~hpgavin/lm.pdf>

Liu J.Y.T., Shen X. et al. Spatial analyses on pre-earthquake ionospheric anomalies and magnetic storms observed by China seismo-electromagnetic satellite in August 2018 // Geoscience Letters. 2024. Vol. 11. P. 4. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00320-2>

Lizunov G., Korepanov V., Piankova O. Regarding the theory of power lines emission propagation to the space // J. Geophysical Research. 2023. Vol. 128. P. e2023JA031668. <https://doi.org/10.1029/2023JA031668>

Ma Z., Zhao S., Liao L. et al. Study of factors influencing the occurrence rate of 60 Hz Power Line Radiation in the topside ionosphere: A Systematic Survey Using the CSES Satellite // Science China Technological Sciences. 2024. Vol. 67. P. 1879–1892. <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2582-8>

Nemec F., Parrot M., Santolik O. Power line harmonic radiation observed by the DEMETER spacecraft at 50/60 Hz and low harmonics // J. Geophysical Research. 2015. Vol. 120. P. 8954–8967. <https://doi.org/10.1002/2015JA021682>

Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., Mazur N.G. Electromagnetic field in the upper ionosphere from ELF ground-based transmitter // J. Geophysical Research. 2019. Vol. 124 (10). P. 8066–8080. <https://doi.org/10.1029/2019JA026929>

Pilipenko V., Zhao S., Savelieva N., Mazur N., Fedorov E., Ma Z. ELF emission in the topside ionosphere from the ZEVS transmitter detected by CSES satellite // *Advances in Space Research*. 2024. Vol. 74 (10). P. 4937–4947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.07.074>

Su B., Wang Y., Cao Q. Simulation of WEM using ELF modeling of local area and modified UPML: ISAPE2012. (22–26 October 2012, Xi'an, China) 2012. P. 983–986. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408939>

Wu J., Guo Q., Yue C. et al. Special electromagnetic interference in the ionosphere directly correlated with power system: *Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE. 2019. Vol. 62 (3). P. 947–954. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2918280>

Zhao S., Liao L., Shen X., Lu H., Zhima Z., Huang J., Zhou C. CSES satellite observations of 50 Hz power line radiation over Mainland China and its response to COVID-19 // *J. Geophysical Research*. 2022. Vol. 127. P. e2022JA030693. <https://doi.org/10.1029/2022JA030693>

ELECTROMAGNETIC FIELDS INDUCED BY ZEVS TRANSMITTER AND “SEVERNYY TRANSIT” POWER LINE IN THE UPPER IONOSPHERE DETECTED BY CSES SATELLITE

© 2025 N. V. Savelieva^{1,*}, V. A. Pilipenko^{1,2}, N. G. Mazur¹, E. N. Fedorov¹, S. Zhao³

¹*Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

**E-mail: nasa2000@yandex.ru*

One of the impacts of human activity on the near-Earth environment that will be discussed in this review is the propagation of electromagnetic radiation emitted by power lines and microwave transmitters through the ionosphere into the near-Earth space. The first Chinese seismo-electromagnetic satellite (CSES) orbiting at 528 kilometers, recorded radiation emitted by ZEVS transmitter operating at frequency of 82 Hz and by the Northern Transit industrial power line operating at 50 Hz over the Kola Peninsula. ZEVS signal was detected at distance from 600 to 2500 kilometers from the source. Electrical and magnetic sensors of CSES detected narrowband radiation with maxima at frequency of 82 Hz and 50 . Results of measurements agree with results of numerical simulation of spatial structure of electromagnetic field in the upper ionosphere, excited by an alternating horizontal current of finite length. An amazing feature of the reported event was slow decrease in the amplitude of 82 Hz radiation with distance from the ZEVS transmitter compared with model calculations within 600 to 1000 km range. These results can be used to assess the effectiveness of active experiments aimed at generating artificial disturbances in the near-Earth environment.

Keywords: electromagnetic pollution, ionosphere, magnetosphere, ZEVS, PLE, CSES, ULF radiation.