

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.019

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НА СПУТНИКЕ CSES НА РАБОТУ ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕВС

Н.В. Савельева¹, В.А. Пилипенко^{1,2}, Н.Г. Мазур¹, Е.Н. Федоров¹, С. Чжао³

¹Институт физики Земли РАН, Б. Грузинская 10, Москва 123242, Россия;
e-mail: nasa2000@yandex.ru, ENFedorov1@yandex.ru, ngmazur@mail.ru

²Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, Москва 117997, Россия;
e-mail: space.soliton@gmail.com

³Национальный центр космических наук Китайской академии наук, Пекин 100190, Китай;
e-mail: zhaoshufan@nssc.ac.cn

Аннотация. Низкоорбитальный спутник CSES (высота орбиты ~500 км) обнаружил крайне-низкочастотный (КНЧ) сигнал крупномасштабного передатчика ЗЕВС, расположенного на Кольском полуострове. Узкополосное излучение на частоте 82 Гц было зарегистрировано при сближении подспутниковой точки с установкой ЗЕВС до 400 км. Электрические и магнитные датчики CSES зафиксировали излучение со средними амплитудами $|E| \approx 1.2$ мкВ/м и $|B| \approx 0.4$ пТл. Результаты измерений согласуются с результатами моделирования пространственной структуры КНЧ поля в верхней дневной ионосфере, возбуждаемого переменным горизонтальным током с длиной 60 км и интенсивность 70 А. Результаты наблюдений могут быть использованы для оценки эффективности активных экспериментов по возбуждению КНЧ-УНЧ возмущений в околоземной среде установками типа FENICS.

Введение

Число свидетельств антропогенного электромагнитного воздействия на природные процессы в околоземном пространстве постоянно нарастает [Пилипенко и др., 2021]. Электромагнитный отклик ионосферы на естественные явления (грозы) и искусственные воздействия (радиопередатчики) хорошо изучен в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) (>1 кГц). Значительно меньше внимания уделялось диапазону ультранизких частот (УНЧ), расположенному ниже частоты шумановского резонанса ~8 Гц, и диапазону крайне низких частот (КНЧ) от десятков до сотен Гц. Однако заметной эффективности излучения в УНЧ-КНЧ диапазоне можно ожидать только для чрезвычайно крупномасштабных излучающих систем. Такие УНЧ-КНЧ передатчики действительно существуют — в настоящее время передатчик ЗЕВС работает на несущей частоте 82 Гц недалеко от побережья Белого моря [Взаимодействие..., 2014]. Помимо этого, на Кольском полуострове проводятся эксперименты FENICS с управляемыми источниками электромагнитных полей УНЧ/КНЧ диапазонов с использованием линий электропередач (ЛЭП) в качестве горизонтальной излучающей антенны [Жамалетдинов и др., 2015]. Электромагнитные УНЧ-КНЧ волны 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 уровня. Естественно, возникает идея использовать установку типа FENICS для возбуждения в ионосфере искусственных излучений. Теоретическое моделирование показало, что такая установка с током ≥ 140 А может обеспечить при благоприятных условиях в ночные часы стимуляцию излучения в герцовом диапазоне с максимальными амплитудами ≥ 1 пТл и ≥ 10 мкВ/м, характерными для естественных сигналов диапазона Pc1 в верхней ионосфере [Пилипенко и др., 2024]. Поэтому установка FENICS на широте, соответствующей центральной части внешнего радиационного пояса, может эффективно использоваться как инструмент для опустошения радиационного пояса. Таким образом, установка типа FENICS может быть значительно более дешевой и эффективной альтернативой радионагревным методам возбуждения искусственных излучений диапазона Pc1.

Чтобы проверить адекватность теоретической модели и возможность обнаружения сигналов наземных КНЧ передатчиков в данных низкоорбитальных спутников, нами проанализированы случаи пролётов низкоорбитального итало-китайского спутника CSES-01 вблизи Кольского полуострова. В данной работе использована построенная в статье [Федоров и др., 2022] теория возбуждения УНЧ-КНЧ волн в ионосфере линейным заземленным током конечной длины L . С помощью основанной на этой теории численной модели (с реалистичным горизонтально-слоистым профилем ионосферы) рассчитана ожидаемая амплитуда излучений на спутниковых высотах для КНЧ передатчика типа ЗЕВС с учетом его реального размера.

Результаты наблюдений

В эксперименте использованы сигналы установки ЗЕВС, расположенной на Кольском полуострове (68.7°N и 34.5°E). ЗЕВС состоит из двух параллельных горизонтальных проводников (антенн по типу ЛЭП) длиной около 60 км, проложенных на расстоянии 1 км друг от друга в направлении с востока на запад, концы которых заземлены через контактные скважины. В проводниках создается переменный ток 200-300 А и частотой 82 Гц. Общая мощность установки достигает 2.5 МВт. Качественная схема установки ЗЕВС приведена на Рис. 1.

Первый китайский сейсмо-электромагнитный спутник CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite), был запущен в феврале 2018 года на солнечно-синхронную полярную орбиту высотой ~500 км с наклоном 97.4° и периодом обращения 95 минут для изучения природных сейсмогенных электромагнитных явлений [Diego et al., 2021]. В составе оборудования имеется 4.5-метровая антенна (Electric Field Detector — EFD) для измерения электрического поля в частотном диапазоне от DC до 3.5 МГц. EFD регистрирует спектральную плотность мощности W_E [(мВ/м)²/Гц]. 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 [нТл²/Гц]. Данные представлены в спутниковой системе координат (X_s, Y_s, Z_s), где X_s – направление полета спутника, Z_s – направление от спутниковой платформы к Земле, а Y_s дополняет ортогональную правостороннюю тройку (<http://www.leos.ac.cn>). В обычном режиме измерения проводятся на широтах ниже 65°N, чтобы не перегружать высокочувствительную спутниковую аппаратуру, и лишь изредка измерения проводятся на более высоких широтах. В качестве примера таких измерений на высоких широтах приведем данные пролета спутника 11 ноября 2019 г. вблизи от Кольского полуострова. Траектория движения подспутниковой точки во время этого события показана на Рис. 2.

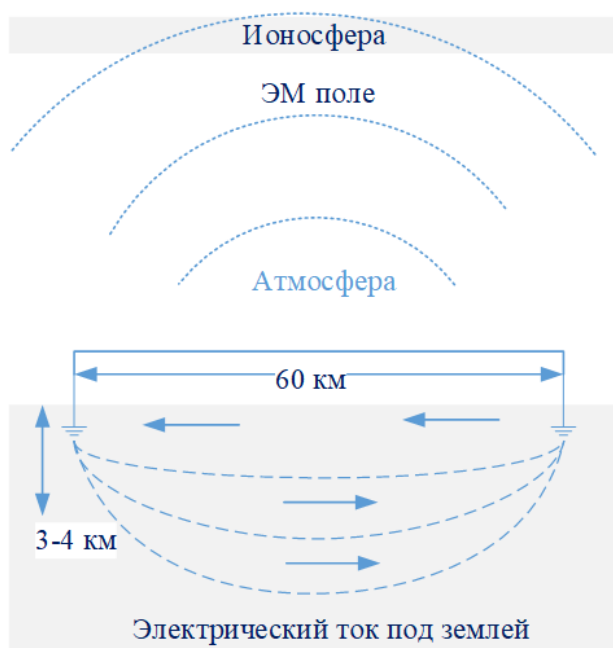


Рисунок 1. Схема установки ЗЕВС (не в масштабе).

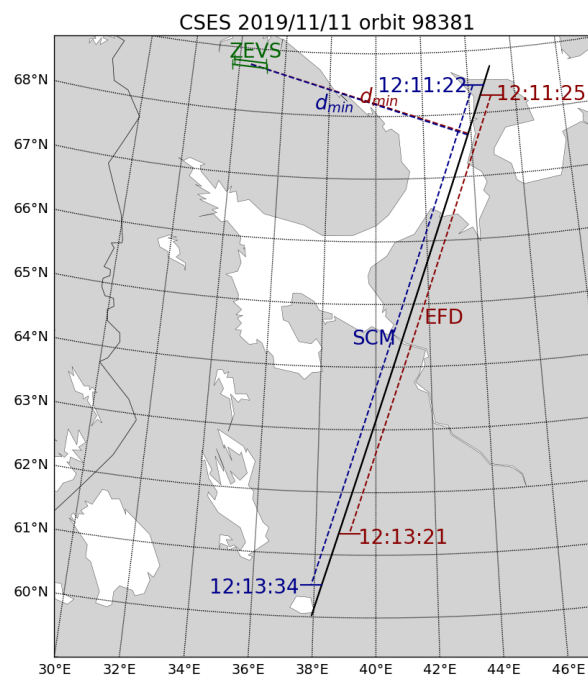


Рисунок 2. Траектория движения подспутниковой точки CSES относительно установки ЗЕВС и границы зоны детектирования электрического и магнитного сигналов 82 Гц датчиками EFD (красный пунктир) и SCM (синий пунктир).

При пролете 11 ноября 2019 г. наземная проекция орбиты CSES приблизилась к ЗЕВС на минимальное расстояние $d_{\min} = 406$ км. В течение временного интервала 12:11:22-12:13:34 UT прибор EFD обнаружил узкополосное излучение с частотой 82 Гц. На Рис. 3 показаны спектрограммы мощности поперечных компонент электрического поля W_{E_x} и W_{E_y} (две верхние панели). Справа от сонограмм показано изменение расстояния d между проекцией спутника на Землю и положением ЗЕВС. Видно, что интенсивность регистрируемого излучения возрастает по мере уменьшения d и достигает максимальных значений при $d \sim 400$ км. На нижней панели приведены графики усредненных по времени значений плотности мощности (красный и синий графики).

На Рис. 4 показаны спектрограммы мощности поперечных компонент магнитного поля W_{B_x} и W_{B_y} (две верхние панели). На нижней панели приведены два графика усредненных по времени значений спектральной мощности. Данные измерений даны в системе координат, в которой ось Z направлена от спутника к центру Земли. В рассматриваемом диапазоне широт наклонение вектора магнитного поля Земли варьирует от 75° до 80° , таким образом, в первом приближении, можно считать, что ось Z направлена вдоль линий магнитного поля. Продольные компоненты W_{B_z} и W_{E_z} оказались малы по сравнению с поперечными и не приводятся.

Спектральная мощность электрической и магнитной компонент излучения на 82 Гц достигает $W_{E_x} \sim 9 \times 10^{-7}$ (мВ/м)²/Гц и $W_{B_x} \sim 10^{-7}$ (нТл)²/Гц, соответственно. Амплитуда сигнала может быть оценена по формуле $|E, B| = \sqrt{W_{E,B} \Delta f}$, где Δf – полоса пропускания принятого сигнала. Ширина полосы пропускания была рассчитана на уровне половины амплитуды сигнала (светло-серый пунктир на рис. 3,4) относительно фона (темно-серый пунктир на рисунках 3,4). Средняя амплитуда электрической компоненты сигнала равна $|E_x| = 1.2$ мкВ/м при $\Delta f = 1.6$ Гц. Средняя амплитуда магнитной компоненты равна $|B_x| = 0.4$ пТл при $\Delta f = 1.9$ Гц. Причина помехи на 56 Гц и 101 Гц по магнитной компоненте неясна.

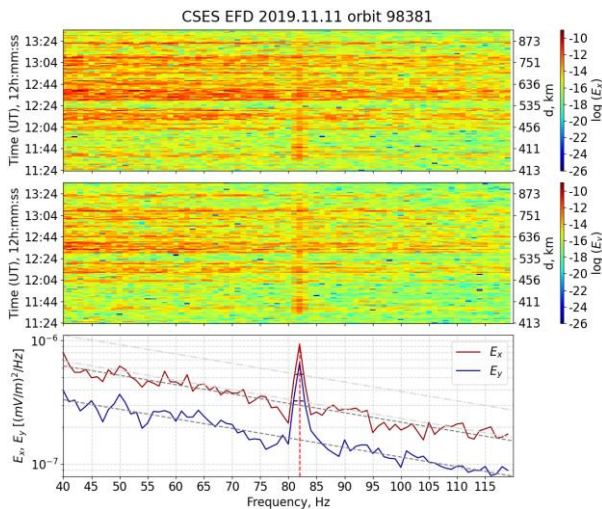


Рисунок 1. Результаты измерений электрического поля прибором EFD спутника CSES.

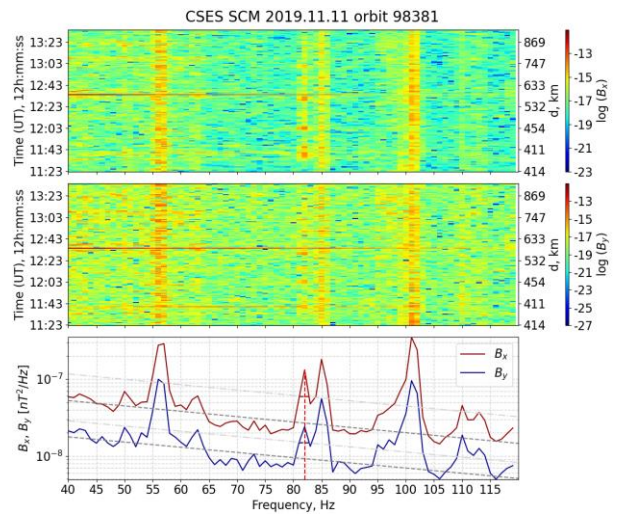


Рисунок 2. Результаты измерений магнитного поля прибором SCM спутника CSES.

Численное моделирование

Для интерпретации наблюдений была использована численная модель, разработанная ранее для оценки отклика ионосферы на линии электропередачи [Fedorov et al., 2020,2021], в которой в качестве источника КНЧ сигнала рассматривался линейный проводник с переменным током конечной длины $L=60$ км, расположенный над землей с конечной проводимостью $\sigma_g=10^{-5}$ См/м. На основании модели была проанализирована пространственная структура составляющих электрического и магнитного поля, генерируемого источником на частоте 82 Гц. Ионосферные параметры выбраны соответствующими условиям наблюдения. Результаты расчетов для силы тока в 1 А приведены на рис. 5 и 6.

Нормированные амплитуды компонент магнитного поля $|B_x|$ и $|B_y|$ в верхней ионосфере, над источником излучения, могут достигать значений 0.1 пТл при силе тока в источнике 1 А (Рис. 6). Магнитная составляющая B_z , ориентированная вдоль геомагнитного поля, на 1-2 порядка меньше поперечной составляющей. На удалении $\rho = 440$ км, рассчитанное возмущение магнитного поля уменьшится до $|B_x| = |B_y| = 6 \times 10^{-3}$ пТл. Соответственно, чтобы создать возмущение с компонентами $|E| \approx 1.2$ мкВ/м и $|B| \approx 0.4$ пТл в точке расположения спутника величина тока в антенне ЗЕВС должна быть не менее 70 А. Эта величина вполне реальна, т.к. заявленные максимальные токи в установке ЗЕВС составляют 200-300 А [Взаимодействие..., 2014].

Амплитуды поперечных компонент электрического поля $|E_x(y)|$ и $|E_y(y)|$ практически одинаковы, что указывает на круговую поляризацию излучения в верхней ионосфере (Рис. 5). Нормированная амплитуда достигает максимальной величины ≈ 0.3 мкВ/м над источником ($\rho = 0$). Ослабление поля при удалении от источника происходит довольно медленно: на расстоянии 400 км амплитуда падает примерно в 15 раз. При $\rho = 440$ км, $|E_x| = |E_y| = 1.7 \times 10^{-2}$ мкВ/м.

Преобразование линейно-поляризованного сигнала, генерируемого наземным протяженным передатчиком, в волну с круговой поляризацией в верхней ионосфере интерпретируется следующим образом [Pilipenko et al., 2019]. Линейно поляризованный сигнал можно представить, как комбинацию двух сигналов с

противоположной круговой поляризации. При входе в ионосферу сигнал с левой поляризацией LH (ионо-подобное вращение) сильно поглощается, поэтому в верхней ионосфере наблюдается только сигнал с правой поляризацией RH (электрон-подобное вращение).

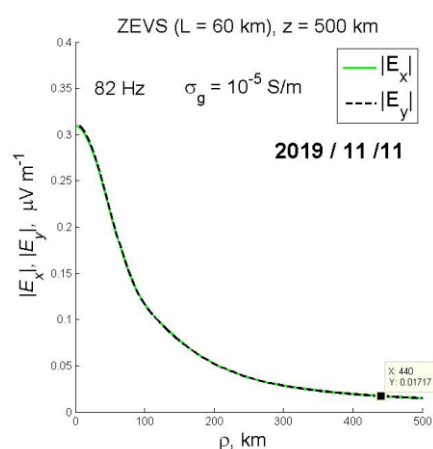


Рисунок 3. Результаты численного моделирования пространственной структуры поперечных компонент электрического передатчика ЗЕВС.

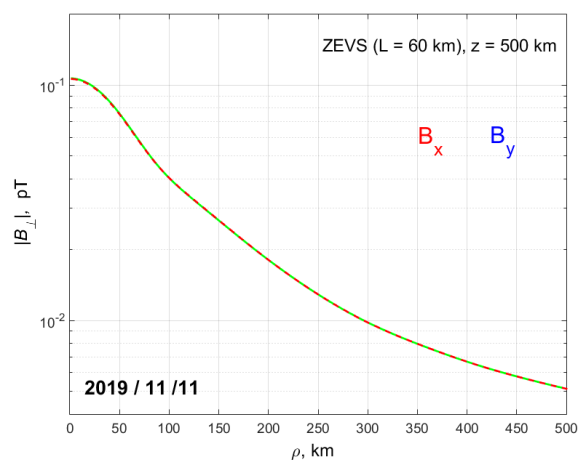


Рисунок 4. Результаты численного моделирования пространственной структуры поперечных компонент магнитного поля над передатчиком ЗЕВС.

Заключение

Проведено численное моделирование проникновения КНЧ излучения в верхнюю ионосферу от наземного горизонтального источника длиной 60 км. Моделирование показывает, что сигналы на частоте 82 Гц от такого источника могут быть обнаружены электрическими и магнитными датчиками на борту спутника на низкой орбите на горизонтальных расстояниях до нескольких сотен км. Результаты моделирования хорошо подтверждаются наблюдениями на спутнике CSES (высота орбиты 500 км) вблизи КНЧ передатчика ЗЕВС. Экспериментально измеренные амплитуды электрических и магнитных компонент излучения в верхней дневной ионосфере на горизонтальных расстояниях порядка 400 км согласуются с расчетами при предполагаемом токе в излучателе 70 А. Поляризация излучения близка к круговой, как и предсказывает модель.

Литература

- Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой: Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. В 2 т. / РАН, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт; ред. Е.П. Велихов, Ю.Л. Войтеховский. Апатиты, 2014. ISBN 978-5-902643-23-4.
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П. и др. (2015). 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, 14, № 2, 5-49.
- Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Шевцов А.Н. (2024). О возможности экспериментов по возбуждению искусственных УНЧ излучений в ионосфере установкой FENICS на Кольском полуострове // Изв. РАН, серия физическая, 88, № 3, 386–394.
- Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Климов С.И. (2021). Электромагнитное загрязнение околоземного космического пространства излучением ЛЭП. Солнечно-земная физика, 7, № 3, 111–119. DOI: 10.12737/szf-73202107
- Фёдоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А. (2022). Электромагнитные поля в верхней ионосфере от горизонтального крайне низкочастотного наземного излучателя конечной длины // Известия ВУЗов. Радиофизика, 65, №9, 697-712. DOI: 10.52452/00213462_2022_65_09_697
- Diego P., Huang J., Piersanti M., et al. (2021). The electric field detector on board the China Seismo Electromagnetic Satellite—In-orbit results and validation // Instruments, 5(1):1. DOI: 10.3390/instruments5010001
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Vakhnina V. (2020). Modeling ELF electromagnetic field in the upper ionosphere from power transmission lines // Radio Science, 121, 55, e2019RS006943. DOI: 10.1029/2019RS006943
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A. (2021). Electromagnetic response of the mid-latitude ionosphere to power transmission lines // J. Geophysical Research, 126, e2021JA029659. DOI: 10.1029/2021JA029659
- Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., Mazur N.G. (2019). Electromagnetic field in the upper ionosphere from ELF ground-based transmitter // J. Geophysical Research, 124, 10, 8066-8080. DOI: 10.1029/2019JA026929