

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛЭП

### ELECTROMAGNETIC POLLUTION OF NEAR-EARTH SPACE BY POWER LINE EMISSION

**В.А. Пилипенко**

*Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, pilipenko\_va@mail.ru  
Институт физики Земли РАН,  
Москва, Россия*

**Е.Н. Федоров**

*Институт физики Земли РАН,  
Москва, Россия, enfedorov1@yandex.ru*

**Н.Г. Мазур**

*Институт физики Земли РАН,  
Москва, Россия, ngmazur@mail.ru*

**С.И. Климов**

*Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, sklimov@cosmos.ru*

**V.A. Pilipenko**

*Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, pilipenko\_va@mail.ru  
Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia*

**E.N. Fedorov**

*Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, enfedorov1@yandex.ru*

**N.G. Mazur**

*Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, ngmazur@mail.ru*

**S.I. Klimov**

*Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, sklimov@cosmos.ru*

**Аннотация.** Представлен обзор по результатам спутниковых наблюдений на низких орбитах излучения наземных линий электропередач (ЛЭП) на промышленной частоте 50–60 Гц. Особое внимание уделено наблюдениям на спутниках «Чибис-М» и DEMETER. Электрическая 40-см антенна аппарата часто регистрировала излучение на частоте 50–60 Гц (Power Line Emission, PLE) при пролетах над промышленно развитыми областями. Спектральная амплитуда зарегистрированного излучения варьировала в пределах 1–18 (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup>, что соответствует амплитуде электрического поля  $E \sim 1$  мкВ/м. Приведены результаты численных расчетов электромагнитного отклика атмосферы и ионосферы на приземный крупномасштабный излучатель на частоте 50 Гц. По результатам моделирования PLE с наблюдаемой на спутниках в ночной ионосфере интенсивностью на средних широтах  $\sim 1$  мкВ/м может возбуждаться в ЛЭП несбалансированным током 8–10 А над земной корой проводимостью  $10^{-3}$  См/м. На средних и низких широтах с наклонным геомагнитным полем максимальный отклик в верхней ионосфере на излучение ЛЭП должен наблюдаться смещенным к экватору, хотя это смещение меньше, чем снос при переносе возмущения вдоль геомагнитного поля. Максимальная амплитуда электромагнитного отклика ионосферы на излучение ЛЭП незначительно уменьшается для наклонного геомагнитного поля. К настоящему времени интенсивность PLE в околоземном пространстве оказывается выше, чем интенсивность природных излучений в этом диапазоне (шумановские резонансы и ионные свисты), и продолжает нарастать по мере технологического развития человечества.

**Ключевые слова:** излучение линий электропередач, СНЧ-излучения, геоиндуцированные токи, низкоорбитальные спутники.

**Abstract.** We present an overview, based on satellite observations at low Earth orbits, on electromagnetic radiation from ground power transmission lines at an industrial frequency 50–60 Hz. Particular attention has been given to Chibis-M and DEMETER satellite observations. The electric 40-cm antenna of the micro-satellite often recorded 50–60 Hz radiation (known as Power Line Emission (PLE)) when it flew over industrialized areas of the planet. The PLE spectral amplitude varied from 1.2 to 18 ( $\mu\text{V}/\text{m}/\text{Hz}^{0.5}$ ), which corresponds to the electric field amplitude  $E \sim 1$   $\mu\text{V}/\text{m}$ . We report results of numerical calculations of the electromagnetic response of the atmosphere and ionosphere to a large-scale surface emitter at a frequency of 50 Hz. According to simulation results, PLE with an intensity of  $\sim 1$   $\mu\text{V}/\text{m}$  observed on satellites in the nightside ionosphere at midlatitudes can be excited by an unbalanced current 8–10 A in a power transmission line above the earth's crust with conductivity of  $10^{-3}$  S/m. At middle and low latitudes with an inclined geomagnetic field, the maximum response in the upper ionosphere to the transmission line radiation should be seen shifted equatorward, although this shift is less than that upon guidance by the geomagnetic field. The maximum amplitude of the electromagnetic response of the ionosphere to the power transmission line emission decreases for an inclined geomagnetic field, but insignificantly. To date, the PLE intensity in near-Earth space has turned out to be higher than the intensity of natural radiation in this range (Schumann resonances and ion whistlers), and continues to grow with the technological development of mankind.

**Keywords:** power line emission, ELF radiation, geomagnetically induced currents, low-orbit satellites.

## ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени наша планета оказалась в электромагнитной среде, по крайней мере, в некоторых диапазонах частот, созданной скорее промышленной деятельностью, чем естественными процессами. Появляется все больше свидетельств антропогенного воздействия на природные процессы в околоземном космическом пространстве (ОКП). Это влияние было обнаружено не только в специальных активных экспериментах, но и как непреднамеренный побочный продукт развития техники. Антропогенное влияние проявляется в синхронизации промышленной активности и интенсивности электромагнитных излучений герцового диапазона (Pc1-пульсации) — увеличении на ~10 % активности Pc1-колебаний в выходные дни (weekend effect) [Fraser-Smith, 1979] и совпадении часовых меток с моментами начала Pc1-излучений [Зотов, Гутьельми, 2010]. Предположительно, эти эффекты вызваны известными особенностями энергопотребления — его снижением в выходные дни, скачками в начале каждого часа и триггерным воздействием на природные магнитосферные излучения.

Электромагнитный отклик ионосферы на естественные и техногенные электромагнитные возмущения в атмосфере (например, молнии) и на земле (например, радиопередатчики) тщательно изучался в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) от сотен герц до нескольких килогерц [Helliwell et al., 1975; Koons et al., 1978]. В отличие от ОНЧ-антенн заметной эффективности излучения в сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне (порядка первых десятков — сотен герц) можно ожидать только для очень большой излучающей системы. Такие искусственно созданные крупномасштабные излучатели действительно существуют — это сети линий электропередач (ЛЭП) с частотами 50–60 Гц, протянутые на многие сотни километров. Излучение ЛЭП на основной промышленной частоте 50–60 Гц (Power Line Emission, PLE) — одна из наиболее распространенных форм электромагнитного излучения, исходящего от Земли, и проявление антропогенной активности в ближнем космосе.

Трехфазная линия передачи энергии на большие расстояния должна быть сбалансированной (симметричной), когда напряжения и токи каждой из фаз имеют одинаковую амплитуду, а сдвиг амплитуды по фазе равен  $120^\circ$ . Если не выполняется хотя бы одно из этих условий, система становится асимметричной, или разбалансированной. Любой дисбаланс приводит к снижению эффективности работы ЛЭП и потерям мощности из-за излучения электромагнитной энергии [Вахнина и др., 2018]. В большинстве случаев источником дисбаланса является асимметричность нагрузки (скоростные железные дороги, индукционные печи в металлургии, компьютеры, системы освещения) или повреждения системы. Существенные нарушения работы энергетических систем обусловлены геоиндуцированными токами (ГИТ), вызываемыми быстрыми вариациями геомагнитного поля, т. е. большими значениями  $dB/dt$ . В частности, под воздействием ГИТ может возникать дисбаланс в режиме работы ЛЭП [Вахнина и др., 2018]. Несбалансированные ЛЭП становятся источником излучений на 50–60 Гц и их гармоник, которые могут распространяться на большие расстояния и даже просачиваться сквозь ионосферу. Качественно это явление показано на рис. 1.

Хотя PLE были обнаружены еще в ранних спутниковых экспериментах на низких околоземных орбитах, статистика спутниковой регистрации этих излучений до сих пор невелика. До настоящего времени PLE наблюдались спутниками ISIS-1 и ISIS-2 (с перигеем/апогеем 578–3526 км) [Park, Helliwell, 1981; Rodger et al., 1995], и C/NOFS (401–852 км) [Pfaff et al., 2014]. Эти излучения были зарегистрированы электрическими антеннами длиной 73, 18.7 (ISIS-1, 2) и 20 м (C/NOFS).

Из-за сильных нелинейных элементов (например, тиристоры) в системах потребителей или перегрузки трансформаторов в промышленных районах в ЛЭП генерируются гармоники частоты 50–60 Гц. При определенных условиях ЛЭП на высоких гармониках промышленной частоты может работать как очень эффективная излучающая антенна на бегущей волне [Костров и др., 2017]. Излучение этих гармоник в ОНЧ-диапазоне на эквидистантных частотах, разделенных на 50–60 Гц, регистрируется в ионосфере и магнитосфере как гармоническое электромагнитное излучение PLHR (Power Line Harmonic Radiation). PLHR является довольно слабым и наблюдается нечасто. Например, во время миссии DEMETER [Němec et al., 2006, 2007, 2008; Parrot et al., 2014] только 88 событий PLHR наблюдались за четырехлетний период. В этом обзоре PLHR рассматриваться не будет.

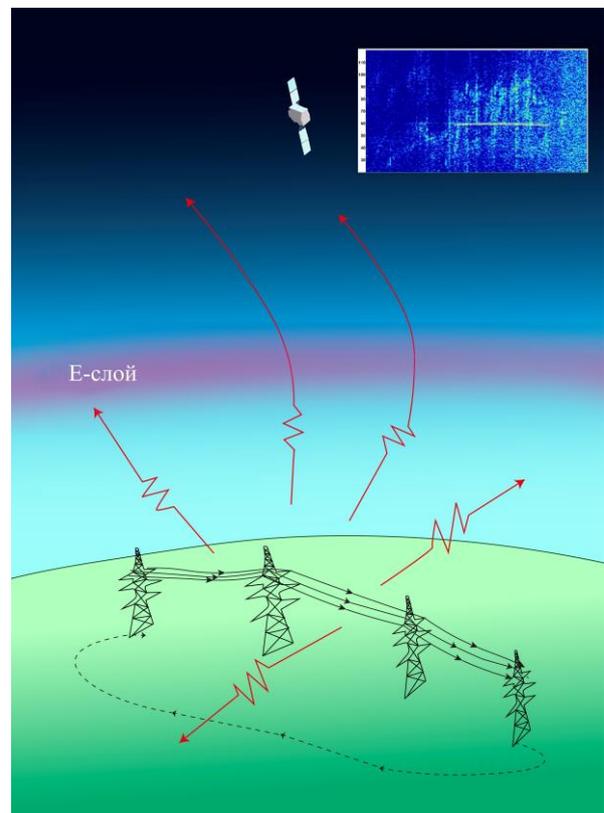


Рис. 1. Иллюстрация появления PLE в ионосфере

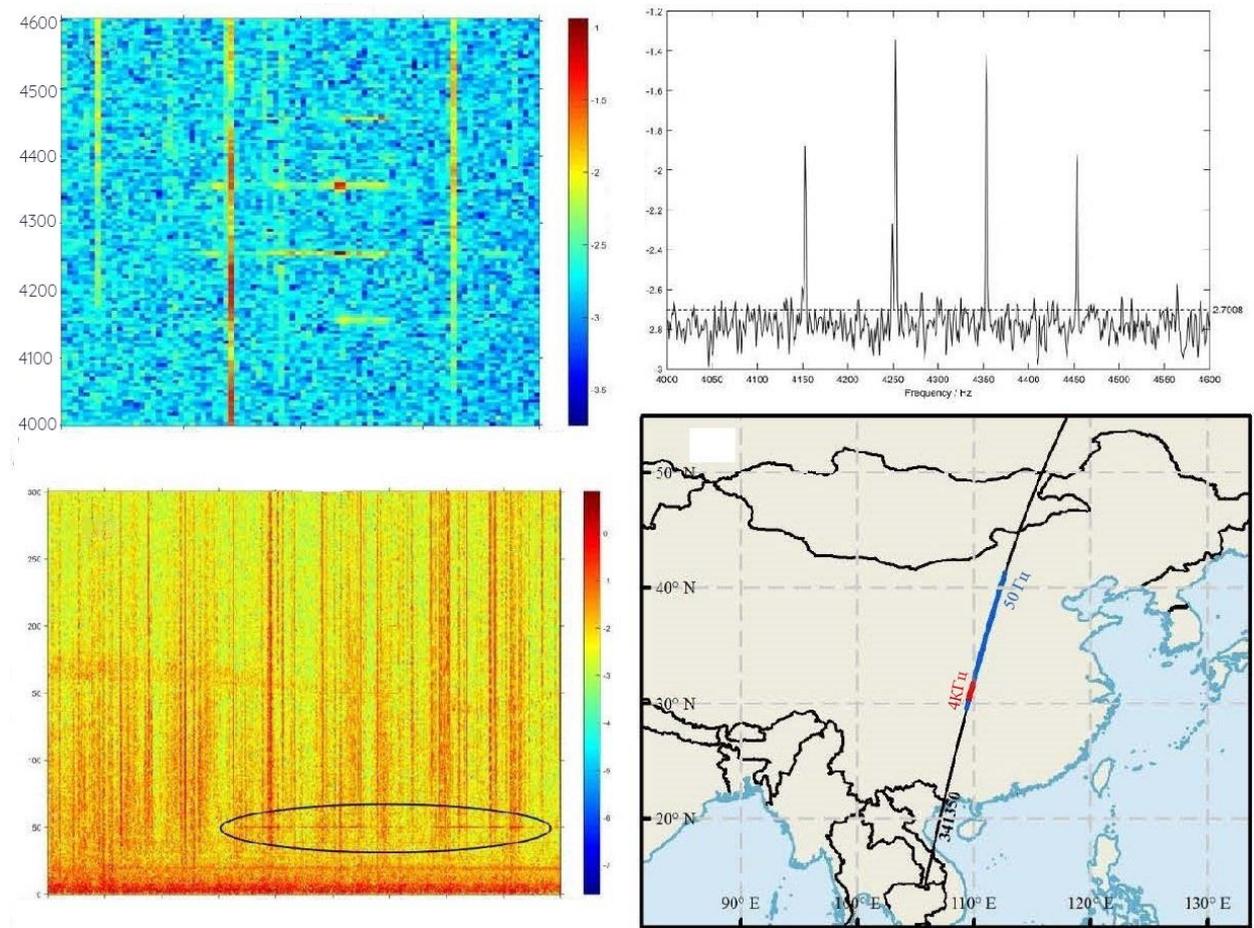


Рис. 2. Пример промышленных излучений, зарегистрированных спутником DEMETER 17.11.2010 над Китаем. Вверху слева — сонограмма PLHR частота — время; вверху справа — его спектр; внизу слева — сонограмма PLE частота — время; внизу справа — участок орбиты, где было зарегистрировано PLE 50 Гц (синий цвет) и PLHR 4 кГц (красный цвет). Модифицированный рисунок взят из работы [Zhang, Ma, 2018]

Здесь мы уделим особое внимание результатам наблюдений PLE на микроспутнике «Чибис-М» [Dudkin et al., 2014, 2015; Корепанов et al., 2014; Корепанов и др., 2015] и на спутнике DEMETER [Němes et al., 2015], а также рассмотрим подходы к моделированию прохождения PLE через ионосферу на спутниковые высоты.

### 1. НАБЛЮДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ ЛЭП НА ЧАСТОТАХ 50–60 Гц НА СПУТНИКАХ DEMETER И «ЧИБИС-М»

PLE в верхней ионосфере регулярно регистрировались на спутнике DEMETER над Китаем [Zhang, Ma, 2018]. Спектральная плотность мощности колебаний электрического поля на частоте 50 Гц доходила до  $W_E \sim 0.1$  (мкВ/м)<sup>2</sup>/Гц, что соответствует электрическому полю  $E \sim \sqrt{W_E \Delta f} \sim 0.6$  мкВ/м в полосе  $\Delta f = 4$  Гц. Пример промышленных излучений, регистрируемых DEMETER, показан на рис. 2.

Большой объем данных по наблюдениям PLE был получен микроспутником «Чибис-М» в 2012–2014 гг. [Зелёный и др., 2014; Klimov et al., 2010]. Орбита спутника с наклоном 52° проходила на высотах 350–500 км. Регистрация излучений в диа-

пазоне велась на электрическую антенну длиной 0.42 м.

Во время каждого пролета над ЛЭП в Бразилии наблюдалось усиление амплитуды электрического сигнала в полосе около 60 Гц до  $E_f \sim 0.6–1.0$  мкВ/м и спектральной амплитуды до  $E_f \sim 0.7$  (мкВ/м)/Гц<sup>1/2</sup> [Dudkin et al., 2015].

Наиболее убедительный случай наблюдения PLE 13.04.2014 в местное ночное время показан на рис. 3. Спутник «Чибис-М» прошел над Японией, где пересек сначала сети, работающие на частоте 60 Гц, а затем — на частоте 50 Гц (вверху слева) [Корепанов и др., 2015]. На сонограмме (вверху справа) видно появление узкополосного излучения соответственно на 60 и 50 Гц. Максимум сигнала на 60 Гц составлял  $\sim 0.36$  мкВ/м, на 50 Гц — 0.32 мкВ/м (внизу справа).

Хотя в соответствии с задачами эксперимента аппаратура на спутнике «Чибис-М» включалась только на время коротких сеансов над областями с предполагаемой грозовой активностью, была собрана хорошая статистика случаев регистрации PLE. Участки орбит, на которых было обнаружено PLE на 50/60 Гц, суммированы на рис. 4. Наибольшая спектральная амплитуда до 18 (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup> была зарегистрирована над штатом Карнатака — индийской Кремниевой долиной. Моменты регистрации

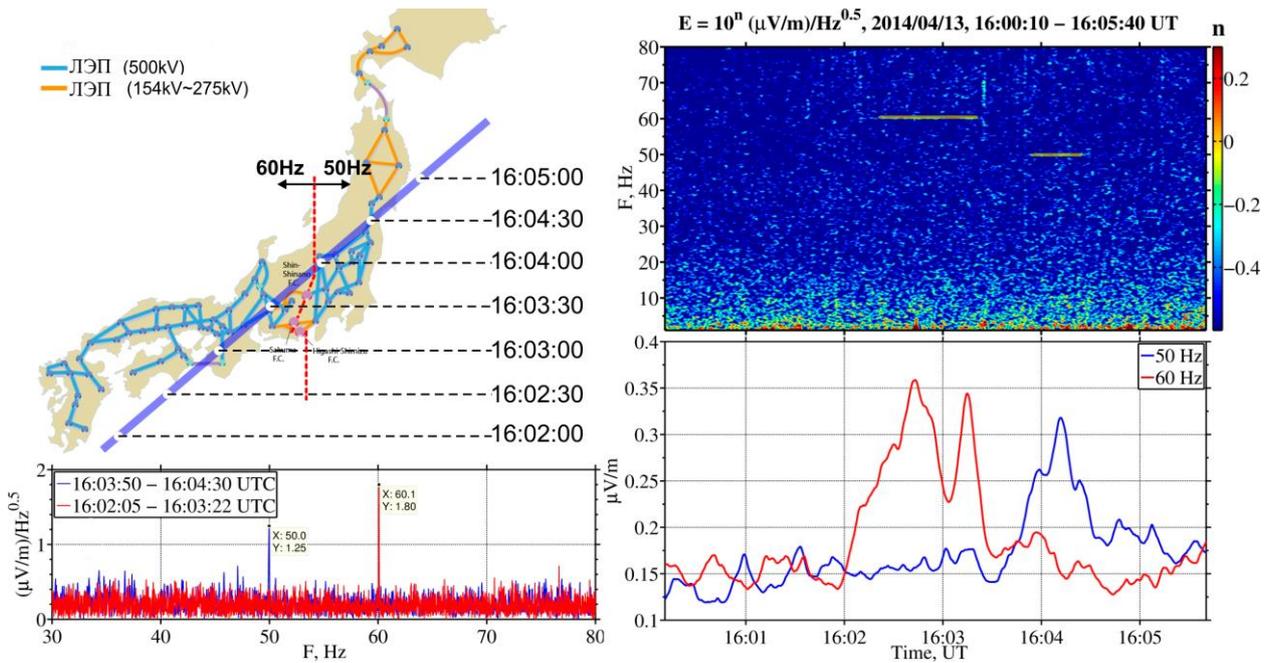


Рис. 3. Наблюдение PLE 13. 04.2014 (местное ночное время) из работы [Корепанов и др., 2015] на микроспутнике «Чибис-М» над Японией: проекция орбиты и конфигурация магистральных энергосистем (вверху слева); сонограмма регистрируемых излучений (вверху справа); вариации амплитуды сигнала на 60 и 50 Гц (внизу справа); спектр зарегистрированных излучений (внизу слева)

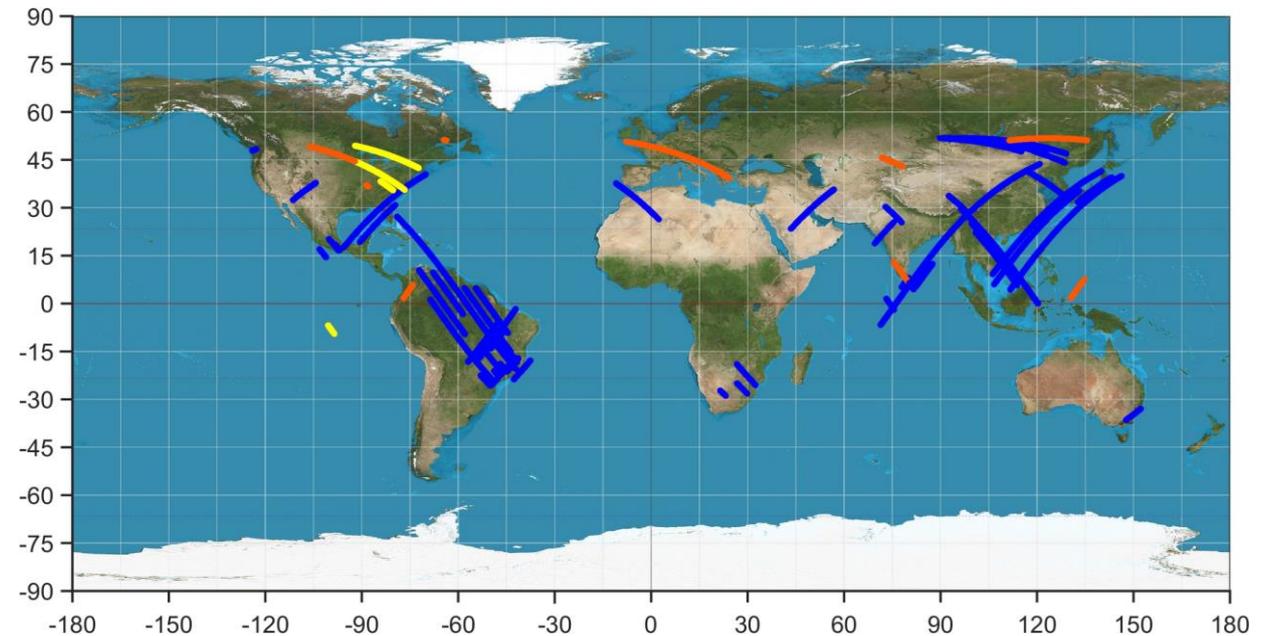


Рис. 4. Участки орбит спутника «Чибис-М», на которых электрическим датчиком было обнаружено PLE на 50–60 Гц [Корепанов и др., 2015]. Орбиты в ночной ионосфере показаны синим цветом, освещенная часть траектории — красным и желтым

PLE в основном соответствует расположению магистральных ЛЭП. Излучения регистрировались преимущественно в ночной ионосфере (показаны темным синим цветом). Участки орбит, где регистрировалась PLE, часто были смещены к более низким широтам относительно ЛЭП.

В рассматриваемом диапазоне частот (первые десятки Гц) наиболее интенсивными природными излучениями являются ионные свисты и шумановские резонансы (ШР). ШР являются собственными модами резонатора Земля — нижняя ионосфера,

подпитываемого грозовой активностью. Возможность прохождения ШР в верхнюю ионосферу была обнаружена на спутнике C/NOFS [Simões et al., 2011] и подтверждена на спутнике «Чибис-М» [Dudkin et al., 2014]. Пример одновременного наблюдения 08.08.2013 в примерно одинаковых ионосферных условиях промышленного излучения и ШР показан на рис. 5. Орбита спутника «Чибис-М» проходила над Южной Америкой, где было обнаружено PLE, и над Атлантическим океаном, где были зарегистрированы гармоники ШР. Сонограмма

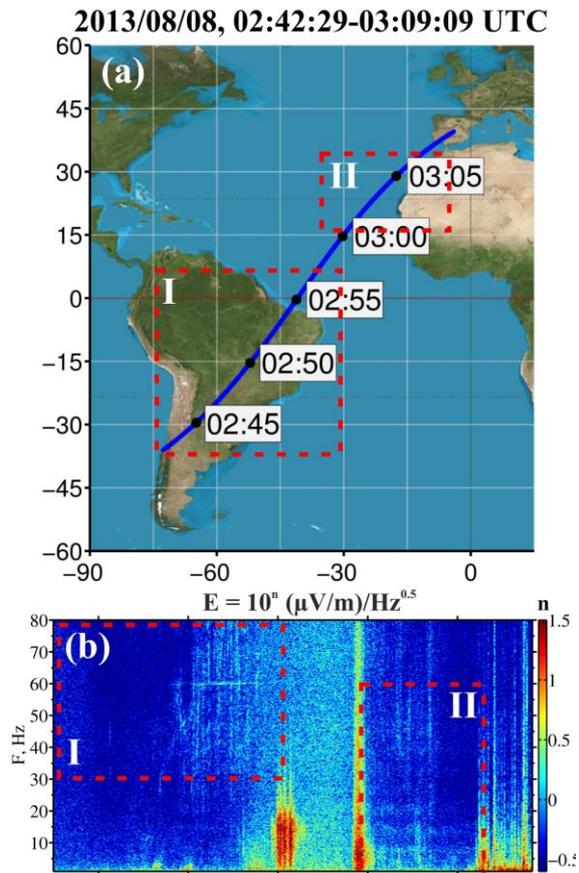


Рис. 5. Пример одновременного наблюдения 08.08.2013 спутником «Чибис-М» промышленного излучения на 60 Гц над Южной Америкой и гармоник ШП над Атлантическим океаном (отмечены прямоугольными областями I и II на верхней панели) [Dudkin et al., 2015]. Сонограмма (нижняя панель) показывает наличие PLE на частоте 60 Гц и гармоник ШП

на рис. 5 (внизу) показывает наличие PLE на частоте 60 Гц и гармоник ШП (~8, 14, 22 Гц). Спектральная плотность амплитуды первых трех гармоник ШП составляют в среднем ~0.25, ~0.14 и ~0.11 (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup>. Для сравнения спектральная амплитуда излучения 60 Гц в данном событии была ~1.2 (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup>. Этот пример показывает, что в СНЧ-диапазоне интенсивность излучений, создаваемых промышленной деятельностью, выше интенсивности такого мощного природного источника, как ШП.

При анализе десятилетней базы данных спутниковых наблюдений DEMETER было замечено, что количество излучаемой энергии в масштабах всей планеты постоянно растет по мере того как увеличивается мировое производство электроэнергии. Резкий рост числа и интенсивности PLE/PLHR в космосе произошел в 2009 г., когда начали быстро развиваться проекты по переходу на линии высокого напряжения (HV) и сверхвысокого напряжения (UHV) [Wu et al., 2014]. Приведенные на рис. 6 географические карты вероятности наблюдения повышенной интенсивности излучений на 50 (вверху) и 60 Гц (внизу) на спутнике DEMETER показывают хорошее согласие с мировой картой потребляемой электроэнергии [Nemes et al., 2015]. Эти наблюдения продемонстрировали, что над промышленно развитыми районами интенсивность PLE значительно выше среднего уровня.

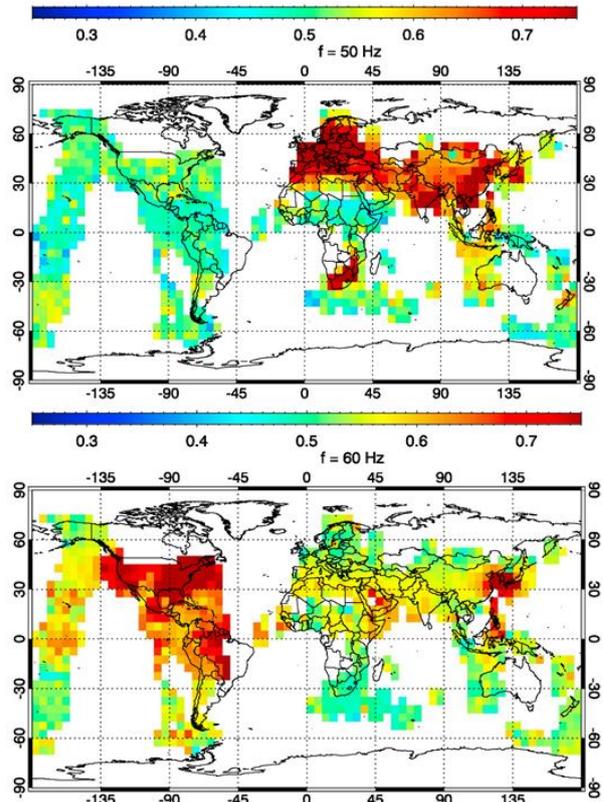


Рис. 6. Географические карты статистической вероятности наблюдения повышенной интенсивности излучений на 50 (вверху) и 60 Гц (внизу), зарегистрированных низкоорбитальным спутником DEMETER [Nemes et al., 2015]

То обстоятельство, что PLE обнаруживается на большом расстоянии от трехфазной ЛЭП (и даже в космосе) является показателем ее несбалансированной работы, в которую могут давать вклад и ГИТ. Согласно многолетним наблюдениям спутника DEMETER, интенсивность PLE увеличивается при высокой вариабельности магнитного поля, т. е. при больших значениях  $dB/dt$ , рассчитанных по данным наземного магнитометра, который был ближе всего к проекции орбиты космического аппарата [Nemes et al., 2015]. Интенсивности PLE на основной частоте энергосистемы и на ее третьей гармонике над Европой и Северной Америкой, наблюдаемые при больших значениях вариабельности поля, оказываются систематически выше, чем интенсивности, наблюдаемые в условиях спокойного геомагнитного поля. Магнитная составляющая PLE при спутниковых наблюдениях пока не обнаружена — по-видимому, такой сигнал скрыт помехами и фоновым шумом.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ, СОЗДАВАЕМЫХ НАЗЕМНЫМИ ЛЭП

Теоретические модели, позволяющие надежно описать генерацию и распространение PLE в многослойной среде Земля—атмосфера—ионосфера, пока не разработаны. Учет ионосферы как слоя плазмы с конечной проводимостью оказывается слишком грубым. В реальной ситуации условия

распространения СНЧ-излучения резко меняются в зависимости от высоты. При этом эффективность излучения ЛЭП сильно зависит от проводимости подстилающей поверхности. В атмосфере ( $z < 70$  км) поле ЛЭП является квазистатическим в среде с изотропной проводимостью. В ионосфере ( $z > 80$  км) проводимость среды становится резко анизотропной, электромагнитное возмущение распадается на две моды, а длина волны и фазовая скорость резко падают. Кроме того, в СНЧ-диапазоне возникают условия циклотронного резонанса волны с ионосферными ионами. Наиболее корректным представляется построение высотного профиля параметров ионосферы с помощью общепринятой модели IRI (International Reference Ionosphere), дающей ионный состав, плотности заряженных и нейтральных частиц, на основе чего вычисляются частоты столкновений и компоненты тензора проводимости в зависимости от высоты. Такая модель среды использовалась в работах [Fedorov et al., 2016; Mazur et al., 2018], где был численно проведен расчет электромагнитного отклика УНЧ-диапазона на грозовой разряд в нижней атмосфере. Кроме того, в отличие от радиопередатчиков или молниевых разрядов ЛЭП протяженностью до нескольких сотен километров не может быть смоделирована как бесконечно малый диполь, ее конечный масштаб надо учитывать. Подход к решению этой задачи представлен в работе [Fedorov et al., 2020], где была построена численная модель электромагнитного отклика реальной ионосферы на горизонтальный токовый источник в приземном слое атмосферы. Однако в этой модели геомагнитное поле считалось вертикальным, поэтому ее можно применять только для высоких широт. С помощью модели стала возможной количественная интерпретация зарегистрированных на спутнике DEMETER излучений на частоте 82 Гц от системы «Зевс» на Кольском полуострове [Pilipenko et al., 2019].

Для анализа описанных в предыдущем разделе эффектов необходимо создание модели с наклонным геомагнитным полем, что создает значительные вычислительные трудности, так как система перестает быть азимутально симметричной. Здесь мы приведем предварительные результаты новой модели. Рассматривается плоскостная неоднородная по вертикали система Земля—атмосфера—ионосфера, параметры которой восстанавливаются на основе модели IRI. Электромагнитное поле возбуждается бесконечно длинной в направлении восток—запад ЛЭП. Предположение о бесконечной длине токового источника представляется разумным в качестве первого шага, так как высота нижней кромки ионосферы составляет  $\sim 80$  км, а протяженность магистральных ЛЭП может превышать несколько сотен километров.

На поверхности Земли выполняется импедансное граничное условие, а на бесконечности — условие излучения. В рассматриваемой плоскостной модели можно использовать преобразование Фурье по горизонтальным координатам. В результате система уравнений Максвелла (после исключения продольных компонент возмущения поля) сводится к системе

четырёх обыкновенных линейных дифференциальных уравнений для двух зацепленных мод, распространяющихся в вертикально неоднородной среде атмосфера — ионосфера. Коэффициенты этих уравнений и свободный член, определяемый источником возмущения, зависят от наклона геомагнитного поля, ориентации ЛЭП и компонент тензора диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы  $\hat{\epsilon}(z)$ . Схема численного расчета основана на введении матрицы адмиттанса  $\bar{Y}$ , связывающей горизонтальные составляющие электрического и магнитного возмущений:  $\mathbf{V}_\tau = \bar{Y}\mathbf{E}_\tau$ . Преимущество этого численного метода состоит в том, что он позволяет избежать неустойчивости вычислительного процесса. Явный вид используемых в расчетах дифференциальных уравнений и детальное описание вычислительной процедуры приведены в статье [Fedorov et al., 2020].

Амплитуды электрического и магнитного полей в ионосфере и атмосфере на разных высотах были численно рассчитаны для разных ионосферных условий и сопротивлений земной коры. Расчеты проведены для произвольно выбранной среднеширотной точки на географической широте  $\Phi = 44.4^\circ$  N, с наклоном  $I = 60.0^\circ$ , для частоты 50 Гц. Результаты моделирования представлены для тока в ЛЭП  $J_0 = 1$  А.

В атмосфере возбуждаемое электромагнитное поле является квазистатическим, но в ионосфере — среде с очень большой диэлектрической проницаемостью — длина и скорость СНЧ-волны резко уменьшаются. В ионосфере (выше 75–80 км) возбуждаемое электромагнитное поле распадается на две моды. Мода (1) быстро затухает на длине  $\sim 1$  км, а мода (2) распространяется почти без затухания на масштабе  $\sim 10^4$  км. В верхней ионосфере электромагнитное поле от наземной ЛЭП зависит от плотности ионосферы и сопротивления подстилающего слоя земной поверхности. Увеличение проводимости земной коры на два порядка от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  См/м приводит к уменьшению примерно на порядок амплитуды возбуждаемого электрического поля в верхней ионосфере. Проникновение через ионосферу в ночное время оказывается более эффективным, чем в дневное время.

В вертикально-неоднородной многокомпонентной плазме есть несколько характерных точек, влияющих на распространение и затухание СНЧ-волн:

- высота, на которой имеет место циклотронный резонанс с ионами данного сорта:  $\omega = \Omega_i(z)$ ;
- точка отражения  $z = z_R$ , отделяющая область прозрачности, где показатель преломления  $n^2 > 0$ , от области непрозрачности (нераспространения), где  $n^2 < 0$ ;
- область пересечения (crossover) двух мод на высоте  $z = z^*$ , где недиагональные элементы тензора  $\text{Re } g = 0$ , а собственные значения тензора совпадают  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ . Для конечного горизонтального волнового числа  $k_1 = 0.01$  км $^{-1}$ , при приближении к перекрестной точке  $z^* = 1040$  км продольные волновые числа  $k_3^{(1)}$  и  $k_3^{(2)}$  сближаются, но между ветвями остается зазор конечной ширины.

Вертикальные профили квадрата показателя преломления двух мод  $n_{1,2}^2$  показаны на рис. 7. Мода (1) имеет точку отражения на высоте  $z_R=980$  км. Ниже  $z_R$  мода (1) оказывается в области непрозрачности и только выше этой точки становится распространяющейся. Для моды (2) вся ионосфера оказывается областью прозрачности. Высотный профиль гирочастот показывает, что циклотронный резонанс возможен с ионами  $N^+$  на высоте  $\sim 250$  км, а с ионами  $He^+$  — на  $z\sim 600$  км. Поскольку плотности ионов на этих высотах невелики, существенного значения эти области на распространение волн не оказывают.

В правополяризованной (RH) волне магнитная и электрическая компоненты  $E$  и  $B$  вращаются по часовой стрелке, если смотреть вдоль направления распространения волны, а в левополяризованной (LH) — против часовой стрелки. Для квазипродольного распространения поляризация обеих мод почти круговая, а знак вращения волнового поля (знак эллиптичности) определяется знаком недиагонального элемента тензора  $g$ , так как

$$(E_2 / E_1) \sin I ; m i \operatorname{Re}(g / |g|).$$

Мода (1) имеет RH-поляризацию, мода (2) — LH. В перекрестной точке ( $z = z^* \sim 1040$  км), где  $\operatorname{Re} g \rightarrow 0$ , поляризация обеих мод становится линейной, при этом электрическое поле моды (1) направлено по параллели, а моды (2) — по меридиану.

Сложная волновая картина распространения СНЧ-волн в ионосфере не поддается аналитическому рассмотрению и требует численного моделирования. Чтобы выделить влияние наклона геомагнитного поля, была рассчитана горизонтальная структура возмущения электрического поля на высоте 600 км для разных наклонений  $I$ , но для одной и той же модели ионосферной плазмы (рис. 8). На этой высоте

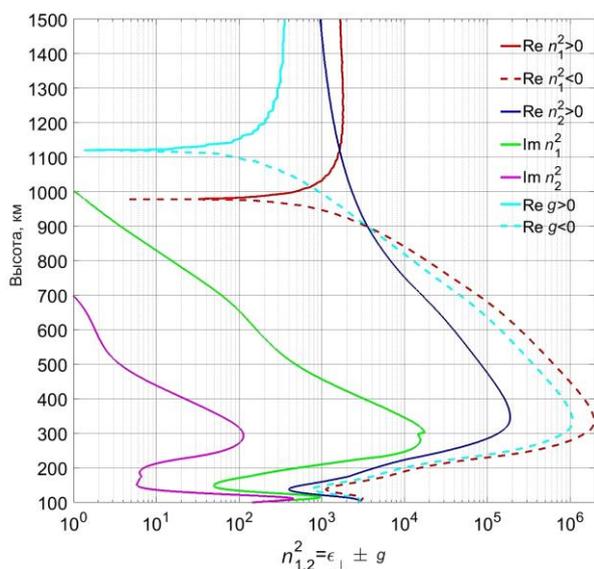


Рис. 7. Вертикальные профили квадрата показателя преломления двух мод  $n_{1,2}^2$  и элемента  $g$  тензора диэлектрической проницаемости (частота 50 Гц). Точка отражения моды (1) помечена  $z_R$ . Чтобы график был более компактным, зависимости  $\operatorname{Re} n^2(z)$  показаны сплошными линиями, а  $\operatorname{Im} n^2(z)$  — пунктирными линиями того же цвета

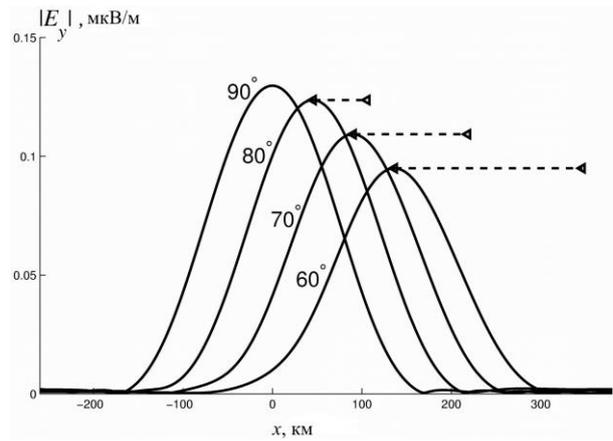


Рис. 8. Горизонтальная структура возмущения электрического поля  $|E_y(x)|$  на высоте 600 км для разных наклонений  $I$ , но для одной и той же модели ионосферной плазмы. Положение источника на Земле соответствует  $x=0$ . Открытый и затемненный треугольники означают смещение вдоль силовой линии и фактическое положение максимума интенсивности сигнала в ионосфере. Расстояние между ними (горизонтальные штриховые линии) показывает отклонение сигнала от гидрированного распространения вдоль силовой линии

максимальные значения  $\sim 0.2$  мкВ/м наблюдаются для вертикального поля  $B_0$  ( $I=90^\circ$ ) и медленно уменьшаются с уменьшением  $I$  до  $\sim 0.15$  мкВ/м при  $I=60^\circ$ . Поскольку СНЧ-возмущение в ионосфере не канализируется геомагнитным полем как альфвеновская волна в МГД-приближении, максимальный отклик в ионосфере должен несколько смещаться от силовой линии, сопряженной с источником. Этот эффект виден на рис. 8, который показывает, что при распространении вверх максимум возмущения отклоняется от силовой линии геомагнитного поля. Например, на высоте спутника DEMETER ( $z=660$  км) максимальная амплитуда электрической составляющей  $\max |E_y|$  смещена от вертикали на  $\Delta x \sim 250$  км, в то время как просеивание возмущения вдоль наклонного магнитного поля с  $I=60^\circ$  дало бы смещение  $\Delta x = z \operatorname{ctg} I \sim 380$  км.

Максимальная электрическая составляющая  $\max |E|(z)$ , где  $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ , наблюдаемая на различных высотах в ночное время, показана на рис. 9. Из-за немонотонного по высоте профиля показателя преломления эта величина варьирует между 0.07 и 0.17 мкВ/м.

### 3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СО СПУТНИКОВЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ НА НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Во время пролетов микроспутника «Чибиc-М» (500 км) над высоковольтными ЛЭП увеличение амплитуды электрического сигнала в среднем составляло  $E \sim 0.6-1.0$  мкВ/м, а спектральной плотности амплитуды —  $E_f \sim 0.7$  (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup> [Dudkin et al., 2014, 2015; Korepanov et al., 2014].

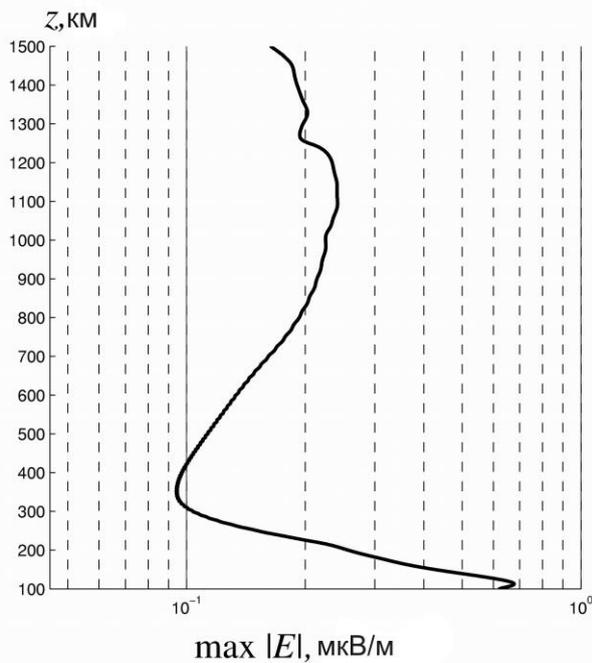


Рис. 9. Максимальная величина электрической составляющей излучения  $\max |E|(x, z)$  на различных высотах в ночное время

За 6.5 лет работы спутник DEMETER (660 км) обнаружил много PLE на основной частоте 50 Гц местной энергосистемы над Китаем [Zhang, Ma, 2018]. Спектральная плотность мощности флуктуаций электрического поля доходила до  $W_E \sim 0.1$  (мкВ/м)<sup>2</sup>/Гц, что соответствует электрическому полю с амплитудой  $E \sim 0.6$  мкВ/м в полосе 4 Гц. В обширном исследовании на основе данных спутника DEMETER спектральные плотности мощности PLE над Европой и США колеблются в пределах  $W_E \sim 0.5\text{--}2.0$  (мкВ/м)<sup>2</sup>/Гц [Němec et al., 2008]. Средняя спектральная амплитуда PLE, регистрируемая электрической антенной низкоширотного спутника C/NOFS (400–850 км), варьировала в диапазоне  $E_f \sim 0.25\text{--}0.5$  (мкВ/м)/Гц<sup>0.5</sup> [Pfaff et al., 2014]. Амплитуда электрического поля составляла  $E \sim 0.5\text{--}1.0$  мкВ/м, что примерно соответствует амплитудам, наблюдаемым спутниками «Чибис-М» и DEMETER.

По результатам моделирования PLE с наблюдаемой на средних широтах интенсивностью  $\sim 1$  мкВ/м может возбуждаться несбалансированным током в ЛЭП  $J_0 \sim 8\div 10$  А над земной корой проводимостью  $10^{-3}$  См/м. Оцененная величина несбалансированного тока мала по сравнению с типичными токами, передаваемыми в ЛЭП (порядка сотен–тысяч А).

Отмечалось, что интенсивность PLE ночью обычно больше, чем днем [Němec et al., 2015]. Численное моделирование, проведенное в работе [Fedorov et al., 2020] для вертикального  $\mathbf{V}_0$ , показало, что эта асимметрия дня и ночи вызвана большим затуханием волн во время распространения в дневной ионосфере. Очевидно, эта асимметрия сохранится и для наклонного  $\mathbf{V}_0$ .

На средних и низких широтах с наклонным геомагнитным полем максимальный отклик в верхней ионосфере на наземные ЛЭП должен наблюдаться

смещенным к экватору. Это смещение меньше, чем сдвиг, вызванный гидированием электромагнитных возмущений фоновым магнитным полем. Например, для излучения с частотой 50 Гц сдвиг максимума излучения должен составлять примерно 250 км на высоте орбиты DEMETER (660 км). Это смещение PLE к более низким широтам относительно ЛЭП действительно наблюдалось спутником «Чибис-М» (см. рис. 4).

Представленная модель учитывает наиболее реалистичным образом структуру ионосферы, однако необходимо ее дальнейшее усовершенствование. В частности, было бы желательно учесть конечность длины излучателя. Это, скорее всего, несколько снизит оценку отклика ионосферы на работу ЛЭП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Промышленную электромагнитную активность в СНЧ-диапазоне (50–60 Гц и гармоники) можно отслеживать с низкоорбитальных микроспутников [Rothkaeh, Parrot, 2005]. Интенсивность PLE в ОКП постепенно увеличивается со временем, она значительно возросла после внедрения в энергетику высоковольтных ЛЭП [Wu et al., 2019]. Моделирование показывает, что в ЛЭП несбалансированные токи интенсивностью  $\sim 10$  А возбуждают PLE амплитудой  $\sim 1$  мкВ/м, достаточной для обнаружения электрическими датчиками низкоорбитальных спутников в верхней ночной ионосфере. Электромагнитное загрязнение ОКП наземными ЛЭП будет постоянно возрастать по мере индустриального развития общества.

Авторы признательны Корепанову В.А. за многолетнее сотрудничество по рассмотренным в работе проблемам.

Работа подготовлена в рамках госзаданий ИФЗ и ИКИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Шаповалов В.А. и др. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети. М.: Инфра-инженерия, 2018. 256 с.

Зелёный Л.М., Гуревич А.В., Климов С.И. и др. Академический микроспутник «Чибис-М». *Космические исследования*. 2014. Т. 52, № 2. С. 93–105.

Зотов О.Д., Гульельми А.А. Проблемы синхронизма электромагнитных и сейсмических событий в динамической системе магнитосфера — техносфера — литосфера. *Солнечно-земная физика*. 2010. Т. 16. С. 19–25.

Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л., Проненко В.А. Наблюдения излучения линий электропередач в околоземном пространстве. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55. С. 706–711. DOI: 10.1134/S0016793215050084.

Костров А.В., Гушин М.Е., Стриковский А.В. Генерация и излучение гармоник линий электропередач. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2017. Т. 57. С. 482–490. DOI: 10.1134/S0016793217030094.

Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 2014. Vol. 117. P. 81–87.

Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., et al. 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.

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., et al. Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 12. P. 11282–11301. DOI: [10.1002/2016JA023354](https://doi.org/10.1002/2016JA023354).

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., et al. Modeling ELF electromagnetic field in the upper ionosphere from power transmission lines. *Radio Sci.* 2020. Vol. 55, iss. 7, e2019RS006943. DOI: [10.1029/2019RS006943](https://doi.org/10.1029/2019RS006943).

Fraser-Smith A. A weekend increase in geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 2089–2096. DOI: [10.1029/JA084iA05p02089](https://doi.org/10.1029/JA084iA05p02089).

Helliwell R.A., Katsufraakis J.P., Bell T.F., et al. VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 4249–4258.

Klimov S., Novikov D., Korepanov V., et al. The study of electromagnetic parameters of space weather, micro-satellite “Chibis-M”, in: Sandau, R., H.-P. Roeser, A. Valenzuela (Eds.), Small satellite missions for earth observation: New developments and trends, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. P. 95–102. DOI: [10.1007/978-3-642-03501-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03501-2).

Koons H.C., Dazey M.H., Edgar B.C. Satellite observation of discrete VLF line radiation within transmitter-induced amplification bands. *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83. P. 3887–3889.

Korepanov V., Dudkin D., Dudkin F. Study of electromagnetic processes in the ionosphere onboard microsatellite Chibis-M, In: Fedorov O. (ed.), Space research in Ukraine. Akademiya periodyky Kyiv, 2014. P. 7–12.

Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., et al. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning. *J. Geophys. Res.* 2018. Vol. 123. P. 6692–6702. DOI: [10.1029/2018JA025622](https://doi.org/10.1029/2018JA025622).

Němec F., Santolík O., Parrot M., et al. Power line harmonic radiation (PLHR) observed by the DEMETER spacecraft. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A04308. DOI: [10.1029/2005JA011480](https://doi.org/10.1029/2005JA011480).

Němec F., Santolík O., Parrot M., et al. Power line harmonic radiation: A systematic study using DEMETER spacecraft. *Adv. Space Res.* 2007. Vol. 40. P. 398–403. DOI: [10.1016/j.asr.2007.01.074](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.074).

Němec F., Santolík O., Parrot M., et al. Power line harmonic radiation observed by satellite: Properties and propagation through the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, A08317. DOI: [10.1029/2008JA013184](https://doi.org/10.1029/2008JA013184).

Němec F., Parrot M., Santolík O. Power line harmonic radiation observed by the DEMETER spacecraft at 50/60 Hz and low harmonics. *J. Geophys. Res.*, 2015. Vol. 120. P. 8954–8967.

Park C.G., Helliwell R.A. Power line radiation in the magnetosphere. *Adv. Space Res.* 1981. Vol. 1. P. 423–437.

Parrot M., Němec F., Santolík O. Statistical analysis of VLF radio emissions triggered by power line harmonic radiation and observed by the low-altitude satellite DEMETER. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. DOI: [10.1002/2014JA020139](https://doi.org/10.1002/2014JA020139).

Pfaff R., Freudenreich H., Simões F., et al. Observations of 50/60 Hz power line radiation in the low latitude ionosphere detected by the electric field instrument on the C/NOFS satellite, General Assembly and Scientific Symposium, XXXI<sup>th</sup> URSI, Beijing, China, 2014, Book of Abstracts, IEEE. DOI: [10.1109/URSIGASS.2014.6929584](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929584).

Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., et al. Electromagnetic field in the upper ionosphere from ELF ground-based transmitter. *J. Geophys. Res.* 2019. Vol. 124. DOI: [10.1029/2019JA026929](https://doi.org/10.1029/2019JA026929).

Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. Vol. 67. P. 821–828.

Rodger C.J., Thomson N.R., Dowden R.L. VLF line radiation observed by satellite. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 5681–5689. DOI: [10.1029/94JA02865](https://doi.org/10.1029/94JA02865).

Simões F.A., Pfaff R.F., Freudenreich H.T. Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, L22101. DOI: [10.1029/2011GL049668](https://doi.org/10.1029/2011GL049668).

Wu J., Fu J.J., Zhang C. Propagation characteristics of power line harmonic radiation in the ionosphere. *Chinese Physics B.* 2014. Vol. 23. P. 034102–034107. DOI: [10.1088/1674-1056/23/3/034102](https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/3/034102).

Wu J., Guo Q., Yue C., et al. Special electromagnetic interference in the ionosphere directly correlated with power system. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.* 2019. DOI: [10.1109/TEM.2019.2918280](https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2918280).

Zhang C., Ma Q. Influences of radiation from terrestrial power sources on the ionosphere above China based on satellite observation. *2<sup>nd</sup> International Workshop on Renewable Energy and Development, Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2018. Vol. 153, 042002. DOI: [10.1088/1755-1315/153/4/042002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/4/042002).

Статья подготовлена по материалам Шестнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 8–12 февраля 2021 г., ИКИ РАН.

Как цитировать эту статью:

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. DOI: [10.12737/szf-73202107](https://doi.org/10.12737/szf-73202107).