

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СИГНАЛОВ
ДИАПАЗОНА Pc1 В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FENICS-2024: 1. НАБЛЮДЕНИЯ****EXCITATION OF GLOBAL ARTIFICIAL Pc1 SIGNALS DURING
FENICS-2024 EXPERIMENT: 1. OBSERVATIONS****В.А. Пилипенко** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru***Е.Н. Ермакова** *Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского университета,
Н. Новгород, Россия, lermakova@nirfi.unn.ru***А.С. Потапов** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru***Р.А. Марчук***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, marchuk@iszf.irk.ru***В.В. Колобов** *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, v.kolobov@ksc.ru***С.В. Анисимов** *Геофизическая обсерватория «Борок»
Института физики Земли РАН,
Борок, Россия, anisimov@borok.yar.ru***А.В. Рябов** *Институт прикладной физики,
Нижний Новгород, Россия, alexr@nirfi.unn.ru***Н.Г. Мазур** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, ngmazur@mail.ru***Е.Н. Федоров** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, enfedorov1@yandex.ru***Э.М. Дмитриев** *Геофизическая обсерватория «Борок»
Института физики Земли РАН,
Борок, Россия, eldar@borok.yar.ru***V.A. Pilipenko***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru***E.N. Ermakova***Institute of Radiophysics of Nizhny Novgorod University,
Nizhny Novgorod, Russia, lermakova@nirfi.unn.ru***A.S. Potapov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru***R.A. Marchuk***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, marchuk@iszf.irk.ru***V.V. Kolobov***Northern Energy Center KSC,
Apatity, Russia, v.kolobov@ksc.ru***S.V. Anisimov***Borok Geophysical Observatory of the Institute of Physics
of the Earth RAS,
Borok, Russia, anisimov@borok.yar.ru***A.V. Ryabov***Institute of Applied Physics RAS,
Nizhny Novgorod, Russia, alexr@nirfi.unn.ru***N.G. Mazur***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, ngmazur@mail.ru***E.N. Fedorov***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, enfedorov1@yandex.ru***E.M. Dmitriev***Borok Geophysical Observatory of the Institute of Physics
of the Earth RAS,
Borok, Russia, eldar@borok.yar.ru*

Аннотация. В июле–августе 2024 г. на Кольском п-ве был проведен эксперимент FENICS-2024 по генерации искусственных электромагнитных сигналов в ночные часы с использованием двух выведенных из работы линий электропередачи (ЛЭП) в качестве горизонтальной излучающей антенны. Частота генератора от сеанса к сеансу дискретно менялась от 1 до 194 Гц с амплитудой тока от ~150 А на низких частотах до ~40 А на высоких. В работе представлены результаты первого этапа эксперимента, когда в качестве излучающей антенны использовалась ЛЭП Выходной—Оленегорск с расстоянием между заземлителями подстанций $L=84$ км. На магнитных станциях, расположенных на расстояниях от узловой подстанции от ~1200 до ~2100 км, зарегистрированы сигналы с частотами от 1 до 9 Гц с ампли-

Abstract. In July–August 2024 on the Kola Peninsula, the FENICS-2024 experiment was conducted to generate artificial electromagnetic signals at night, using two power transmission lines as a horizontal radiating antenna. The generator frequency varied discretely from session to session from 1 to 194 Hz with current amplitude from ~150 A at low frequencies to ~40 A at high frequencies. The paper presents the results of the first stage of the experiment when the power transmission line Vykhodnoy—Olenegorsk with a distance between earth electrodes of substations $L=84$ km was utilized as a radiating antenna. Magnetic stations, located from ~1200 to ~2100 km from the nodal substation, recorded signals with frequencies from 1 to 9 Hz with ~0.3–~6.0 fT/A amplitudes normalized to the emitter current. The observations have shown the promise of the new type of active

тудами, нормированными на величину тока излучателя, от ~ 0.3 до ~ 6.0 фТл/А. Проведенные наблюдения показали перспективность нового типа активных экспериментов по генерации зондирующего сигнала для магнитотеллурического зондирования на большой площади. Сопоставление результатов наблюдений с теоретическими моделями будет представлено в следующей работе.

Ключевые слова: УНЧ-излучения, распределенная сеть, FENICS, ЛЭП, активные эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ: ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ

Ультранизкочастотные (УНЧ) волны в диапазоне частот от долей до единиц герц (пульсации Pc1) имеют особое значение для космической физики. Вследствие резонансного взаимодействия волна–частица электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны диапазона Pc1 могут вызывать высыпание релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом уменьшать поток электронов–«убийц» до безопасного для спутниковой электроники [Usanova et al., 2014]. Кроме того, электромагнитные возмущения УНЧ-диапазона широко используются для магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры [Бердичевский, Дмитриев, 1992]. Возникает вопрос: можно ли электромагнитные волны диапазона Pc1 возбуждать искусственно?

Впервые искусственные сигналы Pc1 были обнаружены во время высотных ядерных взрывов. Например, взрыв Argus в ионосфере над Атлантикой вызвал геомагнитные возмущения с периодами 1–3 с и амплитудами 2–5 пТл, которые распространились практически во все части света [Berthold et al., 1960]. В качестве менее экстремального метода предлагалось возбуждение искусственных пульсаций Pc1 модулированным радионагревом ионосферы [Гетманцев и др., 1977; Papadopoulos et al., 2005, Guo et al., 2021]. В первых экспериментах на стенде СУРА при модулированном импульсном коротковолновом (КВ) облучении дневной ионосферы удалось обнаружить возбуждение магнитных пульсаций на частоте модуляции 3 Гц с амплитудами несколько нанотесла примерно в 100 км от передатчика [Гетманцев и др., 1977]. Предположительно, нагрев E-слоя приводит к вариациям частоты столкновения электронов, от которой зависит проводимость столкновительной плазмы ионосферы, и в результате в области нагрева возникает периодическая модуляция ионосферного тока, возбуждающего геомагнитные пульсации. Модулированный КВ-нагрев F-области может генерировать ионосферные токи, которые действуют как антенна для инжекции волн Pc1 в ионосферный волновод [Papadopoulos et al., 2005, 2011a]. Градиент давления, связанный с пульсирующим нагревом электронов, создает локальный диамагнитный ток на частоте модуляции, который возбуждает магнито-

experiments on creating a probing signal for magnetotelluric sounding over a large area.

The observation results will be compared with theoretical models in the subsequent work.

Keywords: ULF emissions, distributed network, FENICS, power transmission line, active experiments.

звуковую волну [Li et al., 2024]. Предположительно, искусственные УНЧ-волны распространяются вдоль ионосферного магнитозвукового волновода, при этом наземные отклики обнаруживаются только в тех областях, где волна достигала E-области после отражения от верхней стенки волновода. Этот механизм генерации искусственных Pc1-пульсаций подтвердился в экспериментах с использованием нагревных стендов HAARP, EISCAT и Arecibo. Пространственно-локализованный волновой отклик на частоте модуляции 2.5 Гц был обнаружен наземными магнитометрами в 20 км от стенда HAARP и низкоорбитальным спутником DEMETER в пределах 100–150 км от места нагрева [Papadopoulos et al., 2011b]. Во время другого нагревного эксперимента в данных наземных магнитных станций присутствовали спектральные пики на частоте модуляции 3.8 Гц с амплитудами 30–40 фТл [Eliasson et al., 2012]. Несколько кампаний по модулированному нагреву ионосферы стендом СУРА показали, что основную роль в возбуждении искусственных сигналов играет пондеромоторная сила из-за градиента давления в области омического нагрева [Котик и др., 2013]. Пульсации диапазона 2–20 Гц с амплитудами от 0.2 до 0.5 пТл наблюдались только в окрестности нагревного стенда (первые десятки километров) и резко спадали по амплитуде с удалением от него.

Метод возбуждения Pc1-излучения радионагревом требует колоссальных затрат и привязан к нагревному стенду. Возникает вопрос, может ли другая наземная антенна использоваться для возбуждения в ионосфере искусственных Pc1-пульсаций, притом что заметной эффективности излучения ультра- и крайне низкочастотного (КНЧ) диапазонов (от единиц до сотен герц) можно ожидать только для чрезвычайно крупномасштабных излучающих систем. Действительно, такие УНЧ-КНЧ-передатчики существуют — это обширная мировая сеть линий электропередачи (ЛЭП). В сбалансированном режиме излучение трехфазной ЛЭП на промышленной частоте 50–60 Гц невелико, но в асимметричном несбалансированном режиме сети ЛЭП становятся источником излучения на промышленной частоте, которое проникает даже в околоземное пространство [Пилипенко и др., 2021]. Следовательно, отключенную от магистральной сети ЛЭП можно использовать как контролируемый источник УНЧ/КНЧ-излучения [Беляев и др., 2002; Ермакова и др., 2005; Ermakova et al., 2006].

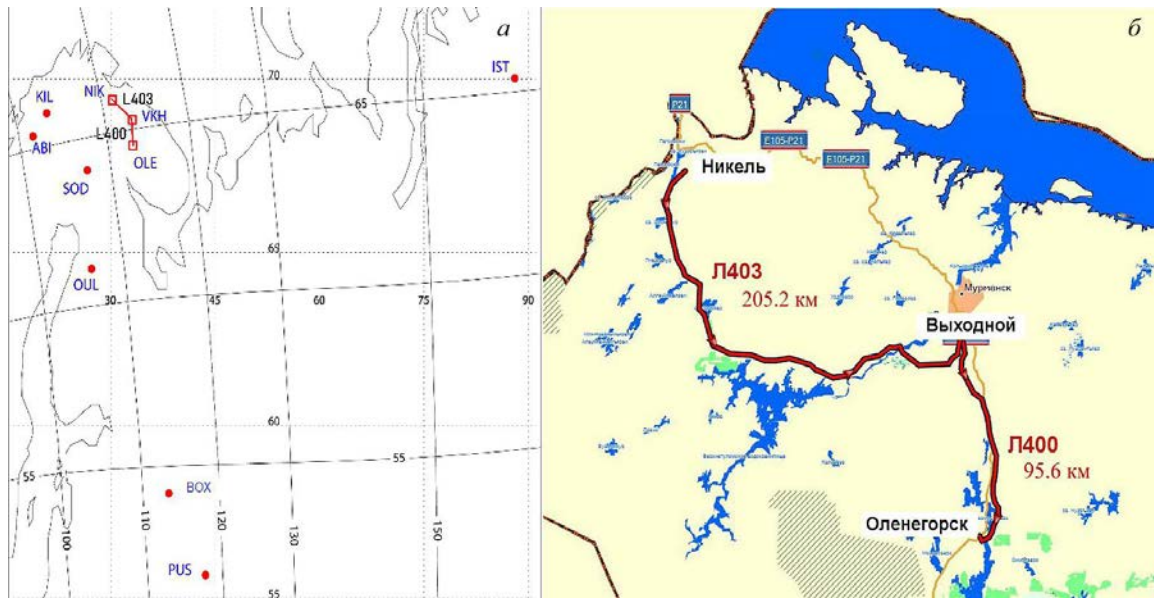


Рис. 1. Положение узловых подстанций энергосети и магнитных станций (а): пунктирные линии — географические параллели и меридианы, штриховые — исправленные геомагнитные, а также ЛЭП (б), использовавшихся в эксперименте FENICS-2024

На Кольском п-ве проводятся эксперименты FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from soundings with the Natural and Controlled Sources) с управляемыми источниками электромагнитных полей УНЧ/КНЧ-диапазонов с использованием ЛЭП в качестве горизонтальной излучающей антенны [Велихов и др., 1994; Жамалетдинов и др., 2015, 2019]. Основные задачи экспериментов с использованием искусственных сигналов состояли в магнитно-теллурическом зондировании (МТЗ) Фенноскандинавского щита для построения модели проводимости литосферы и в изучении особенностей распространения УНЧ/КНЧ электромагнитного поля в волноводе Земля–ионосфера. В период с 25 июля по 8 августа 2024 г. проводился очередной эксперимент FENICS-2024 с использованием временно выведенных из эксплуатации ЛЭП 330 кВ в качестве излучающих антенн. В работе представлены результаты регистрации искусственных УНЧ-сигналов на магнитных станциях, удаленных от источника на расстояние от ~300 до ~2100 км.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ FENICS-2024 И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СТАНЦИИ

Эксперимент FENICS-2024 проводился в два этапа (рис. 1, б):

- На первом этапе 25–26 июля (по мировому времени (UT) — 24–25 июля) 2024 г. в качестве излучающих антенн использовалась линия Л-400 Выходной (VKN) — Оленегорск (OLE) длиной 95.6 км, расстояние между заземлителями подстанций $L=84$ км.
- На втором этапе 31 июля (по UT — 30 июля) — 8 августа 2024 г. использовалась линия Л-403 Выходной—Никель (NIK) длиной 205 км, расстояние между заземлителями подстанций $L=130$ км.

На обоих этапах источником тока служил генератор «Энергия-2», подключенный к заземляющему

устройству подстанции VKN и к высоковольтной воздушной ЛЭП [Баранник и др., 2012; Колобов и др., 2013]. В ходе эксперимента генератор мощностью 200 кВт создавал в ЛЭП переменный ток с амплитудой от ~140–150 А на низких частотах (1–10 Гц) до ~40 А на самых высоких (194 Гц). Ток в ЛЭП с заданной частотой подавался 15-минутными сеансами по расписанию с 00 до 04 ч московского времени (с 21 до 01 UT). Рабочие частоты в УНЧ-диапазоне были 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 7.5, 9.0 Гц. Регистрация тока в линии производилась с помощью компенсационного датчика тока с точностью 0.5 % и линейностью передаточной характеристики не хуже 0.1 %. Режим работы всех линий во время эксперимента не изменялся. В данной статье мы приведем результаты первого этапа эксперимента.

На сравнительно небольшом удалении от источника (300–550 км) искусственные излучения контролировались индукционными магнитометрами в Финляндии и Швеции, развернутыми Геофизической обсерваторией Соданкюля (SGO) [<https://www.sgo.fi>]. Большинство станций этой сети работает с частотой дискретизации 250 Гц и имеет фильтр отсечки на 35 Гц.

Для изучения особенностей сверхдальнего распространения (>1000 км) УНЧ-сигналов наблюдения двух горизонтальных компонент магнитного поля (B_x — север–юг, B_y — восток–запад) велись на нескольких магнитных станциях с высокочувствительной аппаратурой.

Геофизическая обсерватория «Борок» (BOX) проводит мониторинг широкого комплекса геофизических полей [Chulliat, Anisimov, 2008; Anisimov et al., 2008]. Регистрация магнитных вариаций диапазона Pc1 ведется с использованием аппаратуры СММ-009 с частотой дискретизации 100 Гц. В состав аппаратуры входит трехкомпонентный магнитометр на основе индукционных датчиков IMS-010 с плоской ампли-

тудно-частотной характеристикой в диапазоне 2 Гц – 1 кГц и линейной в диапазоне 0.001–2 Гц при уровне шума $\sim 10^{-4}$ нТл/√Гц на 1 Гц [Поляков и др., 2016]. Выделение сигнала выполнялось методом спектрального накопления с последующим усреднением полученных реализаций. Обсерватория «Борок» удалена от узловой подстанции VKH на $R \sim 1230$ км.

Станция «Старая Пустынь» (PUS) находится на территории радиофизического полигона НИРФИ ННГУ [Ермакова и др., 2019]. Оборудование приемного пункта включает индукционный магнитометр с частотой оцифровки 64 Гц. Датчики отличает высокая линейность преобразования, слабые шумы на низких частотах и большой динамический диапазон, что позволяет проводить измерения даже при относительно высоком уровне помех. Калибровка регистрирующего тракта проводится узкополосным сигналом от магнитной рамки с током. Станция удалена от VKH на $R \sim 1560$ км.

Станция «Исток» (IST) Института солнечно-земной физики СО РАН находится ~ 100 км к северу от Норильска. Работающий на станции индукционный магнитометр с частотой дискретизации 64 Гц имеет почти плоскую частотную характеристику в диапазоне 0.3–10 Гц. Оценка амплитуды зарегистрированного сигнала проводилась по следующему алгоритму. Для анализируемого интервала строился спектр сигнала и измерялся локальный пик спектральной мощности. Затем формировался новый спектр, состоящий из пика на выделяемой частоте, и производилось обратное преобразование Фурье в гармонический сигнал с искомой амплитудой. Поскольку на частотах выше 1 Гц частотная характеристика плоская, то для оценки амплитуды в физических единицах использовался известный коэффициент конверсии вольт в нанотеслы. Станция удалена от VKH на $R \sim 2100$ км.

Географические координаты станций и расстояние R до узловой подстанции «Выходной» представлены в табл. 1. Расположение подстанций ЛЭП и магнитных станций показано на рис. 1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ УНЧ-СИГНАЛОВ НА РАЗНЫХ РАССТОЯНИЯХ

Геомагнитная обстановка в период проведения эксперимента была спокойной. Региональный индекс активности аврорального электроджета IE [https://space.fmi.fi/image/www/], рассчитанный вдоль финских станций MEK–OUJ–SOD–IVA–KEV–NOR, в ночные часы не превышал 300 нТл, поэтому условия выделения искусственных сигналов в основном определялись не магнитосферно-ионосферной возмущенностью, а местными шумами. Поскольку условия генерации сигнала и ионосферные условия в этот период были практически неизменными, данные регистрации приводятся для одного из дней 1-го этапа эксперимента — 26.07.2024 по московскому времени (25.07.2024 по UT). Общая информация об измеренной в разных сеансах полной амплитуде горизонтальной компоненты принятых сигналов, нормиро-

Таблица 1

Магнитные станции и подстанции ЛЭП

Станция	Код	Широта	Долгота	R , км
Выходной	VKH	68.84	33.08	0
Оленегорск	OLE	68.09	33.17	84
Никель	NIK	69.40	30.22	130
Kilpisjärvi	KIL	69.05	20.79	493
Соданкюля	SOD	67.37	26.63	314
Abisko	ABI	68.36	18.82	503
Oulujärvi	OUJ	64.52	27.23	546
Борок	BOX	58.03	38.33	1231
Старая Пустынь	PUS	55.66	43.63	1557
Исток	IST	70.03	88.01	2077

Таблица 2

Нормированная амплитуда [фТл/А] искусственных сигналов на разных станциях (1 этап эксперимента) 25–26 июля 2024 г. Л 400

f , Гц	BOX	PUS	IST
1.0	6.3	0.41	0.27
1.5	2.0	0.80	0.31
2.0		0.51	0.36
3.0	1.4	0.69	0.37
4.0	1.7	0.65	0.28
6.0	1.8		0.32
9.0	2.2		

ванной на величину тока излучателя J_0 в сеансе, представлена в табл. 2.

На относительно близких станциях в Скандинавии во все дни эксперимента наблюдался четкий отклик на всех рабочих частотах от 1 до 10 Гц. На рис. 2 приведены спектрограммы в частотном диапазоне 1–4 Гц на станциях KIL, ABI, SOD и OUJ за 25.07.2024 по UT (в остальные дни принятые сигналы были подобны). Короткие горизонтальные треки на спектрограммах в 21–22 UT обусловлены монохроматическим излучением, генерируемым в соответствующих сеансах. Видно, что интенсивность искусственных сигналов на удалениях от источника 300–550 км может превышать интенсивность естественных Pc1-пульсаций, как, например, в 00–03 UT на станции KIL (см. рис. 2).

Спектры излучения, зарегистрированного в обсерватории BOX 26.07.2024 по московскому времени, показаны на рис. 3. Выделяется излучение на всех генерируемых частотах в диапазоне от 1 до 9 Гц, лишь узкополосная помеха около 2 Гц не позволяет выделить искусственный сигнал на этой частоте, а также излучение на частоте 7.5 Гц подавляется излучением основной моды шумановского резонанса ~ 7.8 Гц. Нормированная амплитуда искусственных сигналов варьирует от ~ 6 до ~ 1.4 фТл/А, но зависимость от частоты имеет немонотонный характер (см. табл. 2).

Излучаемые ЛЭП искусственные сигналы были зарегистрированы также на более удаленной от источника станции PUS на всех частотах в диапазоне 1–4 Гц, и они достаточно уверенно выделяются на фоне

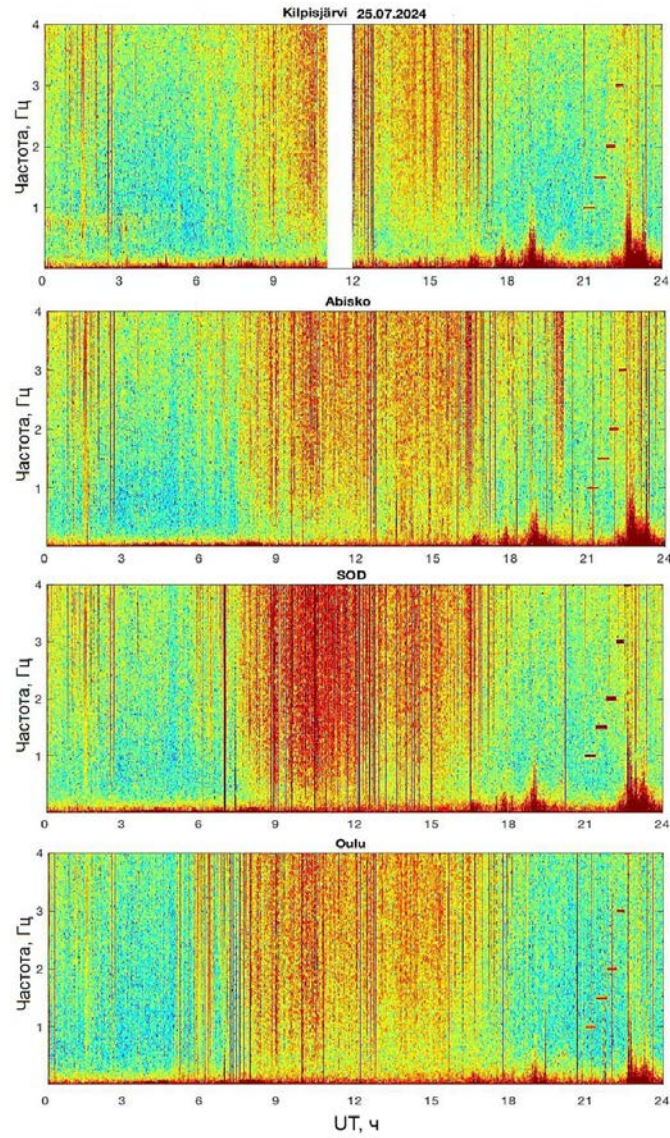


Рис. 2. Спектрограммы полной мощности магнитных шумов, зарегистрированных на станциях KIL, ABI, SOD, OUL в Финляндии и Швеции 25 июля 2024 г. (по UT)

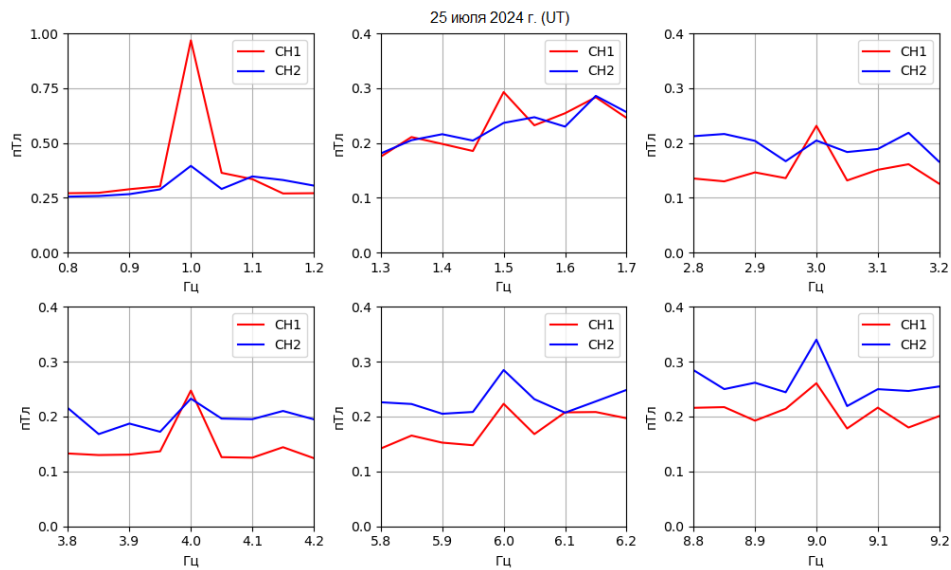


Рис. 3. Спектры искусственного излучения [пТл], зарегистрированного в обсерватории BOX 25 июля 2024 г. (по UT), для шести интервалов подачи искусственных сигналов с разной частотой (от 1 до 9 Гц). CH1 и CH2 — соответственно меридиональная и азимутальная компоненты регистрируемого излучения

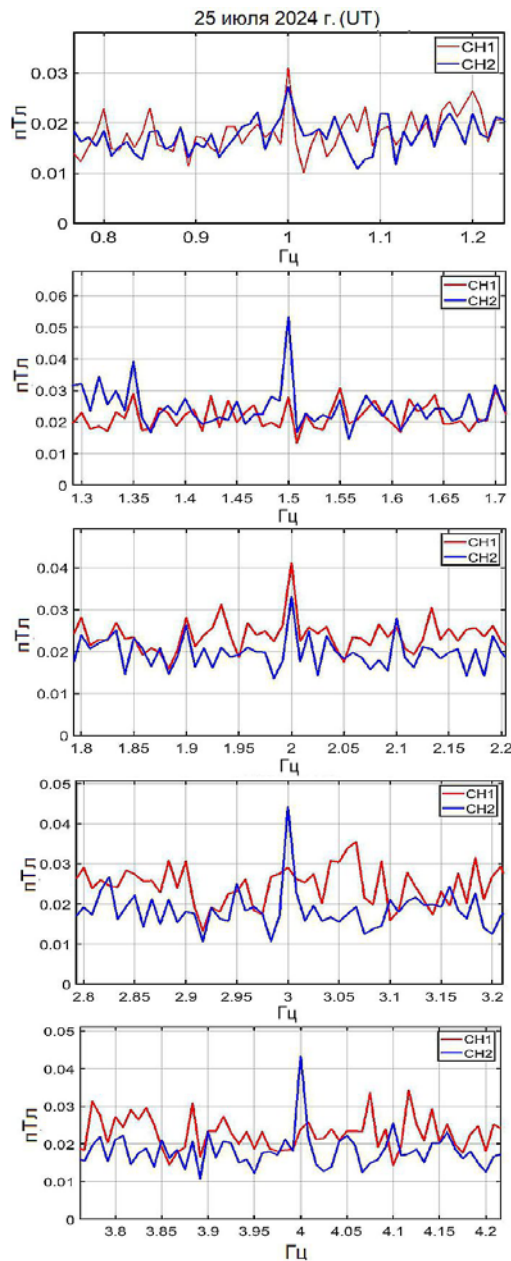


Рис. 4. Спектры амплитуды [пТл] искусственных сигналов с различными частотами, зарегистрированных 25 июля 2024 г. (по UT) на станции PUS. Канал CH1 соответствует B_x -компоненте, CH2 — B_y -компоненте

шумов. Статические спектры калиброванной записи для 26.07.2024 по московскому времени показаны на рис. 4. По обоим горизонтальным компонентам были зарегистрированы сигналы с сопоставимой амплитудой, хотя B_y -компонента (канал CH2) немного преобладает над B_x (канал CH1). Характерные значения нормированных амплитуд сигналов во всех сеансах составляют 0.4–0.8 фТл/А (см. табл. 2).

На самой удаленной от источника станции IST на спектрах также заметны пики, соответствующие появлению искусственного гармонического излучения. Спектральные пики удается выделить, рассматривая близкую окрестность задаваемой установкой частоты (рис. 5). Нормированные амплитуды регистрируемого сигнала в среднем составили ~0.3 фТл/А.

На рис. 6 сопоставлены амплитуды искусственных Pcl-сигналов (D -компонента) на разных частотах на дальних станциях PUS и IST. В среднем амплитуда на ст. PUS (0.6 ± 0.2 фТл/А) превышает амплитуду на ст. IST (0.3 ± 0.05 фТл/А) примерно в два раза. Поскольку амплитуды сигналов лишь немного превышают уровень шумов, говорить о частотной зависимости сложно. Скорее всего, эта зависимость имеет немонотонный характер.

По сравнению с типичной амплитудой Pcl-пульсаций ~20–40 пТл на средних и субаворотных широтах амплитуда искусственных Pcl-сигналов на больших удалениях от ЛЭП оказалась примерно на два порядка меньше: 0.05 ± 0.01 пТл на ст. IST, и 0.04 ± 0.01 пТл на ст. PUS. Хотя эксперимент проводился в магнитоспокойных условиях, искусственный сигнал был на уровне шумов, но, вследствие монохроматичности излучения на заранее известной частоте, уверенно выделялся как на спектрограммах, так и в статических спектрах (см. рис. 3–5).

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента FENICS-2024 подтверждают идею, что отключенные от магистрали ЛЭП можно использовать в качестве контролируемого источника УНЧ-волн. В эксперименте искусственные сигналы в диапазоне частот 1–6 Гц были обнаружены на расстоянии более 2000 км. Столь дальнее распространение никогда не наблюдалось в экспериментах по ионосферному радионагреву [Papadopoulos et al., 2011a]. Таким образом, использование установки FENICS для возбуждения искусственного излучения может быть значительно более дешевой и эффективной альтернативой радионагреву. Генерируемые ЛЭП искусственные сигналы делают возможным проведение МТЗ на огромной территории. Аналогичные эксперименты с использованием сигналов от крупномасштабных установок CSELF (Control Source Extremely Low Frequency) [Zhao et al., 2015] и WEM (Wireless Electromagnetic Method) [Su et al., 2012] для мониторинга проводимости поверхностных слоев земной коры проводятся в Китае.

При МТЗ следует учитывать отличие искусственных сигналов Pcl от природных УНЧ-пульсаций. В природных УНЧ-пульсациях, возбуждаемых ионосферными токами, преобладает магнитная мода [Pilipenko et al., 2021]. В структуру же искусственных сигналов, возбуждаемых горизонтальной антенной конечной длины, дают вклад как магнитная, так и электрическая моды. Над высокоомными породами (типа гранитов на Кольском полуострове) поверхностные импедансы этих мод различаются, и для корректного МТЗ надо применять дирекционный анализ, позволяющий разделять вклады электрической и магнитной мод [Четаев, 1985].

Отношение сигнал/шум в УНЧ-диапазоне можно повысить, увеличивая переменный ток в ЛЭП. Однако мощность генератора ограничивается 100–200 кВт, тогда как, например, для линии Л-403 с сопротивле-

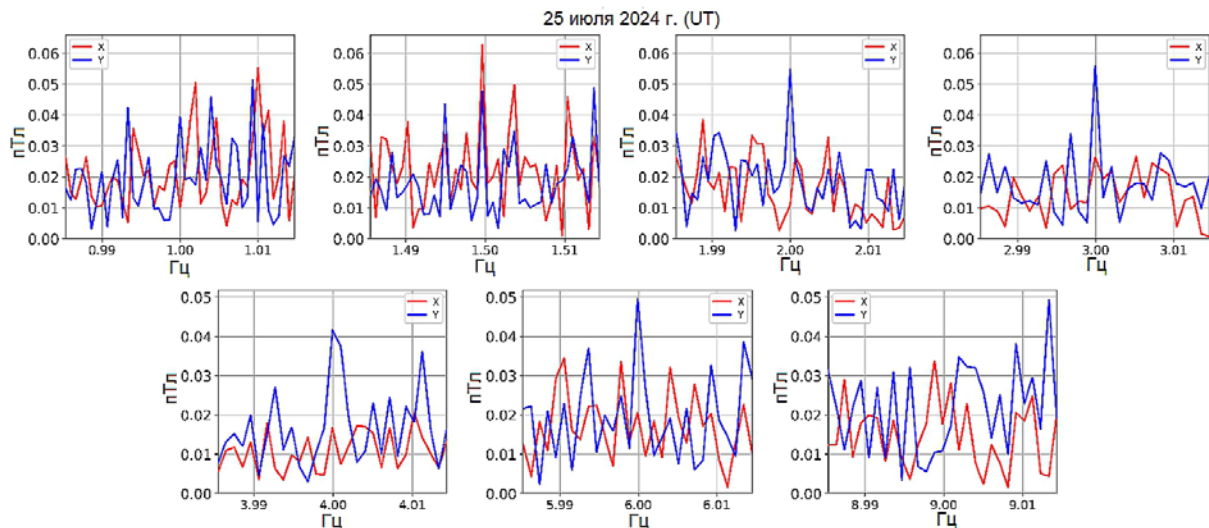


Рис. 5. Спектры амплитуды [пТл] горизонтальных компонент искусственных сигналов разной частоты на ст. IST 25 июля 2024 г. (по UT)

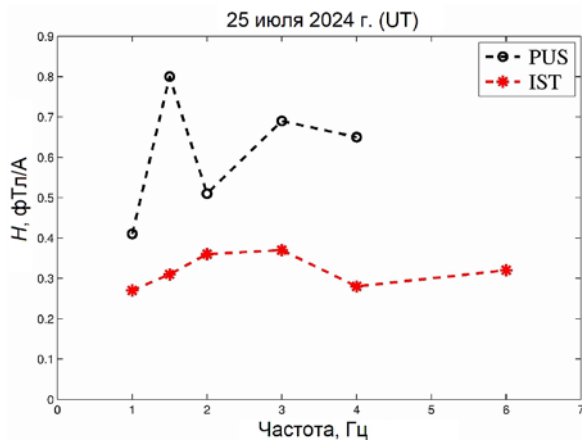


Рис. 6. Сопоставление нормированных амплитуд искусственных Pc1-сигналов (горизонтальная D-компонента) на разных частотах, зарегистрированных 25.07.2024 (по UT) на дальних станциях PUS и IST

нием 2.5–5 Ом для увеличения тока до 10^3 А мощность генератора должна составлять 2.5–5 МВт, что делает установку не столь мобильной и крайне дорогой. В этом случае более перспективным представляется использование МГД-генераторов с сопротивлением контура меньше 0.1 Ом.

Сопоставление результатов наблюдений с теоретическими оценками с использованием различных моделей возбуждения УНЧ-поля в атмосфере и ионосфере будет проведено в следующей работе. Искусственные сигналы установки FENICS, по-видимому, излучаются и в верхнюю ионосферу [Пилипенко и др., 2024]. Вопрос от том, каких амплитуд искусственного Pc1-излучения можно ожидать в верхней ионосфере в окрестности установки FENICS-2024 при использованных величинах токов, также будет рассмотрен в следующей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент FENICS-2024 показал, что ЛЭП с токами 140–150 А является эффективным источником искусственных УНЧ-волн диапазона 1–10 Гц. Ис-

пользование временно выведенных из эксплуатации ЛЭП может быть значительно более дешевой и эффективной альтернативой радионагревным методам возбуждения искусственных Pc1-излучений. Такие искусственные сигналы можно применять для оперативного МТЗ поверхностных слоев земной коры на огромной площади.

Выражаем признательность Д.Д. Поздняковой, А.В. Гурьеву за помощь в анализе данных и администрации Геофизической обсерватории Соданкюля за открытый доступ к спектрограммам магнитометров.

Работа выполнена в рамках госзаданий Минобрнауки ИФЗ РАН № FMWU-2025-0043 и № FMWU-2025-0049, НИРФИ ННГУ № FSWR-2023-0038, ИСЗФ СО РАН № FWSE-2021-0005, ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2025-0049. Эксперимент FENICS-2024 был проведен при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00208 (В.В.К.). Регистрация сигналов на ст. «Исток» (IST) велась с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранник М.Б., Колобов В.В., Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А. Генераторно-измерительный комплекс направленного действия «Энергия-2м» для сейсмического мониторинга и зондирования рудных объектов. *Сейсмические приборы*. 2012, т. 48, № 1, с. 5–25.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н. и др. Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ-излучений (0.3–12 Гц) на дистанции 1500 км. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002, т. 45, № 2, с. 156–162.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред*. М.: Недра, 1992, 250 с.
- Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона. *Доклады Академии наук*. 1994, т. 338, № 1, с. 106–109.
- Гетманцев Г.Г., Гульельми А.В., Клайн Б.И. и др. Возбуждение магнитных пульсаций при воздействии на ионосферу излучением мощного коротковолнового

В.А. Пилипенко, Е.Н. Ермакова, А.С. Потапов, Р.А. Марчук,
В.В. Колобов, С.В. Анисимов, А.В. Рябов,
Н.Г. Мазур, Е.Н. Федоров, Э.М. Дмитриев

V.A. Pilipenko, E.N. Ermakova, A.S. Potapov, R.A. Marchuk,
V.V. Kolobov, S.V. Anisimov, A.V. Ryabov,
N.G. Mazur, E.N. Fedorov, E.M. Dmitriev

- передатчика. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977, т. 20, № 7, с. 1017–1019.
- Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Собчаков Л.А. и др. Экспериментальные исследования распространения искусственных электромагнитных сигналов в диапазоне 0.6–4.2 Гц. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005, т. 48, № 9, с. 788–799.
- Ермакова Е.Н., Рябов А.В., Пилипенко В.А. и др. Новая станция для мониторинга космических и атмосферных электромагнитных излучений. *Вестник ОНЗ РАН*. 2019, т. 11, NZ1105. DOI: [10.2205/2019NZ000362](https://doi.org/10.2205/2019NZ000362).
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П. и др. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ-диапазона (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS»). *Геофизические процессы и биосфера*. 2015, т. 14, № 2, с. 5–49.
- Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н. и др. Эксперимент «Мурман-2018» по дистанционному зондированию с целью исследования границы «непроницаемости» на переходе между хрупким и пластичным состояниями кристаллической земной коры. *Доклады Академии наук*. 2019, т. 486, № 3, с. 91–96.
- Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб.: Соло, 2013, 240 с.
- Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н. и др. Свойства УНЧ/ОНЧ-сигналов, генерируемых установкой СУРА в верхней ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013, т. 56, № 6, с. 382–394.
- 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) / Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Mazur N.G., Klimov S.I. Electromagnetic pollution of near-Earth space by power line emission. *Solar-Terrestrial Physics*. 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 105–113. DOI: [10.12737/stp-73202107](https://doi.org/10.12737/stp-73202107).
- Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Шевцов А.Н. О возможности экспериментов по возбуждению искусственных ультранизкочастотных излучений в ионосфере установкой FENICS на Кольском полуострове. *Известия РАН. Серия физическая*. 2024, т. 88, № 3, с. 392–400.
- Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В. и др. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований. *Сейсмические приборы*. 2016, т. 52, № 1, с. 5–27.
- Четаев Д.Н. *Дирекционный анализ магнитотеллурических наблюдений*. М.: ИФЗ АН СССР, 1985, 228 с.
- Anisimov S.V., Chulliat A., Dmitriev E.M. Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2008, vol. 10, ES3007. DOI: [10.2205/2007ES000227](https://doi.org/10.2205/2007ES000227).
- Berthold W.K., Harris A.K., Hope H.J. World-wide effects of hydromagnetic waves due to Argus. *J. Geophys. Res.* 1960, vol. 65, pp. 2233–2239. DOI: [10.1029/JZ065i008p02233](https://doi.org/10.1029/JZ065i008p02233).
- Chulliat A., Anisimov S.V. The Borok INTERMAGNET magnetic observatory. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2008, vol. 10, ES3003. DOI: [10.2205/2007ES000238](https://doi.org/10.2205/2007ES000238).
- Eliasson B., Chang C.-L., Papadopoulos K.J. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A10320. DOI: [10.1029/2012JA017935](https://doi.org/10.1029/2012JA017935).
- Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V., et al. A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A04305. DOI: [10.1029/2005JA011420](https://doi.org/10.1029/2005JA011420).
- Guo Z., Fang H., Honary F. The generation of ULF/ELF/VLF waves in the ionosphere by modulated heating. *Universe*. 2021, vol. 7, no 2, p. 29. DOI: [10.3390/universe7020029](https://doi.org/10.3390/universe7020029).
- Li Y., Li H., Wu J., et al. Artificial excitation and propagation of ultra-low frequency signals in the polar ionosphere. *Phys. Plasmas*. 2024, vol. 31, 082901. DOI: [10.1063/5.0202317](https://doi.org/10.1063/5.0202317).
- Papadopoulos K., Wallace T., Milikh G.M., et al. The magnetic response of the ionosphere to pulsed HF heating. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L13101. DOI: [10.1029/2005GL023185](https://doi.org/10.1029/2005GL023185).
- Papadopoulos K., Gumerov N.A., Shao X., et al. HF-driven currents in the polar ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2011a, vol. 38, L12103. DOI: [10.1029/2011GL047368](https://doi.org/10.1029/2011GL047368).
- Papadopoulos K., Chang C.-L., Labenski J., Wallace T. First demonstration of HF-driven ionospheric currents. *Geophys. Res. Lett.* 2011b, vol. 38, L20107. DOI: [10.1029/2011GL049263](https://doi.org/10.1029/2011GL049263).
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Martines-Bedenko V.A., Berling E.A. Electric mode excitation in the atmosphere by magnetospheric impulses and ULF waves. *Frontiers in Earth Science*. 2021, vol. 8, pp. 687. DOI: [10.3389/feart.2020.619227](https://doi.org/10.3389/feart.2020.619227).
- Su B., Wang Y., Cao Q. Simulation of WEM using ELF modeling of local area and modified UPML. *ISAPE2012*. 2012. Xi'an, China, pp. 983–986. DOI: [10.1109/ISAPE.2012.6408939](https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408939).
- Usanova M.E., Drozdov A., Orlova K., et al. Effect of EMIC waves on relativistic and ultrarelativistic electron populations: Ground-based and Van Allen Probes observations. *Geophys. Res. Lett.* 2014, vol. 41, pp. 1375–1381. DOI: [10.1002/2013GL059024](https://doi.org/10.1002/2013GL059024).
- Zhao G.Z., Bi Y.X., Wang L.F., et al., Advances in alternating electromagnetic field data processing for earthquake monitoring in China. *Science China Earth Sciences*. 2015, vol. 58, no. 2, pp. 172–182. DOI: [10.1007/s11430-014-5012-3](https://doi.org/10.1007/s11430-014-5012-3).
URL: <https://www.sgo.fi> (дата обращения 20 марта 2025 г.).
URL: <https://space.fmi.fi/image/www/> (дата обращения 20 марта 2025 г.).
URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 20 марта 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Пилипенко В.А., Ермакова Е.Н., Потапов А.С., Марчук Р.А., Колобов В.В., Анисимов С.В., Рябов А.В., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Дмитриев Э.М. Возбуждение глобальных искусственных сигналов диапазона Pc1 в эксперименте FENICS-2024: 1. Наблюдения. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 124–131. DOI: [10.12737/szf-112202511](https://doi.org/10.12737/szf-112202511).