

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА В ИОНОСФЕРУ ОТ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЗАЗЕМЛЕННОГО ДИПОЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЭРГУ-600-2 (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

В.М. Сорокин<sup>1</sup>, А.К. Ященко<sup>1\*</sup>, В.А. Новиков<sup>2,3</sup>, С.А. Имашев<sup>4</sup>, Е.А. Лазарева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Научная станция РАН в Бишкеке, г. Бишкек, Кыргызстан

\*E-mail: alexey\_yaschenko@mail.ru

**Аннотация.** Исследован физический механизм распространения возмущения электромагнитного поля, генерируемого электроразведочной генераторной установкой ЭРГУ-600-2, расположенной на Бишкекском геодинамическом полигоне Научной станции РАН в Бишкеке (Кыргызстан), в нижнюю ионосферу. В рамках упрощенной модели среды и источника излучения (заземленный диполь, запитываемый установкой ЭРГУ-600-2) получены аналитические выражения для частотных и пространственно-временных распределений компонент электромагнитного поля. Результаты расчетов показывают, что амплитуда возмущения электрического поля в УНЧ-диапазоне на высоте 70–100 км достигает единиц мкВ/м. Расчетная амплитуда магнитного поля на поверхности Земли в месте расположения излучающего диполя составляет единицы нТл. Для верификации численных результатов на территории Бишкекского геодинамического полигона выполнены полевые измерения амплитуды возмущения геомагнитного поля на различном расстоянии от излучающего диполя во время сеансов работы установки ЭРГУ-600-2. Полученные результаты полевых измерений согласуются с результатами расчетных исследований, что позволяет использовать предложенную расчетную методику для оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды при работе техногенных источников типа системы "ЭРГУ-600-2 + диполь".

**Ключевые слова:** электроразведочная установка; заземленный излучающий диполь; электромагнитное поле; ионосфера; возмущение геомагнитного поля

## ELECTROMAGNETIC SIGNAL PROPAGATION INTO IONOSPHERE FROM THE RADIATING GROUNDED DIPOLE OF THE ERGU-600-2 ELECTRIC PROSPECTING GENERATOR FACILITY (NORTHERN TIEN SHAN)

V. M. Sorokin, A. K. Yaschenko, V. A. Novikov, S. A. Imashev, E. A. Lazareva

**Abstract.** The physical mechanism of propagation of the electromagnetic field disturbance generated by the electric prospecting generator facility ERGU-600-2 located at the Bishkek geodynamic test site of the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek (Kyrgyzstan) into the lower ionosphere is investigated. Within the framework of a simplified model of the medium and the radiation source (grounded dipole powered by the ERGU-600-2 facility), analytical expressions were obtained for the frequency and spatiotemporal distributions of the electromagnetic field components. The numerical results demonstrate that the amplitude of the electric field disturbance in the ULF range at an altitude of 70 to 100 km reaches several  $\mu\text{V}/\text{m}$ . To verify the numerical results on the territory of the Bishkek geodynamic test site, field measurements of the full geomagnetic field vector were carried out at various distances from the radiating dipole during the ERGU-600-2 operation sessions. The results of field measurements are consistent with the results of numerical studies, which allows to apply the proposed numerical method for assessing the electromagnetic pollution of the environment during the operation of man-made sources such as the "ERGU-600-2 + dipole" system.

**Keywords:** electrical prospecting facility; grounded radiating dipole; electromagnetic field; ionosphere; geomagnetic field disturbance

### Введение

С учетом стремительного технологического развития в последние годы все большее значение приобретают исследования электромагнитного (ЭМ) загрязнения окружающей среды, то есть совокупности ЭМ-полей различной частоты, создаваемого природными и антропогенными источниками, которое может негативно влиять на работу различных

технических устройств и здоровье человека. Особый интерес представляют исследования распространения ЭМ-излучения УНЧ-диапазона в ионосферу, обзор которых для ЭМ-воздействия наземных линий электропередач (ЛЭП) на околоземное пространство представлен в работе [1]. Отмечается, что при пролете микроспутников «Чибис-М» и DEMETER на высоте 513 км и 660...710 км, соответственно, над протяженными ЛЭП, амплитуда тока в которых составляла 8–10 А, на частоте 50/60 Гц регистрировалось электрическое поле порядка 1 мкВ/м. Сделан вывод о том, что интенсивность излучения ЛЭП в околоземном пространстве оказывается выше интенсивности таких природных излучений, как шумановские резонансы и ионные свисты. При этом такая интенсивность продолжает нарастать, что связано с технологическим развитием земной цивилизации. Кроме излучения ЛЭП, в работе [2] теоретически рассмотрена генерация возмущения ЭМ поля в ионосфере, создаваемого установкой «ЗЕВС». Узкополосное ЭМ излучение с частотой 82 Гц от установки «ЗЕВС» регистрировалось в ионосфере как при пролете спутника DEMETER на высоте 660 км, так и спутника CSES на высоте около 500 км.

Наряду со спутниковыми наблюдениями развиваются и теоретические методы изучения данного явления. Так, в работе [1] было проведено численное моделирование излучения бесконечно протяженной ЛЭП с гармоническим током с частотой 50 Гц и амплитудой 10 А. Численным моделированием показано, что в ЛЭП несбалансированные токи интенсивностью ~10 А возбуждают электрическое поле с амплитудой ~1 мкВ/м, достаточной для обнаружения электрическими датчиками низкоорбитальных спутников в верхней ночной ионосфере. В работе [2] рассмотрена генерация возмущения электромагнитного поля в ионосфере установкой «ЗЕВС». Полученные расчетные значения амплитуды и поляризация ЭМ-отклика верхней ионосферы находятся в соответствии со свойствами излучения, зарегистрированного спутником DEMETER.

В данной работе рассмотрена модель распространения ЭМ-сигнала в ионосферу от наземного излучающего диполя электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2, расположенной на Бишкекском геодинимическом полигоне Научной станции РАН (Кыргызстан, Северный Тянь-Шань) и предназначенной для проведения режимных электромагнитных зондирований земной коры.

### **Электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2**

Электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2 расположена в центральной части Бишкекского геодинимического полигона и предназначена для глубинного зондирования земной коры [3], а также проведения специальных полевых экспериментов по активному электрическому воздействию на литосферу. Она включает в себя генераторную установку, которая осуществляет преобразование электрической энергии первичного источника в последовательность импульсов тока, и нагрузку, в качестве которой используется наземный диполь-излучатель длиной  $l = 4200$  м, ориентированный в направлении «север-юг». Амплитуда тока в источнике достигает  $I = 600$  А. Временные параметры последовательности импульсов тока, подаваемых в диполь, могут изменяться в широких пределах. Для решения вопроса о возможности проникновения электромагнитного возмущения от установки ЭРГУ-600-2 на высоты ионосферы была рассмотрена математическая модель источника электромагнитного возмущения и среды, в котором оно распространяется.

### **Математическая модель распространения электромагнитного сигнала в ионосферу от излучающего диполя установки ЭРГУ-600-2**

Была рассмотрена двухслойная плоскостная проводящая среда, состоящая из земной коры и атмосферы. Проводимость земной коры постоянна, а проводимость атмосферы зависит только от высоты над поверхностью Земли. Обе проводимости изотропны. В качестве модели проводимости атмосферы выбрана экспоненциальная зависимость. В качестве источника возмущения выбран горизонтально ориентированный сторонний ток, сосредоточенный на поверхности Земли. При расчетах использовалась система уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Были получены аналитические (в квадратурах) решения для распределений возмущений электрических и магнитных полей в земной коре и атмосфере. Предлагаемая модель не учитывает эффекта замагниченности ионосферной плазмы, который

начинает влиять на высотах более 70...80 км. Выше этой высоты поперечные компоненты электрического и магнитного полей переносятся вдоль направления геомагнитного поля без изменения. Можно предположить, что предлагаемая упрощенная модель описывает распространение электромагнитного возмущения до высот  $h_m \sim 70...80$  км, а на больших высотах возмущение по порядку величины такое же, как и на высоте  $h_m$ .

### Результаты численных исследований

Произведем расчеты компонент электрического поля. На рис.1 представлены результаты расчета радиальных распределений компонент электрического поля для частот 1 и 10 Гц. Результаты расчетов показывают, что амплитуда горизонтальных компонент поля на высоте 70 км достигает 1–10 мкВ/м, возрастая с ростом частоты. Это соответствует, по порядку величины, возмущениям от других источников электромагнитного загрязнения окружающей среды. Амплитуда вертикальной компоненты поля составляет сотые доли мкВ/м, что, по всей вероятности, сложно экспериментально зарегистрировать.

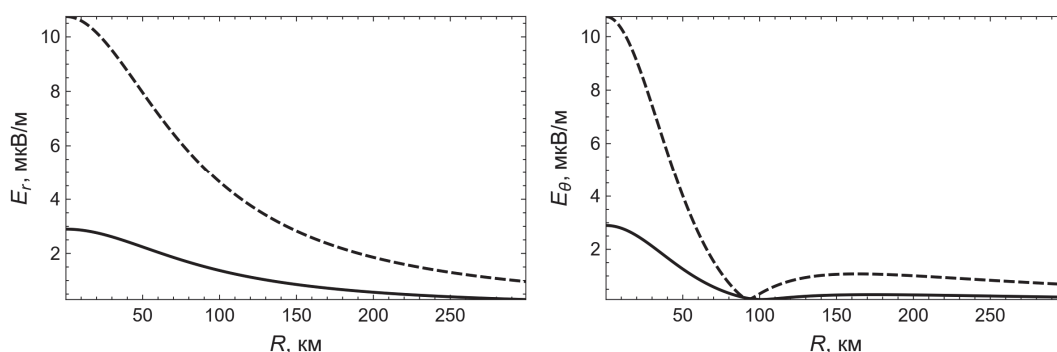


Рис. 1. Радиальные зависимости горизонтальных компонент электрического поля на высоте 70 км

На рис. 2 приведены результаты расчетов временной зависимости горизонтальной компоненты электрического поля, генерируемого периодической последовательностью импульсов тока в установке ЭРГУ-600-2 длительностью 3 с и частотами фронта и спада 0.06 и 0.02 с на высоте 70 км.

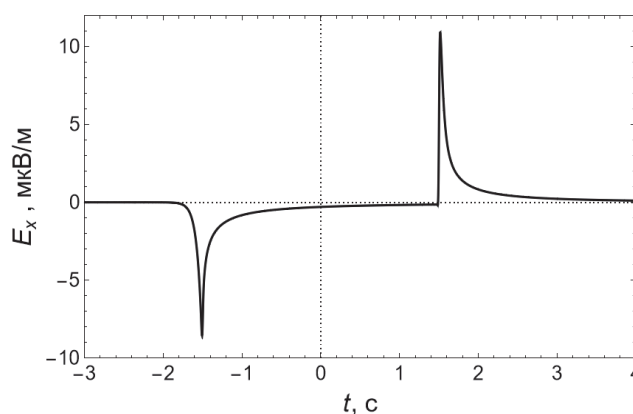


Рис. 2. Временная зависимость горизонтальной компоненты электрического поля, генерируемого периодической последовательностью импульсов тока

Результаты расчетов радиальной зависимости, усредненной по направлению абсолютной величины магнитного возмущения вблизи поверхности Земли для протяженного источника приведены на рис. 3. Точками отображены результаты измерений, полученные на сети магнетометров [4]. Наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетом и результатами наблюдений.

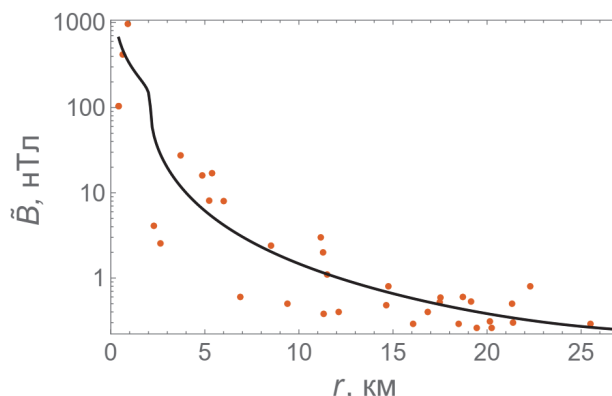


Рис. 3. Пространственное распределение магнитного возмущения на поверхности Земли

### Заключение

Результаты расчетов для монохроматического и импульсного периодического источников с параметрами, соответствующими установке ЭРГУ-600-2, показывают, что амплитуда электрического поля, возбуждаемого на высоте 70 км излучающим диполем установки может достигать 10 мкВ/м, а длительность его импульса – около 0.5–1.0 с. Данные параметры поля соответствуют возмущениям от других источников электромагнитного загрязнения окружающей среды (ЛЭП и «ЗЕВС»), зарегистрированных на спутниках DEMETER и CSES. Амплитуда возмущения магнитного поля на поверхности Земли на частоте 1 Гц и расстоянии 5–10 км от источника составляет до 5 нТл, что удовлетворительно согласуется с полевыми измерениями вариаций геомагнитного поля во время работы установки ЭРГУ-600-2, что свидетельствует о возможности использования предложенной упрощенной математической модели для оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды излучающими заземленными диполями.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственные задания ИЗМИРАН № 1021060808637-6-1.3.8, ОИВТ РАН № 075-00269-25-00, ИДГ РАН № №125012700824-4, НС РАН № 1021052806454-2-1.5.1).

### Список литературы

1. 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.
2. 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. Geophys. Res. – 2023. – Vol. 128. – e2023JA031590.
3. Имашев С.А., Рыбин А.К. Сейсмические и геоакустические отклики земной коры на зондирования мощными электрическими импульсами на территории Бишкекского геодинамического полигона // Наука и технологические разработки. – 2023. – Т.102. – № 2/3. – С. 63–88.
4. Лазарева Е.А., Имашев С.А. Вариации полного вектора геомагнитного поля во время пусков электроразведочной генераторной установки (ЭРГУ-600-2) // Сборник материалов XIII Международной конференции молодых ученых и студентов. Бишкек, 28–30 апреля 2021 г. 2021. – Бишкек: ФГБУН НС РАН в г. Бишкеке. – С. 107–112.