

ПЕЛЕНГАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕРХСЛАБОГО КНЧ/ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

И.А. Ряховский, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, Ю.В. Поклад

В 2012–2013 годах в экспериментах по искусственной модификации ионосферы мощной КВ волной на нагревном стенде EISCAT HEATER (Тромсе, Норвегия) были проведены дистанционные измерения электромагнитных сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона. Использование новой высокочувствительной магнитометрической аппаратуры позволило зарегистрировать сигналы амплитудой в единицы фемтотесла на расстояниях до 2000 км от источника в нескольких измерительных пунктах. Полученные результаты позволили предложить и апробировать методику пеленгации ионосферных источников сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона с использованием наземных измерительных комплексов.

Введение

Регистрация и пеленгация источников сверхслабых ионосферных сигналов КНЧ/ОНЧ диапазонов частот, имеющих природное и антропогенное происхождение, является важным инструментом в исследовании молний, спрайтов, эльфов, а также эффектов, вызванных экспериментами по искусственной модификации ионосферы с применением нагревных стендов. Именно такие эксперименты были использованы как контролируемый источник КНЧ/ОНЧ сигналов. Генерация таких сигналов в нагревных экспериментах обеспечивается амплитудной низкочастотной модуляцией мощного КВ излучения [Getmantsev et al., 1974]. Эффективность генерации низкочастотных сигналов (НЧ) сигналов была показана во многих экспериментах на нагревных стендах Сура, HAARP, EISCAT [Зецер и др., 2008]. Сложность регистрации и изучения генерируемых в нагревных экспериментах НЧ сигналов на значительных расстояниях от источника обусловлена их малой амплитудой. Именно по этой причине пеленгация ионосферных источников КНЧ/ОНЧ излучения является сложной задачей [Bart et al., 1991; Rяхovskiy et al., 2014; Гаврилов и др., 2015; Гаврилов и др., 2007]. Используемые в настоящей работе измерительные данные получены с применением сверхчувствительных измерительных комплексов «Плутон» и «Вистлер». В статье представлены результаты регистрации КНЧ/ОНЧ сигналов и пеленгации их источника во время нагревных кампаний 2012–2013 годов.

Постановка эксперимента

Одной из целей нагревных кампаний на стенде EISCAT heating (69.68 с.ш., 19.21 в.д.) в октябре 2012 и феврале 2013 годов было исследование влияния трасс распространения электромагнитных сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона на их амплитудно-фазовые характеристики. Для решения этой задачи проводилась синхронная регистрация в трех измерительных пунктах, расположенных на различных азимутах и расстояниях от источника. Измерения генерируемого стендом КНЧ/ОНЧ излучения выполнялись в ходе координированных наблюдений в гео-

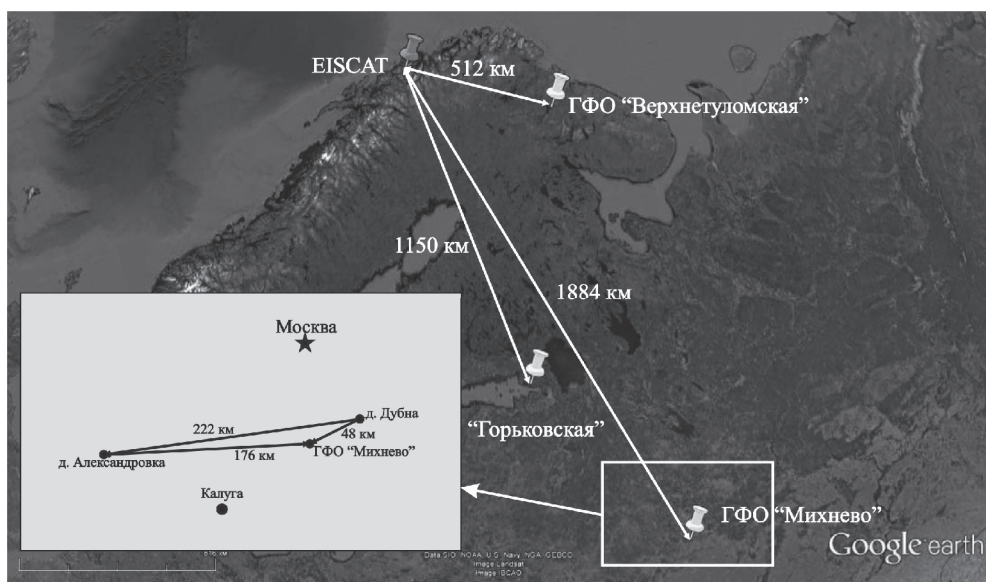


Рис. 1. Схема расположения измерительных пунктов во время экспериментов в октябре 2012 и феврале 2013 годов

физических обсерваториях (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН, «Горьковская» ПГИ РАН и «Верхнетуломская» ААНИИ Росгидромета, расположенных на расстояниях от 500 до 1900 км от нагревного стенда (рис. 1). Для регистрации сигналов использовались сверхчувствительные магнитометрические комплексы «Плутон» и «Вистлер». Активные рамочные антенны комплексов имеют чувствительность 0,4–0,5 фТл√Гц в полосе от 800 до 30000 Гц. Сигнал с антенн оцифровывался с помощью десятиканального двадцати четырех разрядного регистратора ADU-07 Metronix. Точность временных привязок во время измерений обеспечивалась GPS приемником и составляла 30 нс. Во всех измерительных пунктах оси антенн ориентировались в направлении магнитный Север-Юг (канал Hx) и Запад-Восток (канал Hy). Для выделения сигнала записи волновых форм фильтровались с помощью цифрового фильтра с полосой 0,01 Гц. Набег фаз монохроматического сигнала связан с расстоянием от источника до измерительных пунктов следующим соотношением:

$$\delta\varphi = \frac{F}{c}(L_1 - L_2)2\pi,$$

где F – частота сигнала, c – скорость света, L_1 и L_2 – расстояния до источника. Угол между направлением на источник сигнала и нормалью к линии между приемными пунктами определяется соотношением:

$$\arcsin(\alpha) = \frac{c \cdot \delta\varphi}{2\pi FL_0},$$

где L_0 – расстояние между приемными пунктами. Данное выражение справедливо если $L_0 \ll (L_1 \text{ и } L_2)$

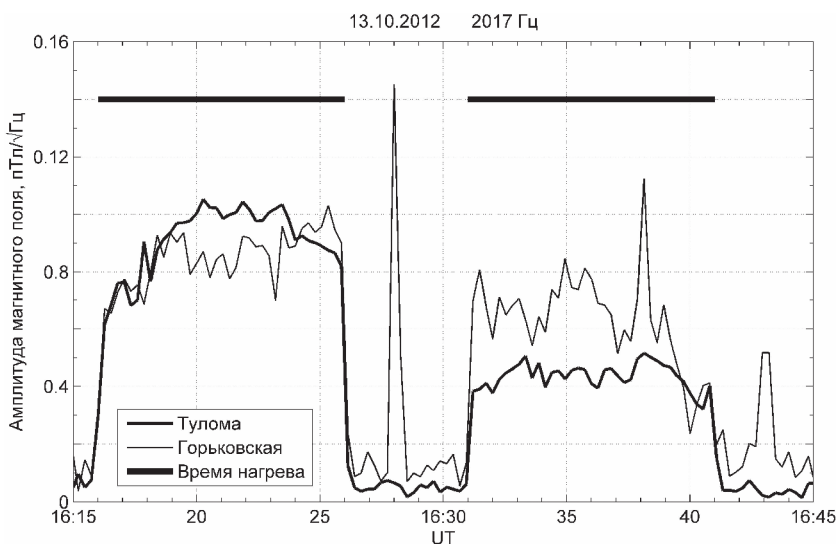


Рис. 2. Амплитуды сигнала, зарегистрированного от нагревного стенда EISCAT 13 октября 2012 года на частоте 2 кГц.

Тонкая и толстая кривые – измерения в обсерваториях "Горьковская" и "Верхнетуломская" соответственно. Горизонтальными линиями показано время нагрева

Результаты

13 октября 2012 г. стенд работал в режиме амплитудной модуляции нагревного КВ излучения с частотой 2017 Гц. Воздействие на ионосферу проводилось в режиме: 10 минут – нагрев, 5 минут – пауза. В период с 16:15 до 16:45 UT удалось зарегистрировать сигнал на частоте 2017 Гц одновременно в двух измерительных пунктах: в Горьковской и Верхнетуломской обсерваториях (рис. 2).

Несмотря на то, что расстояние от стенда до обсерватории "Верхнетуломская" примерно в 2 раза меньше, чем до "Горьковской", в период с 16:16 до 16:26 UT амплитуды сигналов, принятых на этих станциях, близки, а с 16:31 до 16:40 UT сигнал в «Горьковской» даже больше по амплитуде, чем сигнал в «Верхнетуломской». Анализ фазовых характеристик сигналов, принятых в "Верхнетуломской" и "Горьковской", показал, что их изменение имеют разные тренды (рис. 3). В период с 16:16 до 16:26 UT фаза сигнала в «Верхнетуломской» имеет тенденцию к росту, а в «Горьковской» – имеет тенденцию к понижению. Причиной такого поведения фаз может являться влияние на амплитудно-фазовые характеристики сигналов условий на трассах их распространения, которые существенно различаются при большом расстоянии между приемными пунктами.

Фазы принятых сигналов отличаются примерно на 1,5 радиан, что соответствует четверти длины волны излучения (на частоте 2017 Гц длина волны составляет 38 км). В таких условиях использование фазового метода для пеленгации сигнала невозможно. Влияния трасс распространения на характеристики сигналов могло бы быть существенно снижено, если бы трассы находилась в близких

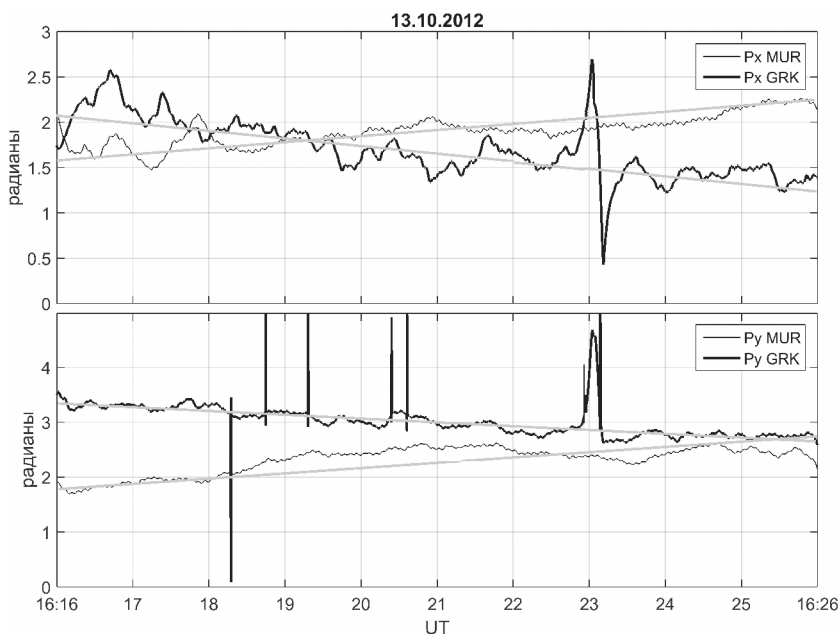


Рис. 3. Изменение фазы модуляционного сигнала на частоте 2017 Гц по результатам двухкомпонентных измерений в обсерваториях "Верхнетуломская" и "Горьковская". Верхняя панель – измерение фаз сигналов по каналам Hx, нижняя панель – по каналам Hy

гелиогеофизических условиях. Такая ситуация реализуется на малых базах между измерительными пунктами.

Для оценки возможности проведения пеленгации сверхслабых килогерцовых сигналов на короткой базе в нагревной кампании в феврале 2013 г. проводилась синхронная регистрация сигналов, вызванных работой стенда в ГФО «Михнево», и в выносных измерительных пунктах вблизи деревень Александровка и Дубна (рис. 1). Нагревная кампания продолжалась 4 дня. 21 февраля с 17:05 до 17:07 UT сигнал на частоте модуляции нагревной КВ волны (2016,97 Гц) был зарегистрирован во всех трех измерительных пунктах. Вариации амплитуд и фаз сигналов, принятых в трех измерительных пунктах, показаны на рисунках 4 и 5.

Из графиков видно, что во время нагрева (с 17:04 до 17:07 UT) фазы сигналов, принятых на модуляционной частоте в трех измерительных пунктах, ведут себя подобным образом. При отсутствии нагрева фазы сигнала меняются хаотично.

На рис. 6 показан результат сравнения измеренной разности фаз в сигналах на разных пунктах с результатом расчета набега фаз с учетом расстояний между измерительными пунктами. Так, разница в расстоянии от источника до измерительных пунктов в Александровке и Дубне составляла 60,5 км. Расчетный набег фаз между сигналами в Александровке и Дубне от стенда EISCAT должен составлять 2,52 радиана. Среднее экспериментальное значение набега фаз с 17:05 до 17:07 составило 2,46 радиана, что близко к теоретической оценке.

По полученным данным для того же интервала времени был проведен расчет азимута на источник из измерительного пункта Дубна в период с 17:05 до 17:09 UT. Сравнение экспериментально определенного азимута с истинным значением

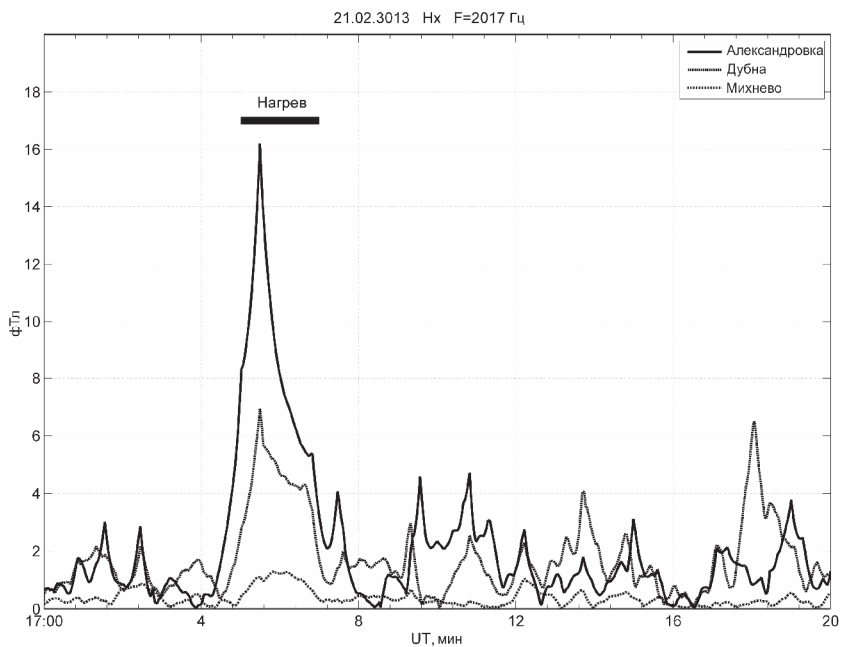


Рис. 4. Амплитуды сигналов, принятых на частоте 2017 Гц в трех пунктах измерения.
Горизонтальной линией показан сеанс нагрева.

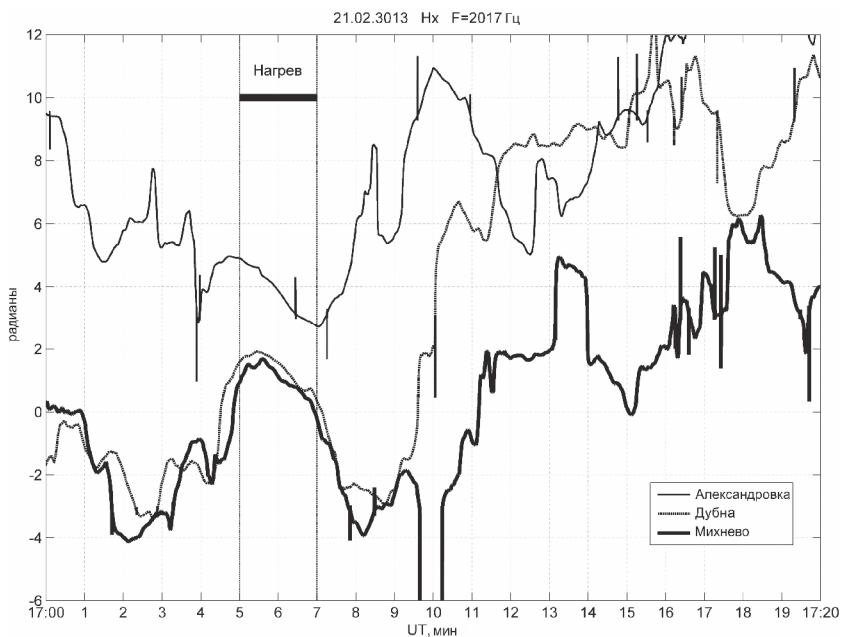


Рис. 5. Фазы сигналов, принятых на частоте 2017 Гц, в трех пунктах измерения.
Горизонтальной линией показан сеанс нагрева

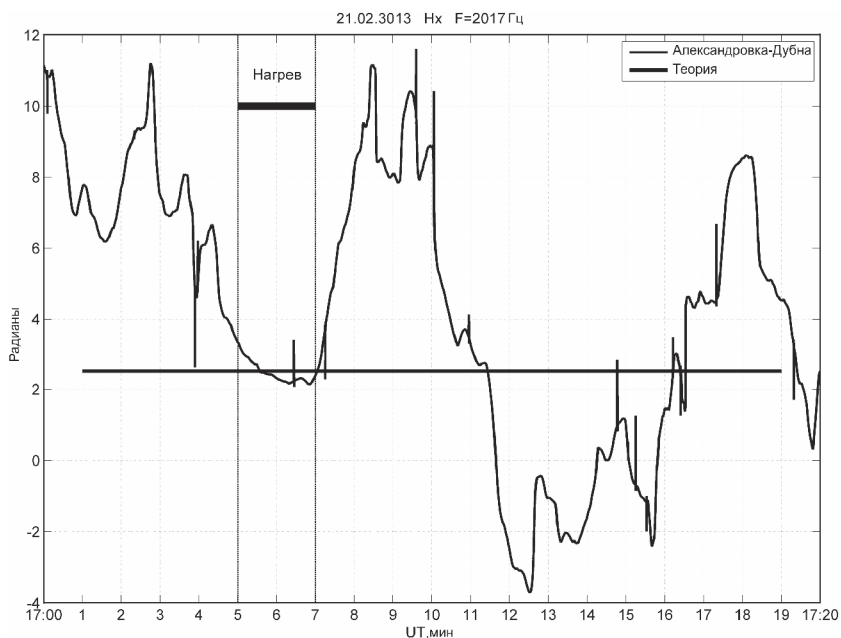


Рис. 6. Изменение набега фаз сигналов от станда EISCAT между пунктами Александровка и Дубна.

Черной линией показан расчетный набег фаз между данными пунктами

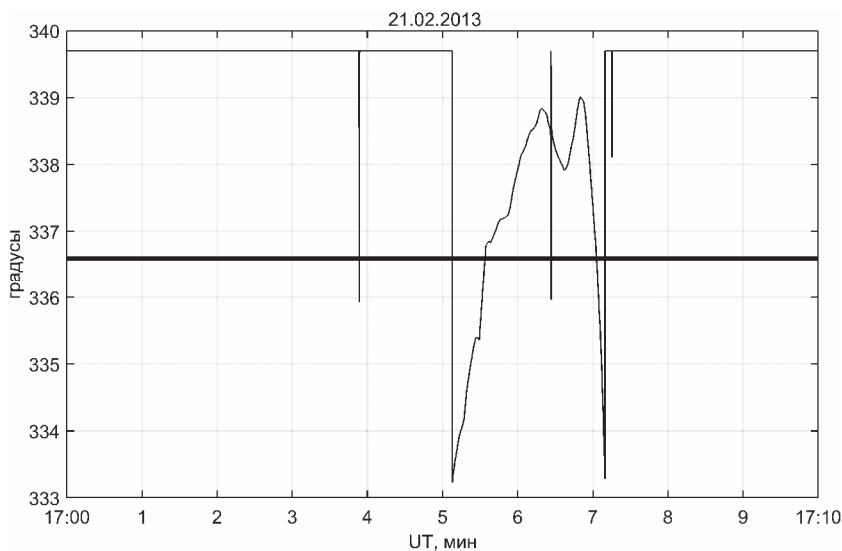


Рис. 7. Азимут на источник EISCAT из измерительного пункта «Дубна».

Толстая горизонтальная линия – действительный азимут, тонкая кривая – азимут, рассчитанный по результатам фазовых измерений в эксперименте

показывает, что ошибка в определении азимута на источник составляла от 2 до 3,5° (рис. 8) – точность достаточная для многих приложений.

Выводы

Применение специально разработанных сверхчувствительных магнитометрических комплексов «Плутон» и «Вистлер» позволило во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы на нагревном стенде EISCAT в 2012–2013 годах зарегистрировать сигналы на модуляционных частотах (амплитудой порядка единиц фТл) в КНЧ/ОНЧ диапазоне на расстоянии около 2000 км от источника.

Анализ результатов синхронных измерений, проведенных в находящихся на значительных расстояниях друг от друга измерительных пунктах, выявил существенные различия амплитудно-фазовых характеристик сигналов, обусловленные изменением гелиогеофизических условий в районе нагрева и на трассах распространения сигнала.

Использование для лоцирования источника сигналов, зарегистрированных в измерительных пунктах, расположенных на расстояниях от 50 до 200 км друг от друга, позволило минимизировать влияние трасс распространения сигналов и показать возможность пеленгации ионосферного источника сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона с приемлемой для решения многих задач точностью.

Разработанные в ходе проведения экспериментов методики и аппаратура могут быть использованы для обнаружения и пеленгации КНЧ/ОНЧ сигналов от ионосферных источников естественного и искусственного происхождения.

Литература

Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М. Удаленная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения, вызванного экспериментами по искусственной модификации ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 5, № 4. С. 466-472. DOI: 10.7868/S0016794015040045.

Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Киселев Ю.Н., Козлов С.И. Активные воздействия на околоземную среду // Модели космоса. Т. 2. Гл. 3.2. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 855-888.

Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Благовещенская Н.Ф. Активные эксперименты: магнитосферно-ионосферно-атмосферное воздействие // Плазменная гелиогеофизика. Гл. 9.6. М.: Наука, 2008.

Barr R., Stubbea P., Kopka H. Long-range detection of VLF radiation produced by heating the auroral electrojet // Radio Sci. 1991. Vol. 26, N 4. P. 871-879.

Getmantsev G.G., Zuikov N.A., Kotik D.S., Mironenko L.F., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Sazonov Yu.A., Trakhtengerts V.Yu., Eidman V.Ya. Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma // JETP Lett. 1974. V. 20. P. 101-102.

Ryakhovskiy I.A., Gavrilov B.G., Poklad Y.V., Zetzer J.I., Blagoveshenskaya N.F., Rietveld M.T. Experimental investigation of ULF/VLF radio wave generation and propagation in the upper atmosphere and ionosphere during EISCAT heating experiment in 2012: thesis on COSPAR, Moscow 2014.