

УДК: 550.388.2

**Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М.**  
*Институт динамики геосфер РАН (г. Москва)*

## **МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХСЛАБЫХ СИГНАЛОВ КНЧ/ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПЕЛЕНГАЦИЯ ЕГО ИСТОЧНИКОВ**

*Аннотация.* Регистрация сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона и пеленгация их источника возможны при применении специализированной высокочувствительной аппаратуры. В Институте динамики геосфер РАН были разработаны магнитометрические комплексы «Плутон» и «Вистлер», обладающие рекордно низким уровнем собственных шумов, большим динамическим диапазоном и точностью временных привязок на уровне 30 нс. Использование данной аппаратуры и собственных методик регистрации позволили зарегистрировать сверхслабые сигналы КНЧ/ОНЧ диапазона, а также запеленговать источник на расстоянии порядка 2000 км.

*Ключевые слова:* сверхслабые электромагнитные сигналы, магнитометрические измерения, пеленгация источников излучения.

**I. Ryakhovskiy, Yu. Poklad, V. Ermak**  
*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy  
of Sciences, Moscow*

## **METHOD FOR DETECTING ULTRA-WEAK SIGNALS OF ELF/VLF RADIATION AND LOCATION OF THEIR SOURCES**

*Abstract.* Detection of ultra-weak signals in the ELF/VLF range and location of their source are possible when use is made of specialized highly sensitive equipment. 'Pluton' and 'Whistler' magnetometric installations with record-low intrinsic noise, wide dynamic range and accuracy of temporary bindings at 30 ns are developed at the Institute of Geosphere Dynamics, RAS. The utilization of this equipment and the intrinsic methods of registration have made it possible to detect ultra-weak signals in the ELF/VLF range and to locate the source at a distance of about 2000 km.

*Keywords:* ultra-weak electromagnetic signals, magnetometric measurements, location of radiation sources.

Сложность приема и пеленгации сверхслабых электромагнитных сигналов крайне низкочастотного (КНЧ: от 3 до 3000 Гц) и очень низкочастотного (ОНЧ: от 3 до 30 кГц) диапазо-

нов связана с большим количеством локальных техногенных шумов (промышленные сети, импульсные блоки питания, бесперебойники), излучающих в том же диапазоне частот. Применение высокочувствительной аппаратуры с большим динамическим

© Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М., 2014.

диапазоном требует особого внимания при выборе мест регистрации с наименьшим уровнем помех.

Для магнитометрических измерений в КНЧ/ОНЧ диапазонах используется два типа датчиков: магнитометры и рамочные антенны. В магнитометрах используются сердечники с высокой магнитной проницаемостью. Это позволяет сделать их компактными и при размещении избежать различных внешних нагрузок – ветровых и вибрационных, которые могут привести к паразитным сигналам на датчике. Однако из-за большого количества витков такие приемники обладают высоким омическим сопротивлением, что приводит к росту тепловых шумов на входе предусилителя. У рамочных антенн, за счет малого количества витков и относительно большого сечения провода, сопротивление датчика можно сделать практически «нулевым», что резко снижает тепловые шумы на входе предусилителя. С другой стороны, из-за больших размеров рамки возможно возникновение собственных колебаний конструкции за счет внешних нагрузок, как правило, ветровых, что может приводить к паразитным сигналам.

Институтом динамики геосфер (ИДГ РАН) были разработаны магнитометрические комплексы «Плутон» и «Вистлер», обладающие рекордно низким уровнем собственных шумов и большим динамическим диапазоном, которые позволили зарегистрировать сигналы с амплитудами едини-

цы фТл на расстоянии порядка 2000 км от источника.

### **Постановка эксперимента и измерительная аппаратура**

Эксперименты проводились в 2012 и 2013 гг. на нагревном комплексе (Heater) EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association), расположенном в 15 км южнее города Тромсе (Норвегия, в точке с координатами 69.68 с.ш., 19.21 в.д.) Целью эксперимента являлось исследование явлений, вызванных излучением мощных высокочастотных (ВЧ) радиоволн [1, с. 1]. По предложению ИДГ РАН в программу эксперимента были введены задачи, связанные с исследованием генерации и распространения сигналов ОНЧ/КНЧ диапазона, вызванных воздействием на ионосферу мощного ВЧ-излучения с модуляцией на частотах 0.5, 2.01, 3.01 и 6.02 кГц, а также обработка методики пеленгации ионосферного источника фазовыми методами. Измерения проводились в геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН и на измерительных пунктах вблизи д. Александровка и д. Дубна (схему расположения измерительной аппаратуры во время экспериментов 2012 и 2013 гг. см. на рис. 1). Расстояние между измерительными пунктами не превышало 220 км, то есть измерения проводились в близких гелиогеофизических условиях. Расстояние от измерительных пунктов до источника составляло порядка 2000 км.

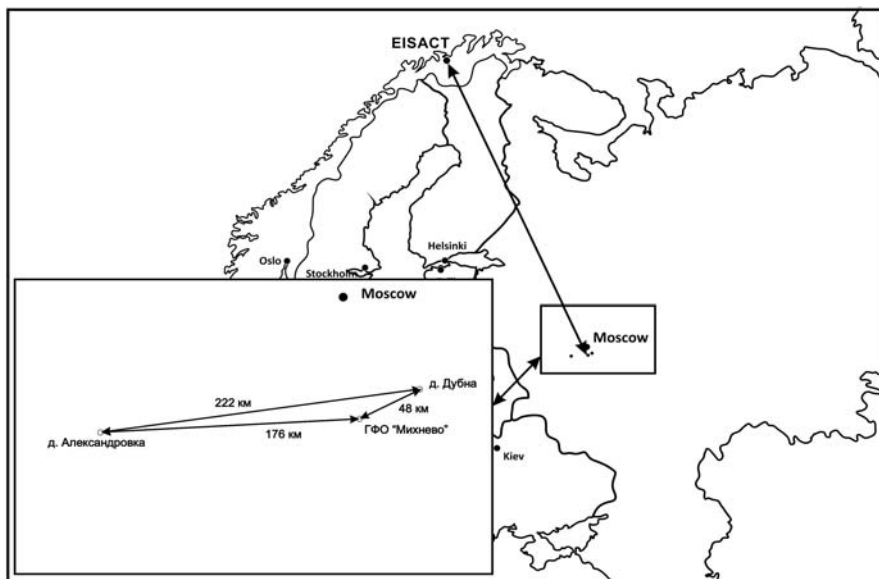


Рис. 1. Схема расположения стенда EISACT и измерительных пунктов во время экспериментов 2012-13 гг.

В качестве измерительной аппаратуры использовались магнитометрические комплексы «Плутон» и «Вистлер», позволяющие проводить непрерывные синхронные измерения в ВЧ и КНЧ/ОНЧ диапазонах. При создании низкочастотной части комплекса учитывался

опыт создателей системы AWESOME [2, с. 3]. В качестве датчиков в магнитометрических комплексах использовались активные рамочные антенны (основные характеристики магнитометрических комплексов см. в табл. 1).

Таблица 1

**Основные характеристики используемых в эксперименте магнитометрических комплексов**

Наименование	Чувствительность,	Частотный диапазон, Гц
«Вистлер»	$\frac{\Phi T_l}{0.4 \sqrt{\Gamma u}}$	800-100000
«Плутон»	$\frac{\Phi T_l}{0.5 \sqrt{\Gamma u}}$	800-30000

В измерительных комплексах использовался цифровой регистратор (ADU-07, производство фирмы «Metronix», характеристики см. табл. 2), состоящий из основной платы, на которой смонтированы источники питания, буферной памяти и внешних интерфейсов USB. К плате подключаются аналого-цифровые преобразова-

тели (АЦП – 10 шт), калибровочный генератор и GPS-модуль (для синхронизации времени с точностью 30 нс и определения местоположения измерительного комплекса). Управление и снятие информации с платы производится с помощью промышленного одноплатного маломощного компьютера, работающего под ОС «Linux».

Таблица 2

### Основные характеристики используемого в эксперименте цифрового регистратора

Частотный диапазон	до 250 кГц
Количество каналов	От 1 до 10.
Процессор	Маломощный 32 битный компьютер.
Точность временной привязки	30 нс
Вес	6.5 кг
Питание	9В ... 18В
Низкочастотные каналы (НЧ)	5 НЧ каналов с частотой опроса до 2000 Гц
Высокочастотные каналы (ВЧ)	5 ВЧ каналов с частотой опроса до 250 кГц

Управление регистратором и снятие данных производится через WEB-интерфейс по линии Ethernet с пропускной способностью 100 Mbit/s. С помощью WEB-интерфейса можно установить рабочие каналы, частоту оцифровки по каждому из них, задать план работы любого канала, установить нужные фильтры, посмотреть состояние аккумуляторов и объем свободного места на флеш-диске.

Во время поведения полевых измерений выбирались места с наименьшим уровнем шумов, оси датчиков ориентировались в направлениях: магнитный Север-Юг, Восток-Запад.

### Результаты измерений

Разработанная аппаратура и методики измерений позволили надежно зарегистрировать сигналы (от 0.5 до 6 кГц), генерируемые во время работы стенда EISACT на расстоянии порядка 2000 км от источника (результаты регистрации сигнала по каналам Нх на частоте 2017 Гц в ГФО «Михнево» 20 февраля 2012 г. см. на рис. 2). Стенд EISCAT работал в режиме: 5 минут – нагрев, 5 минут – пауза. Амплитуды сигналов, записанных по каналу Нх, составляют от 1 до 4 фТл. В результате этой нагревной кампании была экспериментально показана возможность регистрации сверхслабых сигналов КНЧ/

ОНЧ диапазона на расстоянии около 2000 км от источника.

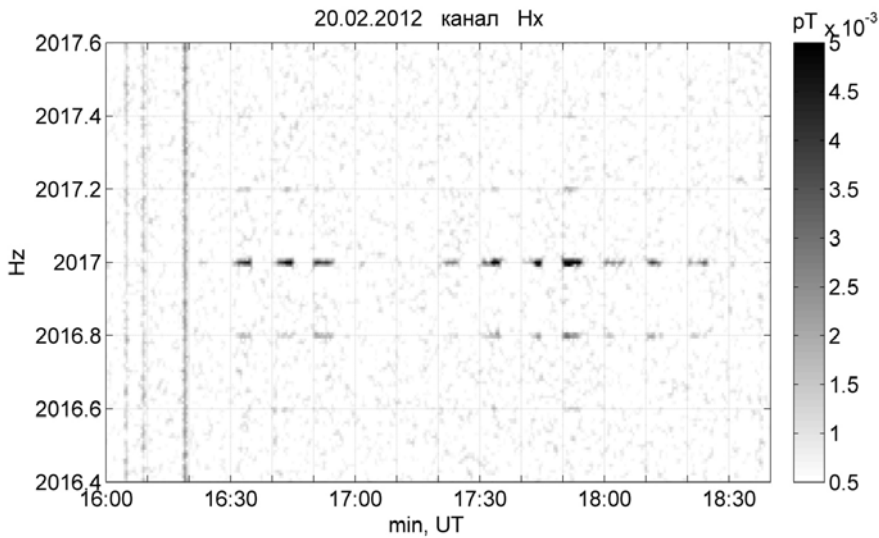


Рис. 2. Регистрация сигналов на частоте 2017 Гц, записанные по каналу Нх - в период с 16:00 до 18:40 UT 20 февраля 2012 г.

В ходе экспериментов по искусственной модификации ионосферы также решалась задача пеленгации ионосферного источника КНЧ/ОНЧ излучения. Для исключения влияния на результаты измерений отличающихся условий на трассах распространения сигналов измерения проводились в трех недалеко разнесенных друг от друга измерительных пунктах: д. Александровка, д. Дубна и ГФО Михнево. Сигнал на частоте 2016.97 Гц был за-

регистрирован с 17:05 ч до 17:07 ч во всех трех измерительных пунктах (изменение во времени амплитуды сигнала на частоте 2017 Гц в полосе 0.01 Гц см. на рис. 3). Во время воздействия на ионосферу электромагнитного излучения характер изменения фаз сигналов, принятых на разных измерительных пунктах на данной частоте, одинаков, в то время, как при отсутствии сигналов на модуляционной частоте фаза сигналов меняется хаотично (рис. 4).

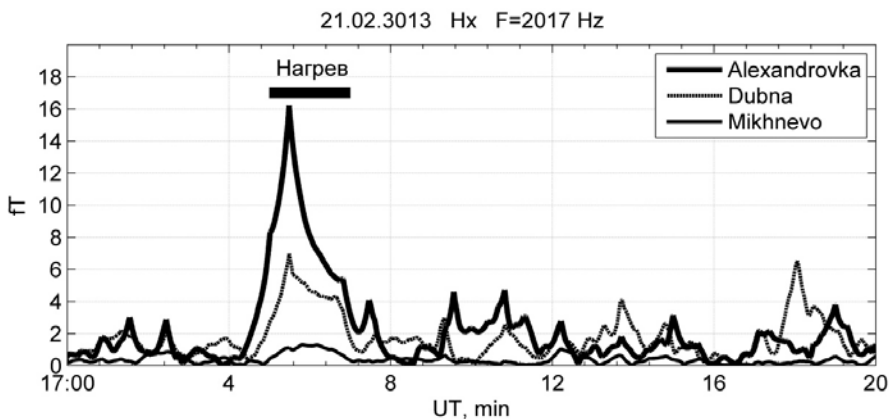


Рис. 3. Амплитуды сигналов, зарегистрированные на частоте 2017 Гц в трех точках.

Горизонтальной линией показано время нагрева в период с 17:05 до 17:07.

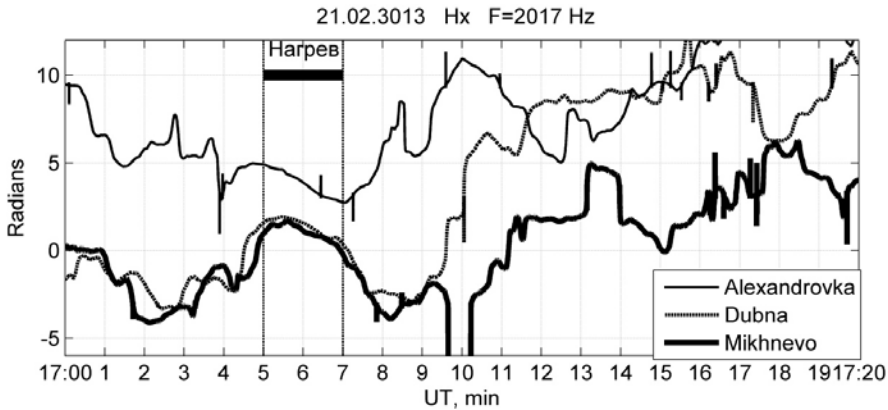


Рис. 4. Изменение фазы сигналов, записанных в трех измерительных пунктах. В период времени 17:05-17:07 (показан горизонтальной линией), когда был включен нагрев, фазы сигналов ведут себя одинаково.

По оценкам, разность набега фаз между пунктами д. Александровка и д. Дубна от стенда EISCAT должна составлять 2.52 радиана. Экспериментально полученное значение набега фаз с 17:05 ч до 17:07 ч составило 2.46 радиана (рис. 5). Отклонение

от истинного азимута, рассчитанное по этому набегу фаз, составляет  $\pm 1.5$  градуса. Таким образом, результаты измерений показали возможность пеленгации ионосферного источника КНЧ/ОНЧ излучения на малых базах фазовыми методами.

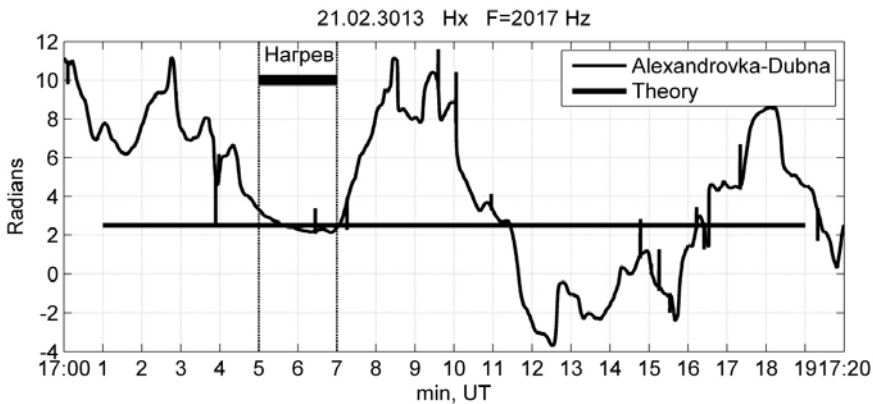


Рис. 5. Разность набега фаз между д. Дубна и д. Александровка, черная прямая линия – расчетный набег фаз, черная кривая – набег фаз, полученный в ходе эксперимента.

### Выводы

Разработанная аппаратура и методики регистрации позволили за-

регистрировать КНЧ/ОНЧ сигналы, генерируемые во время нагревных экспериментов на стенде EISCAT, в диапазоне частот 0.5-6 кГц на рас-

стоянии около 2000 км от источника сигнала. Амплитуда принятых сигналов составляет единицы фТл. Анализ результатов синхронных измерений, проведенных в пространственно распределенных измерительных пунктах, позволил разработать методику пеленгации ионосферных источников КНЧ/ОНЧ диапазона фазовыми методами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Blagoveshchenskaya N.F. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / Blagoveshchenskaya N.F., Rietveld M.T. et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – V. 38. – P. 1-7.
2. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception With the AWESOME Instrument // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing.* – 2010. – vol. 48 (№ 1). – P. 3-17.