



**"Опыт проектирования и использования высокочувствительных
индукционных**

**магнитных преобразователей для регистрации электромагнитных полей от
естественных и искусственных источников низкочастотных сигналов"**

**"Design and usage of high sensitive search coils magnetometers for
measurements of natural and stimulated low-frequency electromagnetic signals"**

**Поляков¹ С.В., Резников¹ Б.И., Шлюгаев¹ Ю.В., Щенников¹ А.В.,
Копытенко^{2,3} Е.А., Самсонов Б.В.³**

ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, svp@nirfi.sci-nnov.ru

СПБФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, e.kopytenko@gmail.com

ООО «ВЕГА», Санкт-Петербург, boris.samsonov@vega-geophysics.com

Всероссийский (с международным участием) научно-практический семинар.

Апатиты, 17-20 февраля 2014 г.

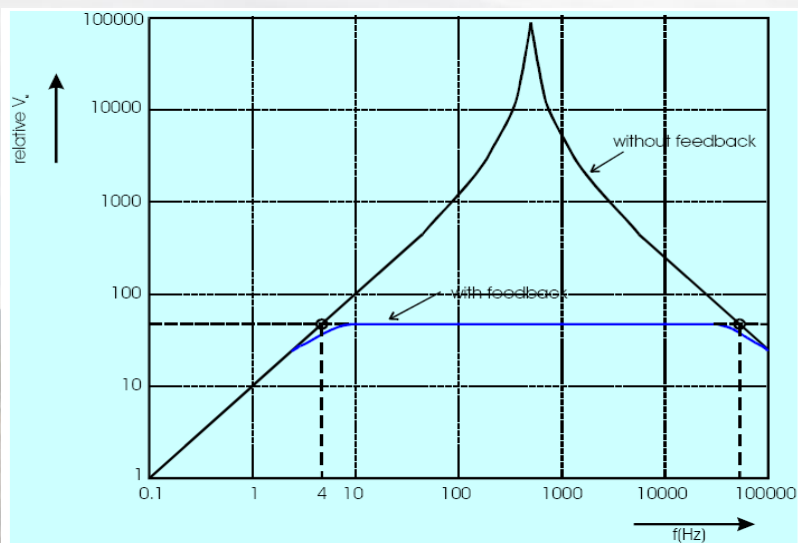
«Взаимодействие Электромагнитных Полей контролируемых Источников СНЧ-диапазона с ионосферой и Земной корой»

Апатиты, 17-20 февраля 2014 г.



1. лучшие образцы индукционных магнитных преобразователей
2. основные особенности конструкции
3. методы тестирования
4. примеры использования

Датчик MFS-06

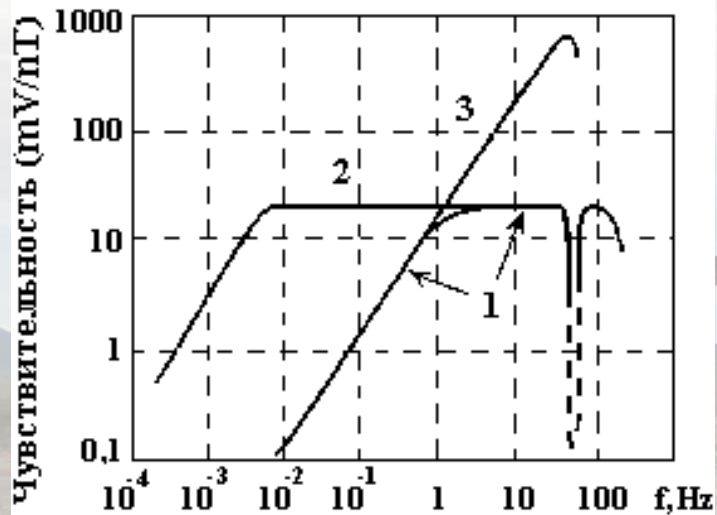


- Широкий частотный диапазон **0.00025 Hz 10 kHz**
- Высокая линейность преобразования
- Сверхнизкие шумы на низких частотах
- Стабильность передаточной функции из-за наличия отрицательной обратной связи по полю
- Возможность проведения внутренней калибровки

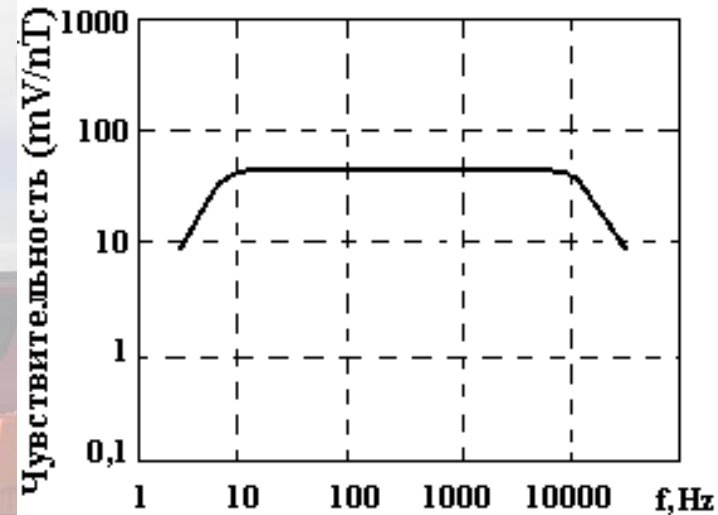


Датчики семейства LEMI (Украина)

LEMI-102



LEMI-108



- Высокая чувствительность
- Широкий частотный диапазон
- Переключаемый тип АЧХ
- Подавление помех на частоте 50 (60) Гц



PHOENIX Geophysics Limited

3781 Victoria Park Avenue, Unit 3

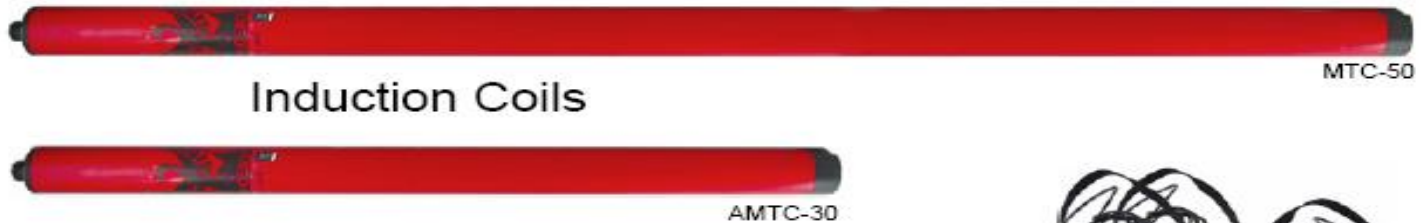
Toronto, ON, Canada M1W 3K5

www.phoenix-geophysics.com

☎: +1 (416) 491-7340

☎: +1 (416) 491-7378

✉: mail@phoenix-geophysics.com

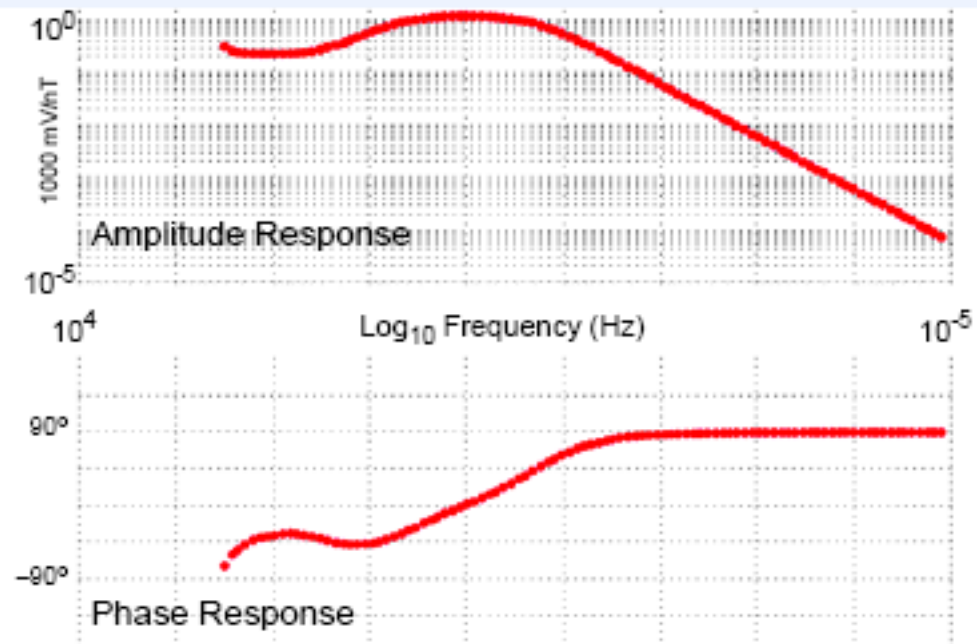


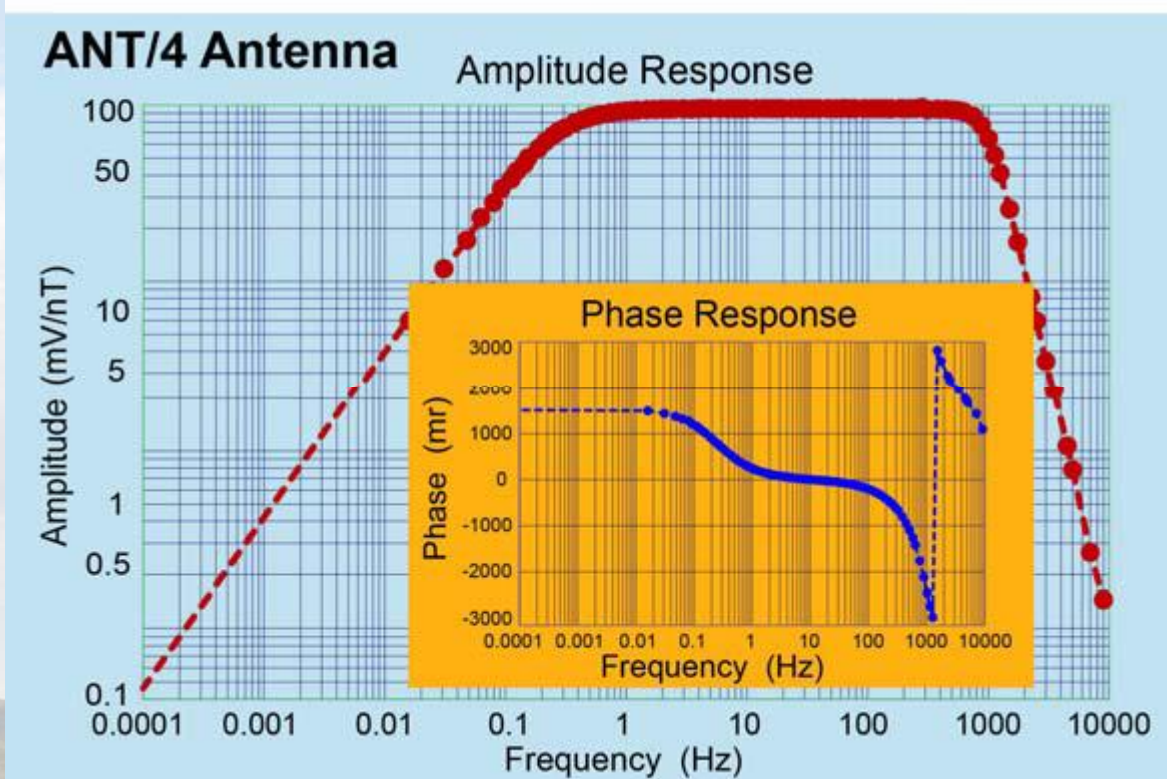
- • Высокая чувствительность на низких частотах
0.00002 Гц до 400 Гц

- • Возможность проведения внутренней калибровки

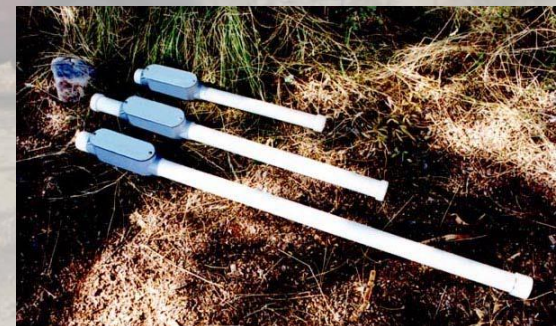
Недостатки

- • Отсутствие отрицательной обратной связи по полю





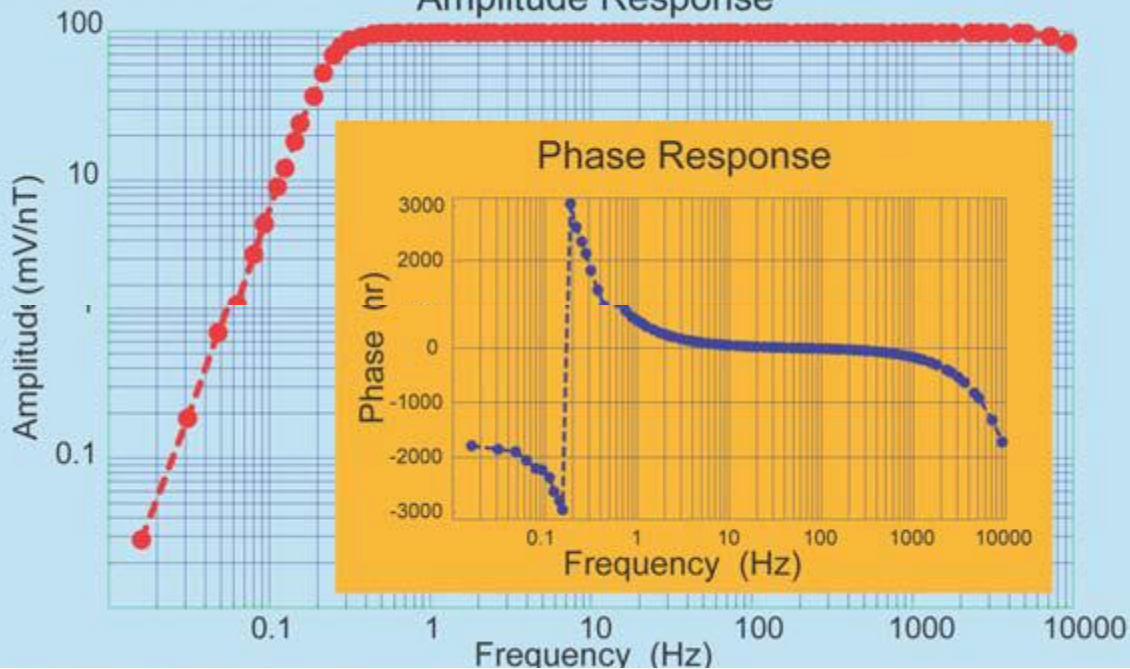
Length: 138.0 cm (54.0 in)
Diameter: 4.8 cm (1.875 in)
Weight: 6.2 kg (13.5 lb)
Frequency Range: 0.0001 – 1000 Hz
Sensitivity in Passband: 100 mV/□ (100 mV/nT)
Noise Level:
100 fT per Hz at 1 Hz
20 fT per Hz nominal > 1 Hz





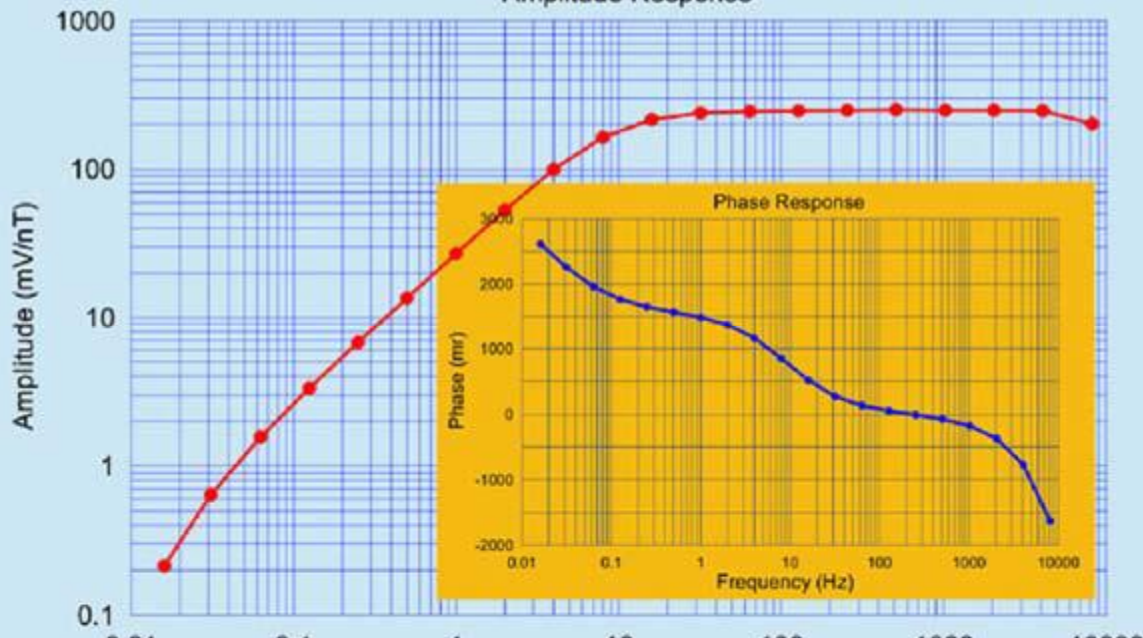
ANT/5 Antenna

Amplitude Response



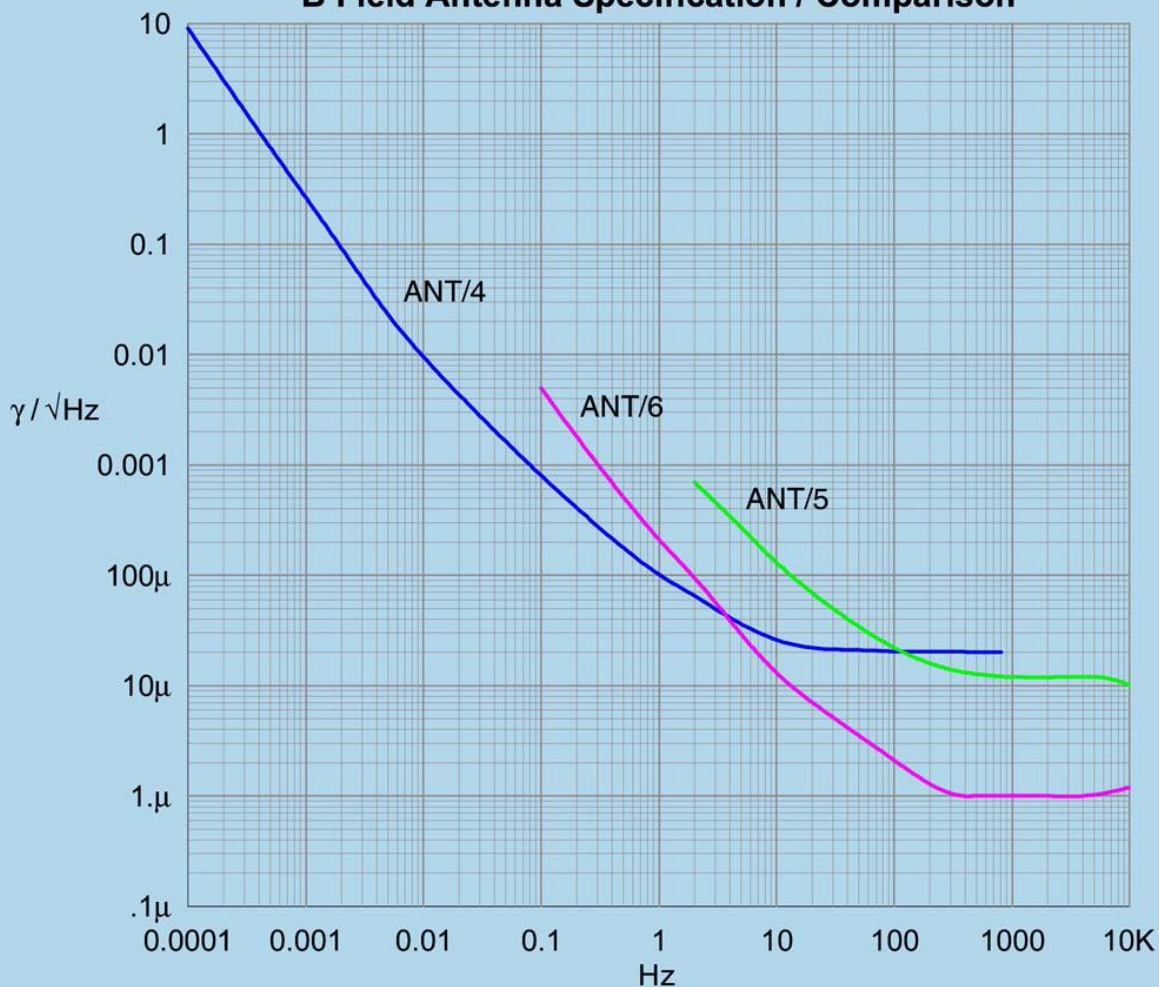
ANT/6 Antenna

Amplitude Response





B Field Antenna Specification / Comparison



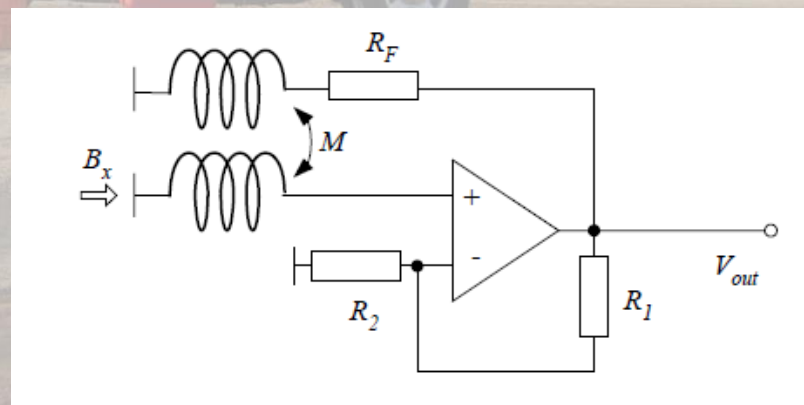
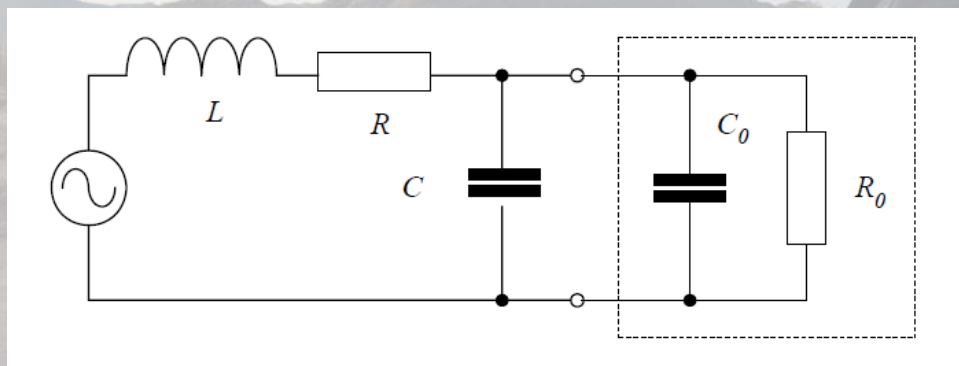
Сравнение шумовых характеристик датчиков
Zonge: ANT/4, ANT/5, ANT/6



	Частотный диапазон	Шумы датчика на частоте 0,01 Гц нТл/Гц ^{1/2}	Шумы датчика на частоте 1 Гц нТл/Гц ^{1/2}	Шумы датчика на частоте 1000 Гц нТл/Гц ^{1/2}
MFS-06	0.0002Hz – 10 kHz	10 ⁻²	10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁷
MFS-07	0,001Гц 50 кГц	3 10 ⁻²	3 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁷
MTC -50	0,0002Гц – 400 Гц	10 ⁻²	2 10 ⁻⁴	- . -
AMTC -30	1 Гц 10 кГц	- . -	3 10 ⁻³	2 10 ⁻⁶
ANT/4	0,0001Гц-1кГц	10 ⁻²	10 ⁻⁴	2 10 ⁻⁵
ANT/6	0,1 Гц – 10 кГц	- . -	2 10 ⁻⁴	10 ⁻⁶
BF-4	0,001Гц 700 Гц	10 ⁻²	10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁵
BF-10	0,1 Гц – 10 кГц	10 ⁻¹	2 10 ⁻⁴	2 10 ⁻⁶
LEMI-102	0,001Гц 200 Гц	10 ⁻²	5 10 ⁻⁵	- . -
LEMI-102	8 Гц 8 кГц	- . -	- . -	2 10 ⁻⁶
HB0195_7	0,1 Гц 20 кГц	- . -	8 10 ⁻⁵	2 10 ⁻⁶
СНИИМ	0,001Гц 20 кГц	- . -	- . -	- . -
IMS - 007	0,001Гц 10 кГц	- . -	- . -	- . -
IMS - 008	0.0001 Hz – 1Гц	10 ⁻²	10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁷
IMS - 009	0,001Гц 10 кГц	2 10 ⁻²	2 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁷



Конструкция датчика обратная связь по полю и эквивалентная схема



Оценка шумов индукционного датчика

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kTR.}$$

e -шумы напряжения усилителя

i – токовые шумы усилителя

R - активное сопротивление

Z – модуль импеданса

$$R_{\text{пол}} = R + R_{\text{пот}}$$

$$R_{\text{пот}} = \omega L \cdot \text{tg } \delta_{\text{пот}} (\mu_{\text{эфф}}),$$

Предельная чувствительность

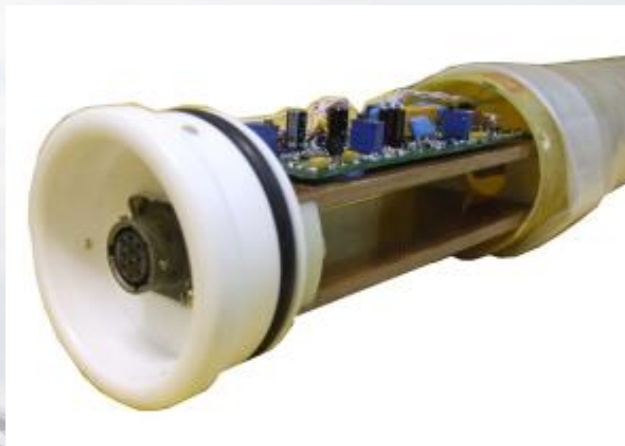
$$H_{\text{мин}} = \frac{(e_{\text{ш}}^2(f) + i_{\text{ш}}^2 Z^2(f) + u_{\text{th}}^2(f))^{1/2}}{2\pi f \mu_0 \mu_{\text{эфф}}(f) N S_c}$$

Низкие частоты:

-шумы напряжения усилителя

-сопротивление обмотки

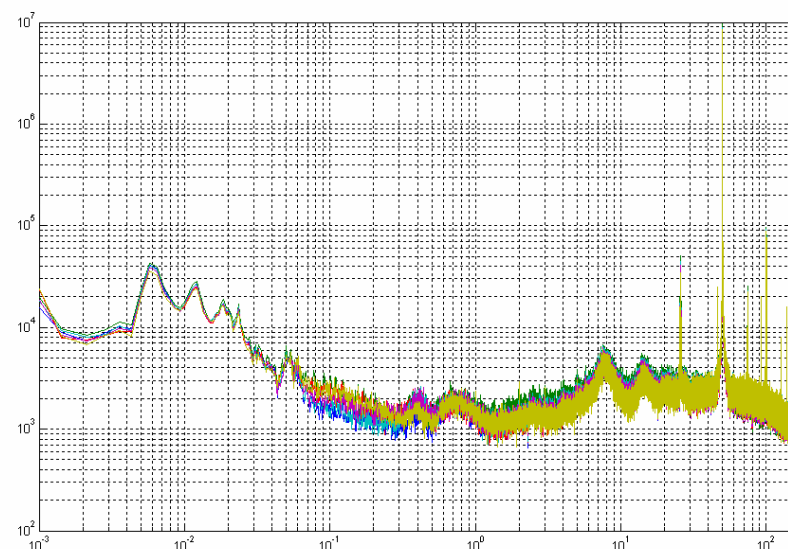
Использование «чопперов»





Датчик	IMS-007	IMS-008	IMS-009	Примечание
Частотный диапазон	0.001 Гц – 10 кГц	0.0001 Гц – 1 кГц	0.001 Гц – 10 кГц	Возможность отключения «чоппера»
Частотная характеристика	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 Гц – 4 Hz) линейная	(2 Гц – 1 кГц) плоская (0.0001 Гц – 2 Hz) линейная	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 Гц – 4 Hz) линейная	
Измеренный уровень шума	-	10^{-2} нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 0.01 Гц 10^{-4} нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц $5 \cdot 10^{-7}$ нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$ нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 0.01 Гц $2 \cdot 10^{-4}$ нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц 10^{-6} нТ / $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 кГц	
Чувствительность	-	0.8 (В / нТ)* Гц (0.0001 Гц – 2 Hz) 6.В / нТ (2 Гц – 1 кГц)	0.2 (В / нТ)* Гц (0.001 Гц – 4 Hz) 0.8 В / нТ (4 Гц – 10 кГц)	
Диапазон выходного сигнала	+/- 10 В	+/- 10 В	+/- 10 В	+/- 2.5 В (опция)
Потребляемый ток	60 мА (при 12 В)	65 мА (при 12 В)	40 мА (при 12 В)	
Размеры	Длина: 800 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 1240 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 800 мм Диаметр: 65 мм	
Вес	6 кг	8 кг	5 кг	
Рабочая температура	от -40 до +	от -40 до +	от -40 до +	

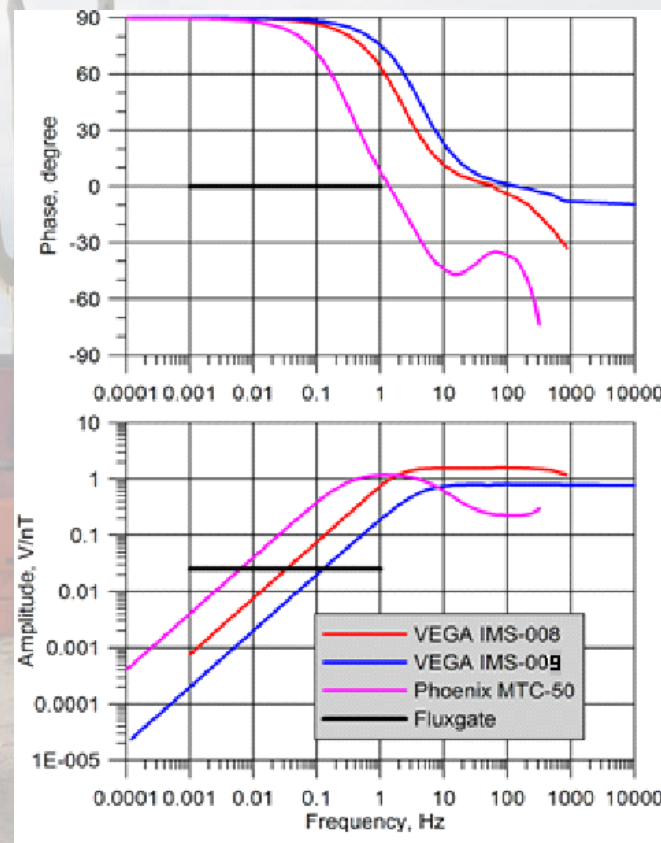
методы тестирования



Проверка датчиков на идентичность (естественный сигнал)



Поверочный стенд в ФГУНПП «Геологоразведка»



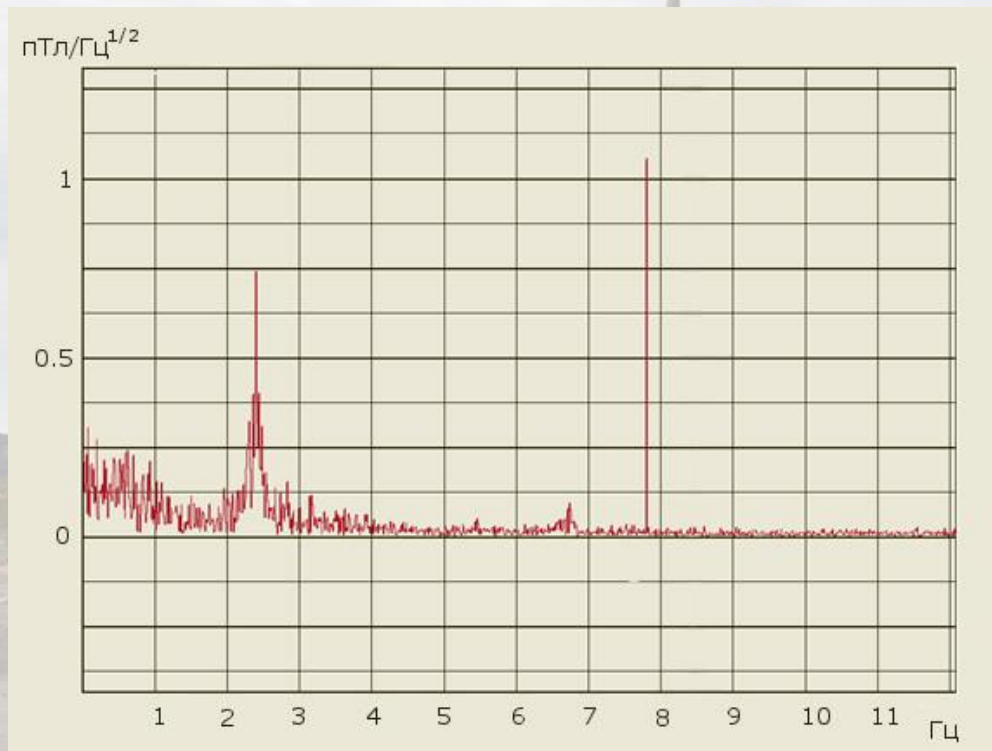
АЧХ и ФЧХ магнитометра IMS-008 и IMS-009.



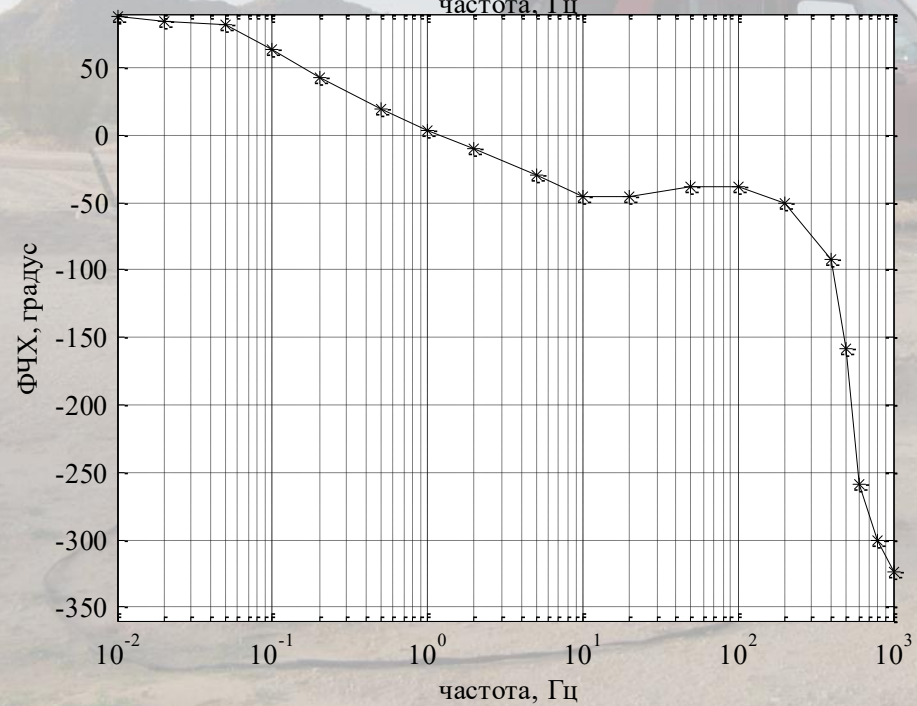
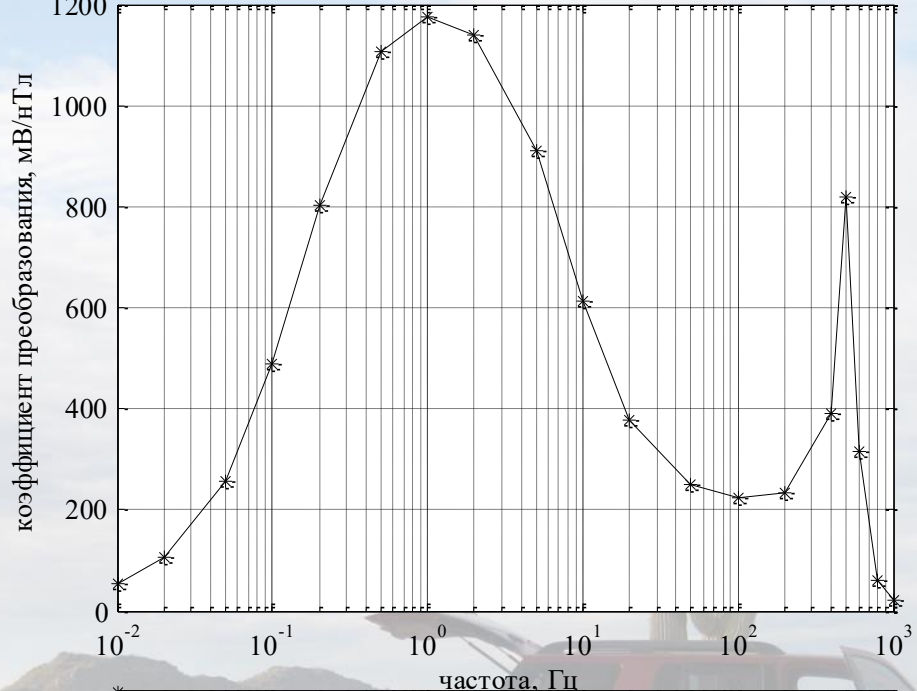
Установки для тестирования индукционных датчиков в полевых условиях

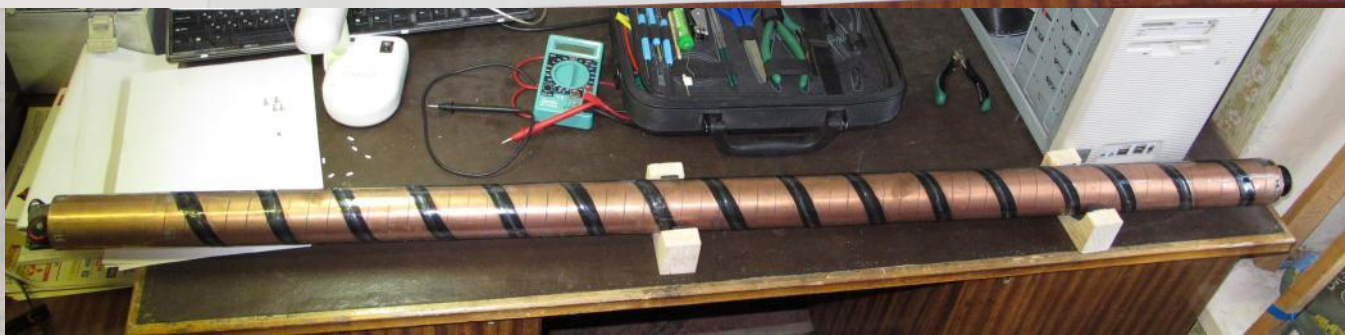
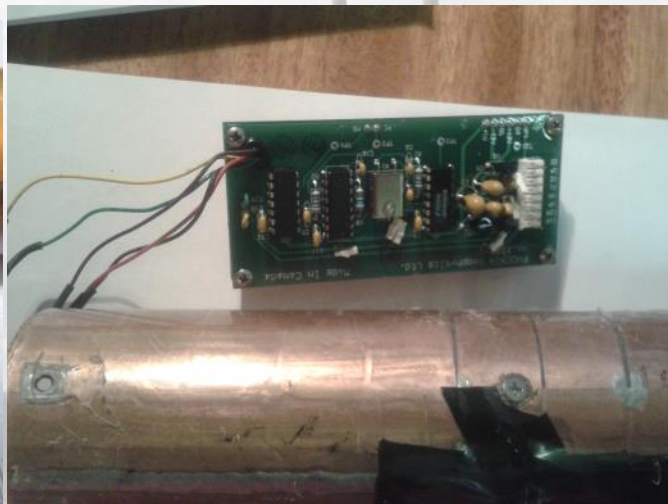
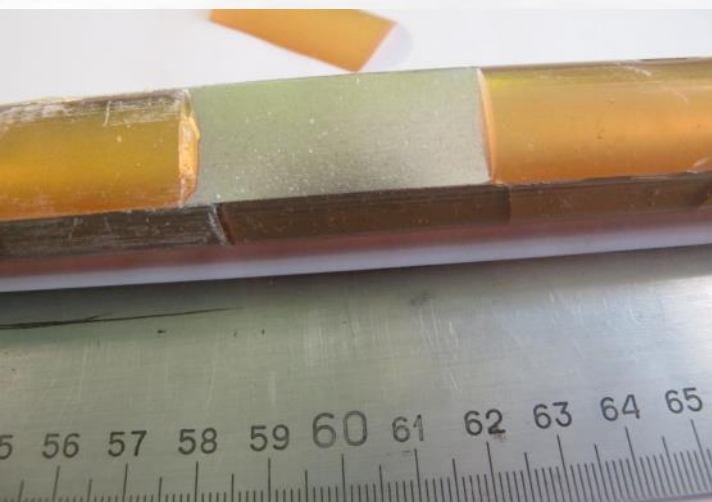


Оценка линейности и шумовых параметров датчиков



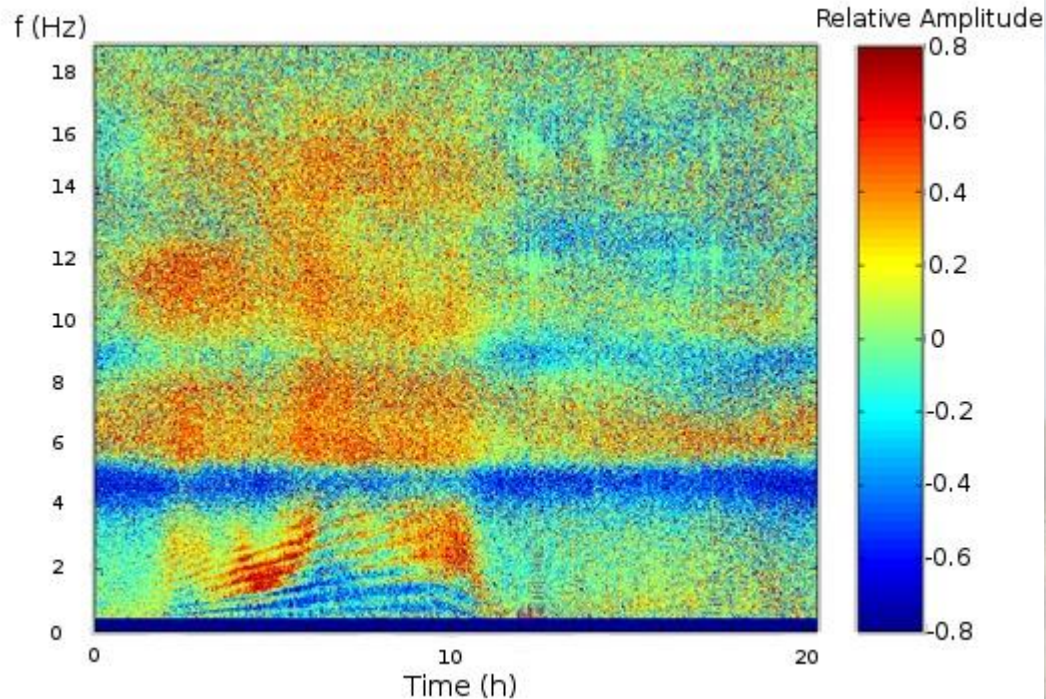
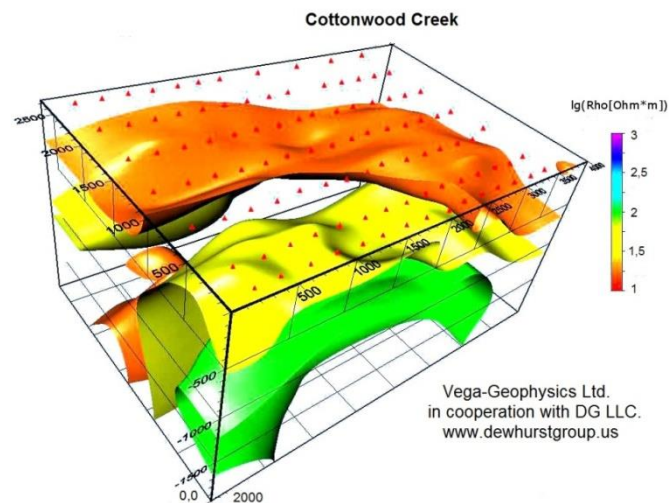
Измерения коэффициента преобразования магнитного датчика в зависимости от уровня входного сигнала производились на нескольких частотах рабочего диапазона. Отклонение коэффициента преобразования от своего среднего значения, являющегося характеристикой линейности измерительной системы, не превышало 0.25% в диапазоне входных сигналов от 5 пТл и выше.







Примеры использования датчиков серии IMS

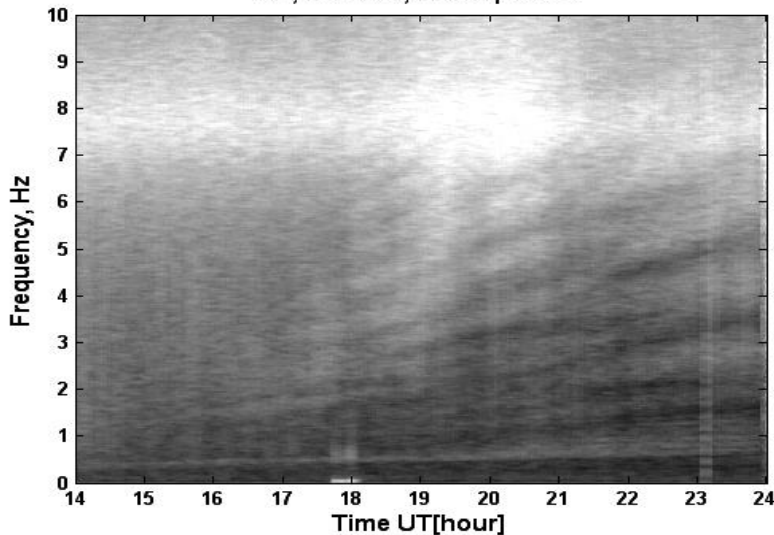




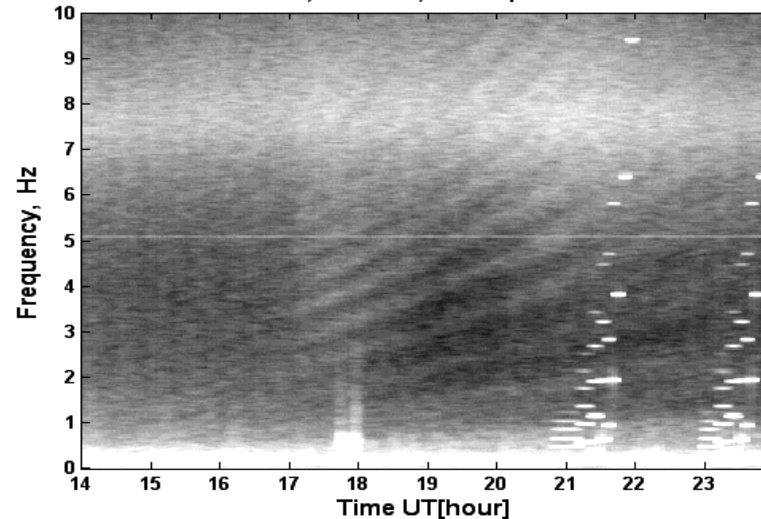
Результаты одновременных наблюдений РСС в «Новой Жизни» и Ловозеро (верхняя панель), на о. Крит (нижняя панель)



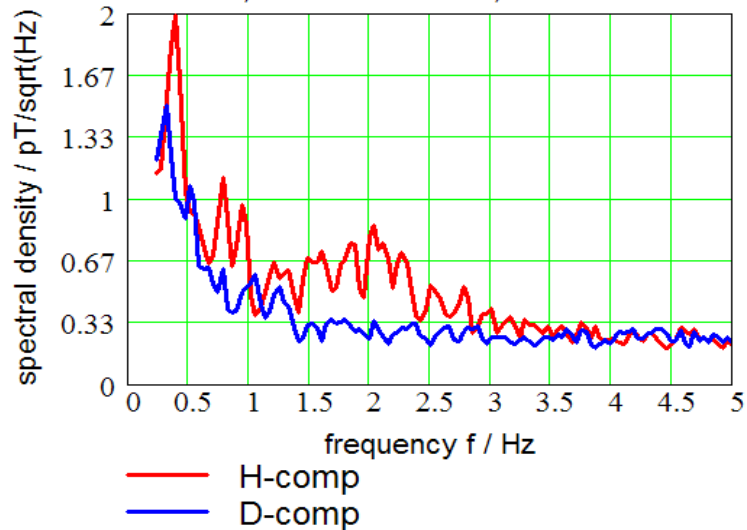
NL, 10.09.07, H component



LOV, 10.09.07, H component

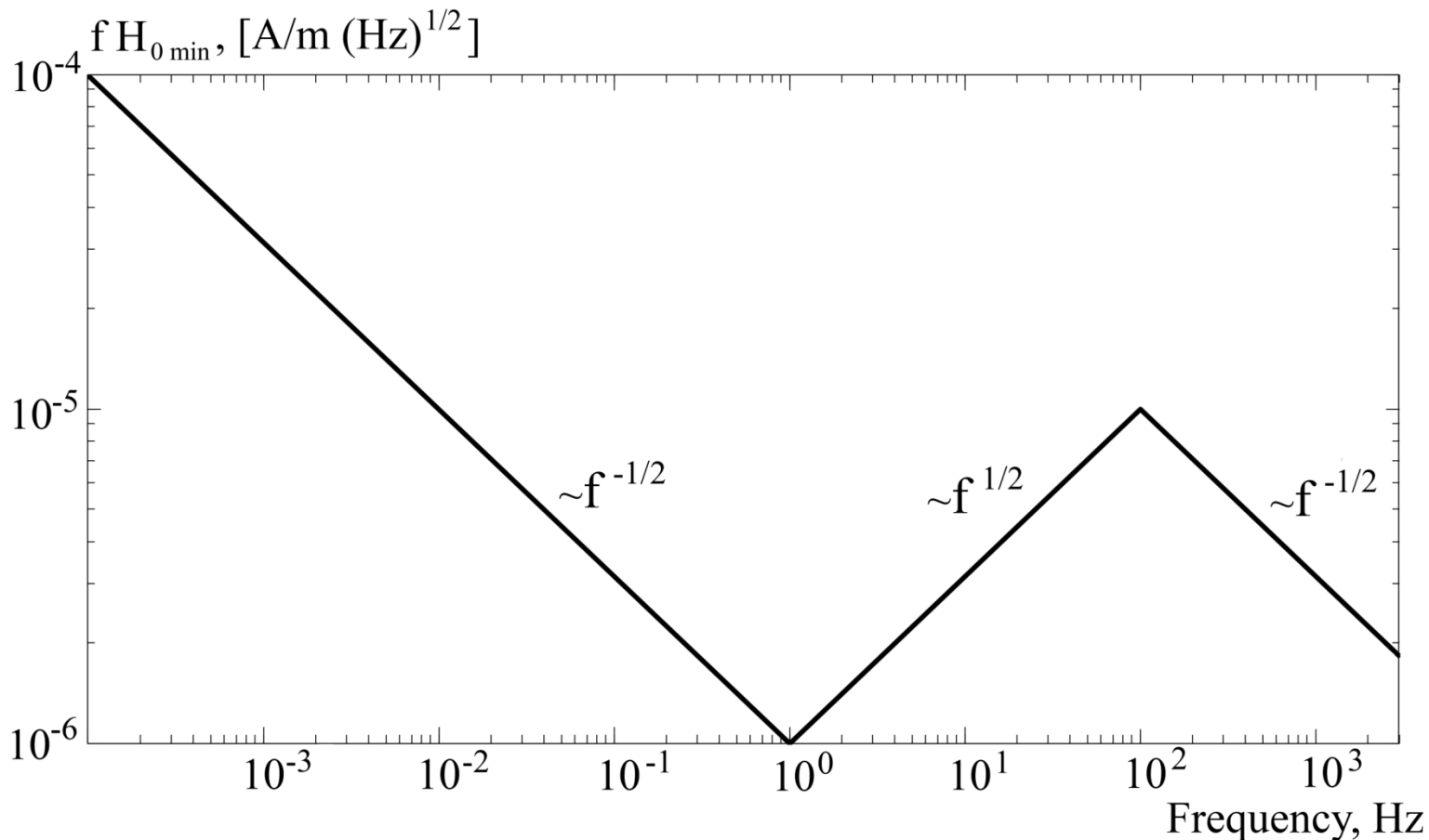


Crete, 17./18. 1. 2008, 22:17:53 UT





Модель спектра горизонтального магнитного поля естественного шумового фона (минимальный уровень)



Источники:

1. Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д. и др. Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ. – М.: Наука, 1972. – 195 с.
2. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. – М.: Наука, 1985. – 200 с.



Заключение



В настоящее время в дополнение к представленной линейке индукционных магнитометров разрабатывается «низкочастотный» индукционный датчик с пониженными собственными шумами для частот $f \leq 30$ Гц. Эта разработка ориентирована на проведение градиентных измерений [25] и измерений вертикальной компоненты магнитного поля.

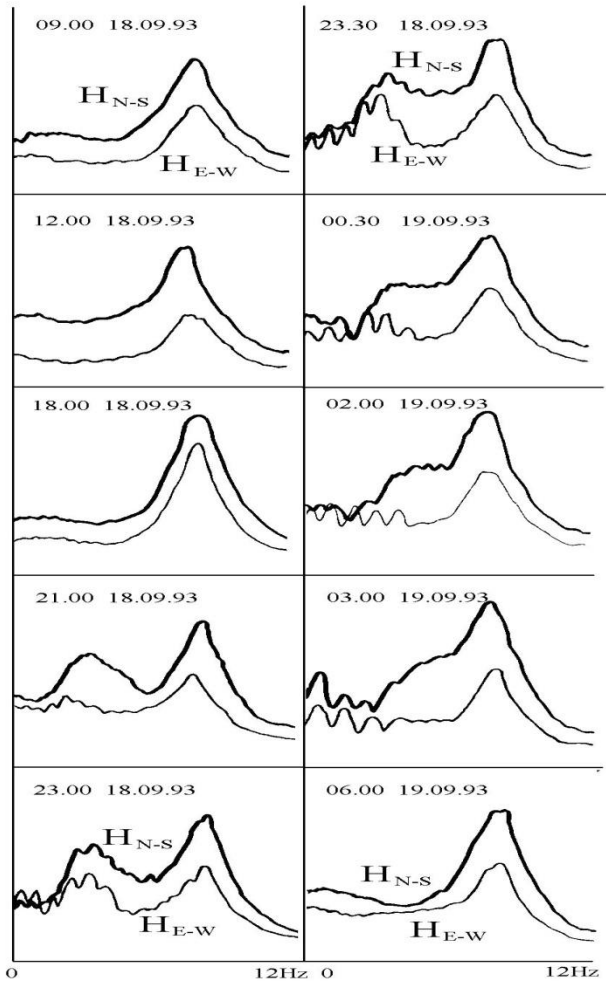
По состоянию развития современной техники, по-видимому, можно утверждать, что в лучших образцах описанных выше индукционных магнитометров достигнут фундаментальный технологический предел физических параметров индукционных магнитных преобразователей. Это означает, что с использованием существующих в настоящее время материалов и элементной базы, изготовить магнитометр существенно лучшего качества практически невозможно. Это утверждение касается широкополосных индукционных магнитометров для геофизических и других приложений. В тоже время для решения каких-либо других задач, например, для измерений в относительно узкой полосе частот, могут быть разработаны и изготовлены магнитометры с существенно меньшими собственными шумами, по сравнению с представленными в статье.

**Спасибо за проявленный
интерес!**

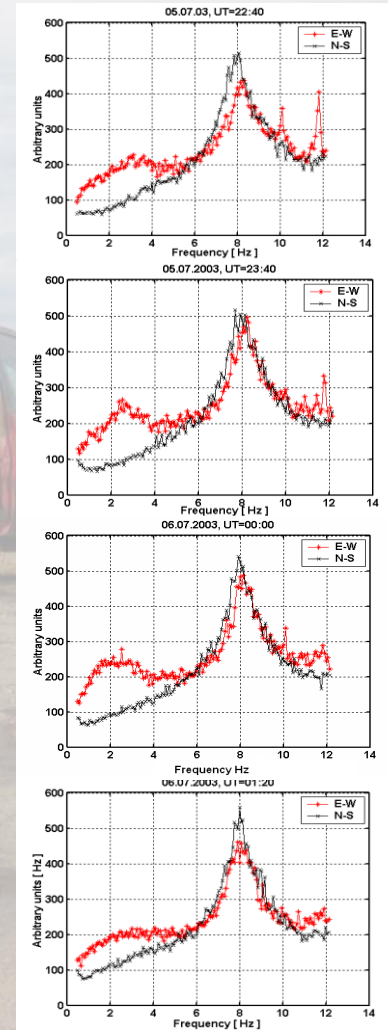


Регистрация широкополосного максимума на станциях «Новая Жизнь» и Nurmijaervi, магнитные компоненты В-3, С-Ю

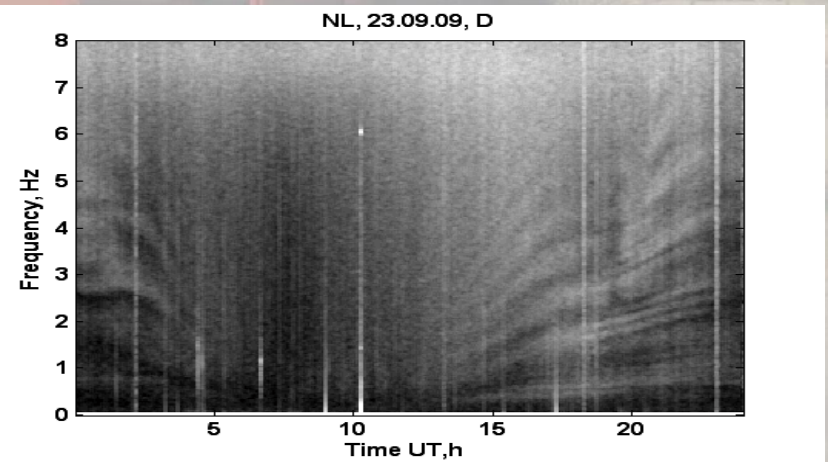
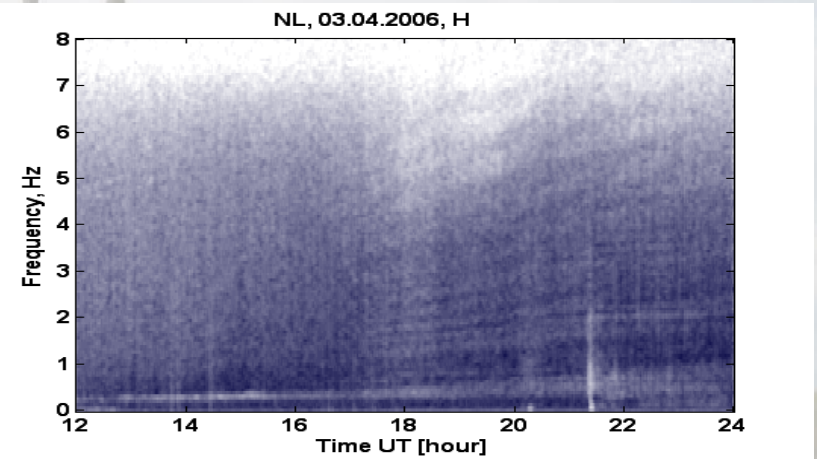
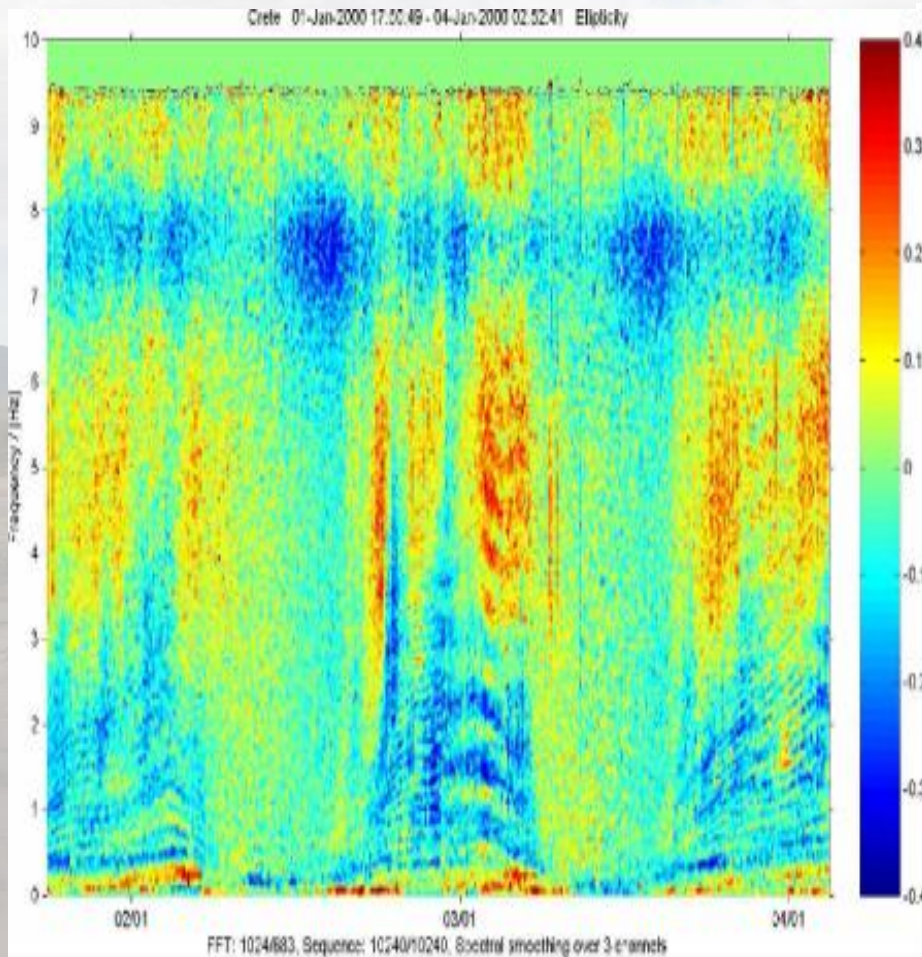
Новая Жизнь, 18.09.1993



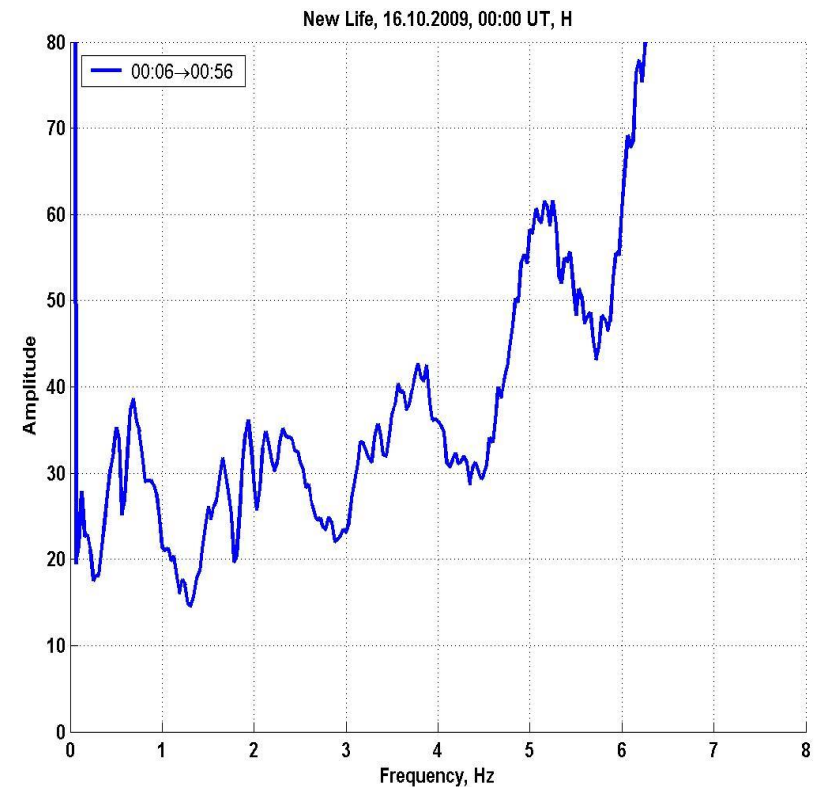
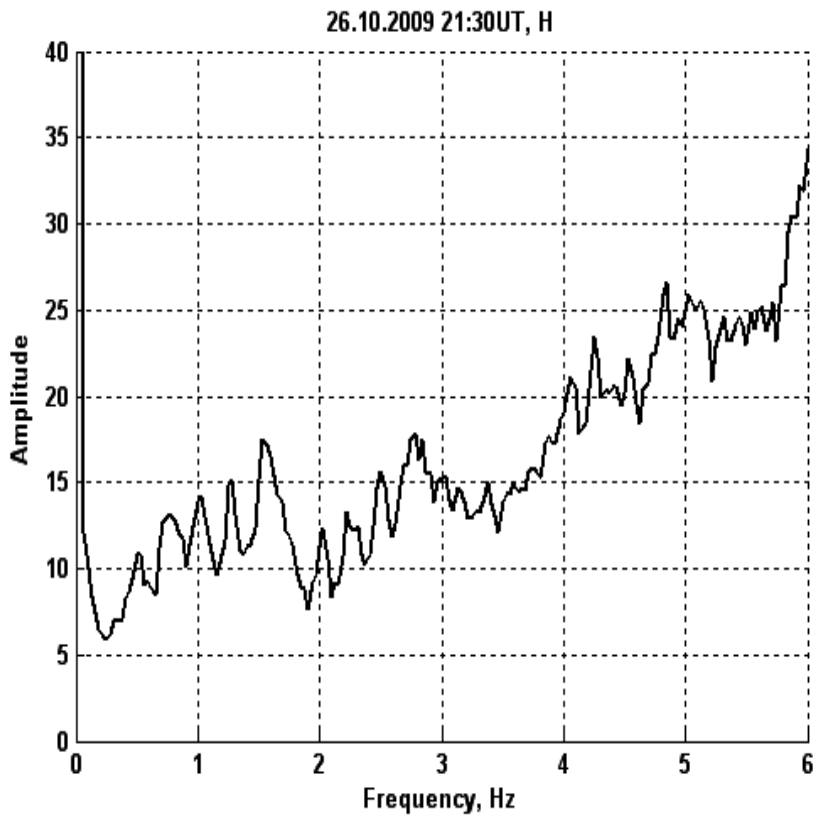
Nurmijaervi, 06.07.2003



Регистрация “fine structure” на разных широтах



Линейные спектры магнитной компоненты С-Ю, демонстрирующие глубину осцилляций тонкой структуры.(26.10.2009, 21:30 UT - слева и 16.10.2009, 00:00 UT - справа)



Результат специальной обработки данных, полученных для приемных пунктов, разнесенных на расстояние 50 км

