

# Современные протонные и оверхаузеровские магнитометры для полярных геофизических исследований

*Сапунов В.А., Денисов А.Ю., Савельев Д.В.*

Лаборатория квантовой магнитометрии им. Г.В. Скороцкого  
Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина  
Екатеринбург

[www.magnetometer.ru](http://www.magnetometer.ru)

Применение абсолютных скалярных магнитометров (протонные, протонные оверхаузеровские и магнитометры с оптической накачкой) используются и неизбежно будут использоваться для геофизических исследований в полярных условиях, т.к. приборы основаны на квантовых принципах, а их функции преобразования определяются мировыми константами. Данные приборы измеряют по принципу действия модуль поля, а не компоненты в отличие от феррозондов, магниторезисторов и т.п., и даже квантовых СКВИД магнитометров, что значительно облегчает применение скалярных магнитометров в реальных условиях, хотя и снижает их информативность.

# Основные параметры скалярных магнитометров

Принцип Тип прибора Страна фирма	Абсолютная точность	СКО теор. предел и достигнутое	Цикл	Энерго- потребле- ние	Ресурс рабочего тела, датчика
<b>Протонный</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Асинхронное единичное измерение</li> <li>■ Синхронная поляризация для непрерывных изм.</li> </ul> G856 США Geometriks GSM-19T Канада GEM ММП-203 Геологоразведка РМ-2 Польша ИЗМИРАН разработка на базе ММП-203 ?	<b>0,3 - 3 нТл</b> Зависит от намагниченности датчика, релаксации T2 (ширина ЯМР) исходя из S/N и точности кварца и мн. др.	<b>10 - 300 пикоТл</b> В зависимости от: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ тока поляризации</li> <li>■ цикличности</li> <li>■ обработки сигнала</li> <li>■ конструкции датчика</li> <li>■ плотности S/J</li> </ul>	<b>0,5 - 5 сек</b> Асинхронный  <b>0,2 - 5 сек</b> Синхронная поляризация	<b>3 - 30 Вт</b> Пиковая  <b>0,05 - 3 Вт</b> При повторяющихся единичных изм.	<b>Не ограничен</b> С дозаливом маловязкие протононасыщенные жидкости:  <b>Спирты, Керосин, Гептан –Гексан</b>
<b>Оверхаузеровский протонный</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Асинхронный</li> <li>■ Синхронный</li> <li>■ Непрерывный сигнал</li> </ul> GSM-19 Канада GEM МИНИМАГ Геологоразведка POS НИЛ КМ УрФУ LETI Франция	<b>0,1 - 1 нТл</b> Зависит от намагниченности датчика, релаксации T2 (ширина ЯМР) исходя из S/N и точности кварца и мн. др.	<b>2 - 30 пикоТл</b> В зависимости от: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ цикличности</li> <li>■ энергопотребления</li> <li>■ обработки сигнала</li> <li>■ конструкции датчика</li> <li>■ плотности S/J</li> </ul>	<b>0,5 - 5 сек</b> Асинхронный  <b>0,2 - 5 сек</b> Синхронная поляризация  <b>0,05 -100 сек</b> Непрерывный сигнал	<b>3 - 5 Вт</b> Пиковая  <b>0,05 - 1 Вт</b> Средняя с режимом молчания	<b>До 10 лет</b> В зависимости от: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ температуры</li> <li>■ типа рабочего вещества</li> <li>■ способов вакуумирования</li> </ul>
<b>Оптическая накачка</b> Непрерывный сигнал	<b>0,1- 10 нТл</b> Точность и стабильность констант линий спектра	<b>0,001 - 10 пикоТл</b> При межцикловом осреднении	<b>0,01 – 1 сек</b> Ограничена только частотой Лармора	<b>10 - 50 Вт</b> Прогрев <b>3 - 10 Вт</b> работа стартовый	<b>2000 - 5000 часов</b> Непрерывной работы

# Технико-экономическое сравнение коммерчески доступных магнитометров

Спецификации	НИЛ КМ УрФУ, <a href="http://www.magnetometer.ru">www.magnetometer.ru</a>	ФГУ НИИ Геологоразведка <a href="http://www.geolraz.com">www.geolraz.com</a>	GEM System Канада <a href="http://www.gemsys.ca">www.gemsys.ca</a> Дилер в РФ <a href="http://www.agtsys.ru">www.agtsys.ru</a>		Scintrex Ltd Канада-США <a href="http://www.scintrex.com">www.scintrex.com</a> Дилер в РФ <a href="http://www.agtsys.ru">www.agtsys.ru</a>		Geometrics США <a href="http://www.geometrics.com">www.geometrics.com</a> Дилер в РФ <a href="http://www.agtsys.ru">www.agtsys.ru</a>	
	Тип технологии датчика и тип магнитометра	Оверхаузер. протонный ЯМР <b>POS - 1, 2, 4</b>	Оверхаузер. протонный ЯМР МСПГ-1	Оверхаузер. протонный ЯМР GSM 19	Оптическая накачка паров Калия, GSMP-40	Протонный ЯМР ENVIPRO	Оптическая накачка паров Цезия, SM-5	Протонный ЯМР G-856
Разрядность изм., пикоТл	<b>1</b>	10	10	<b>0,1</b>	10	10	100	10
СКО, пикоТл	<b>10-30 (3 сек.)</b> 30-50 (1 сек.) 50-90 (0,5 сек.)	30-50 (2 сек.) - -	<b>20 (3 сек)</b> 40 (1 сек) ? (0,5 сек)	<b>2,5 пТл/Гц</b> ? по циклам	100 (0,5 сек.) <b>30 (3 сек.)</b>	<b>6 (0,1 сек)</b>	70-200 (3 сек) Нет быстрых циклов	20 (0,2 сек.) 10 (0,5 сек.) 8 (1,0 сек.)
Точность, нТл*	0,2-0,5	2	0,2	<b>0,1</b>	1	2,5 датчик ±0,2	0,5	1,5 + 0,05°C
Быстродействие	<b>до 0,25 сек.</b>	2 сек.	<b>0,2 сек.</b>	<b>0,05-1</b>	0,5-1-3 сек	<b>0,1</b>	3 сек.	<b>0,2 сек</b>
Масса (2 канала) 4 канала	8 кг 11 кг	7 кг Нет	<b>6 кг</b>	8-15 кг с батареями	<b>4,5 кг</b> нет	<b>5 кг</b> Без батарей	<b>4,5 кг</b>	6-9 кг опции
Энергопотребление, мВ - Вт	3-4 Вт/канал	3-4 Вт/канал	<b>2,8</b> Вт/канал	50 Вт старт 12 Вт 20°C	7-10 Вт	15 Вт старт	10 Вт	<b>10 Вт старт</b> 5 Вт при 20°C
Контроль качества	<b>Есть</b> QMC в абсолютных единицах поля	Нет	Есть грубая оценка 0-9 балл	Нет	Нет Есть по итоговым изм.	Нет Есть только по итоговым изм.	Нет	Нет Есть только по итоговым изм.
Градиентоустойчивость, нТл/м	<b>20000</b> <b>40000 форсаж</b>	7000	10000	13500	≥7000	<b>40000</b>	1000	20000
Время жизни датчика	<b>10 лет</b>	5 лет	3-5 лет	2000 часов ресурс	<b>Не ограничен с дозаливом</b>	<b>≥5000 часов ресурс</b>	<b>Не ограничен с дозаливом</b>	≥3000 часов ресурс
Цена: 1 канал 2 канала 4 канала Дилер РФ ÷ 40%	330 т. р. 413 т. р. ≅ <b>700 ÷ 1000 т.руб.</b> <i>зависит от опций</i>	<b>220 т.р.</b> <b>270 т.руб.</b> нет	23000 USD 30000 USD >>100000 USD Sea option	≅30000 USD ≅45000 USD нет	12000 USD 18000 USD нет	18000 USD 23000 USD нет	<b>8500 USD</b> <b>12300 USD</b> Нет	30000 USD Нет Нет

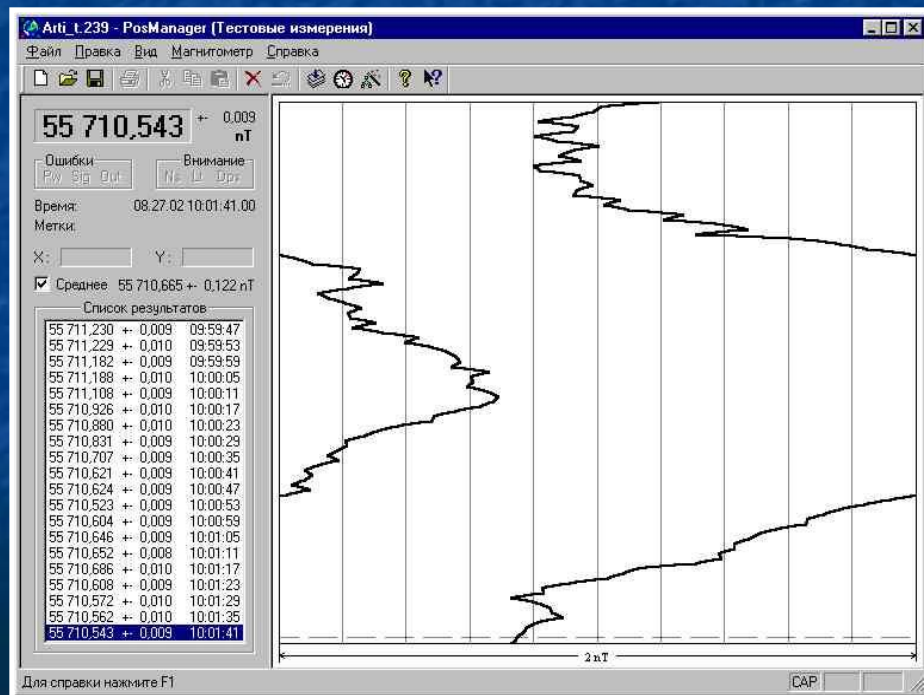
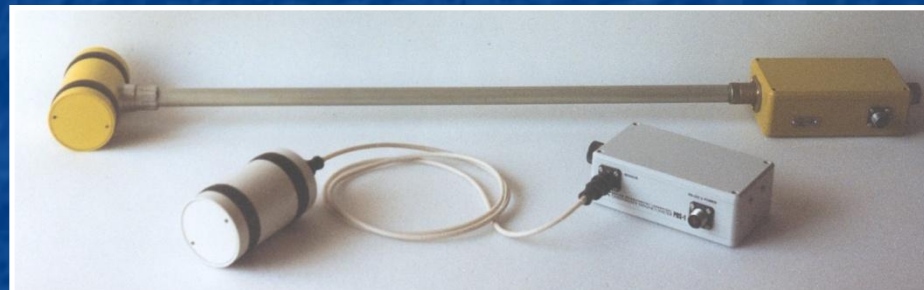
# Лучшие коммерчески доступные скалярные магнитометры

Лучшие по технологии рейтинг	Тип технологии датчика	Комментарии
<b>GSM-19 T G-856</b>	<b>Протонный</b> по методу Паккарда Вариана с регистрацией частоты Лармора протона.	<i>Используется для низкоточной наземной магниторазведки или при низкой квалификации операторов благодаря минимальной цене и высокой стабильности вещества (керосин). В России производство прекращено.</i>
<b>POS GSM-19 МИНИМАГ</b>	<b>Оверхаузеровский</b> магнитометр является аналогом протонного с Оверхаузеровским усилением сигнала ЯМР.	<i>Оптимальное соотношение цены/качество для высокоточной наземной и морской магниторазведке благодаря достаточно высокой чувствительности и градиентоустойчивости при низком энергопотреблении и весе. Достаточно стабильные рабочие вещества. Рекордная стабильность для POS основе растворов радикалов R7. Ремонт только заменой датчиков.</i>
<b>GSMP-40 SM-5 G-859</b>	<b>Оптическая накачка</b> паров щелочных металлов с регистрацией электронного эффекта Зеемана по оптическому каналу.	<i>Используется для аэромагниторазведки и оперативной археологии или UXO – детектирования благодаря наилучшим параметрам по чувствительности и быстродействию, несмотря на высокую цену, большое энергопотреблением и вес с учетом батарей питания, а также необходимостью замены датчиков при интенсивной эксплуатации с непрерывным подогревом датчиков. Рекордные результаты для технологии датчика на парах Калия – GSMP-40. Датчик разработан в России и передан GEM System ГОИ им. Вавилова с эксклюзивом для РФ.</i>

# POS магнитометр OEM

Разрядность 0.001 нТл СКО до 0.01 нТл Абсолютная точность до 0.1 нТл

С 2009 г. внесен в реестр средств измерений РФ. Производится с 1997 г.

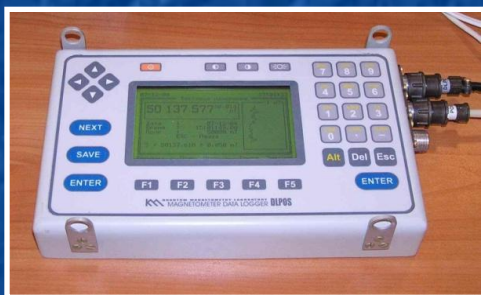


# GPS опция POS магнитометра

Предназначена для точной синхронизации начала сигнала прецессии до 10 мкс по OEM GPS-приемнику Trimble Lassen iQ



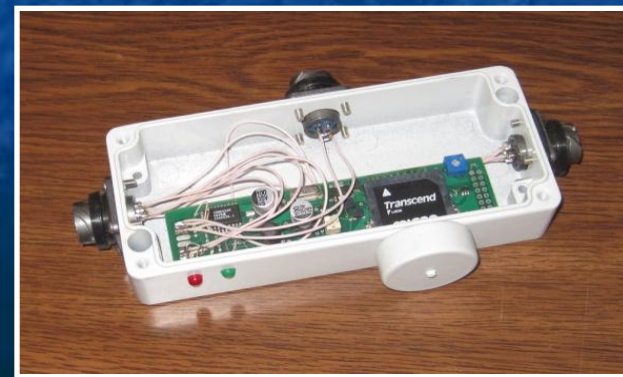
Регистратор DLPOS предназначен для полевых (пикет-маршрутных, GPS) наземных работ и вариационных измерений. Используется на контрольных пунктах и при магнитной очистке территории обсерваторий



MMPOS-1 & 2 & ...



Транзитный резервный SD card накопитель



# Требования к полярному протонному магнитометру

Анализ и выбор по существующим скалярным магнитометрам в достаточной степени неоднозначен и даже субъективен, поскольку весовые коэффициенты свойств поддаются только экспертной оценке в зависимости от условий и методики применений.

Важнейший для полярных условий работы параметр надежности, по-видимому, однозначно диктует выбор в пользу протонного магнитометра. Естественно, хочется иметь остальные параметры также высокими. По-видимому, из этих соображений было составлено ТЗ по ГБ тендеру ААНИИ

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ЛОТУ №1**

**Оснащение станций наблюдательной сети современными системами ....., магнитометрической аппаратурой и системами накопления, подготовки и передачи цифровых магнитных данных.**

- **2.1.3. Технические требования к прецизионному протонному магнитометру (ППМ).**
- 2.1.3.1. Состав технической продукции
- Прецизионный протонный магнитометр – прибор, осуществляющий непрерывную регистрацию (с максимально возможной частотой дискретизации) ..... в различных условиях эксплуатации, в том числе на труднодоступных полярных станциях при отсутствии регулярного обслуживания и проверки.
- 2.1.3.2.1. Должен быть реализован непрерывный режим работы прибора с предустановливаемым шагом дискретности измерений 1 секунда.
- 2.1.3.2.2. Установка конфигурации прибора должна осуществляться через последовательный коммуникационный порт.
- 2.1.3.2.3. После выключения питания прибор должен сохранять все конфигурационные установки в энергонезависимой памяти.
- 2.1.3.2.4. При подаче напряжения питания прибор должен автоматически переходить в рабочий режим непрерывных измерений.
- 2.1.3.2.5. Для управления, конфигурации и регистрации данных должна быть реализована программа, работающая в операционной среде Windows.
- 2.1.3.2.6. Программа должна обладать возможностью непрерывного сохранения данных на жесткий диск, и визуализации результатов измерений.

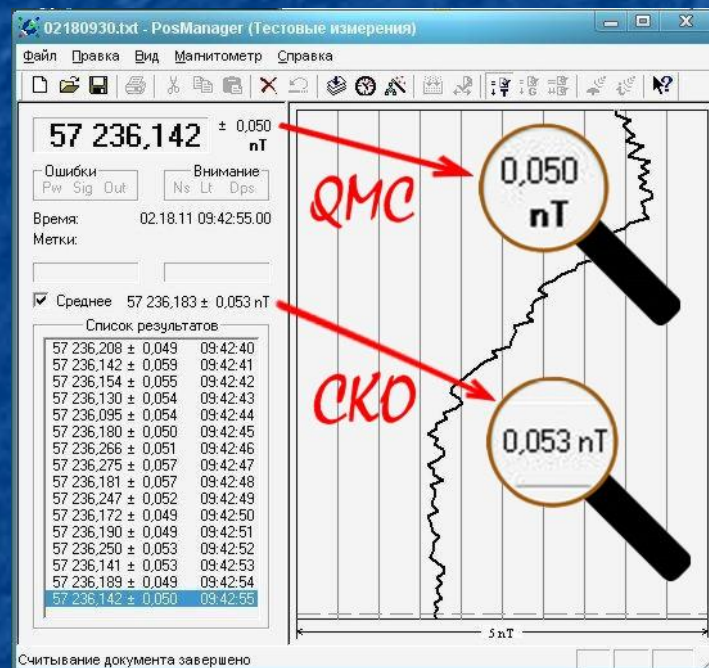
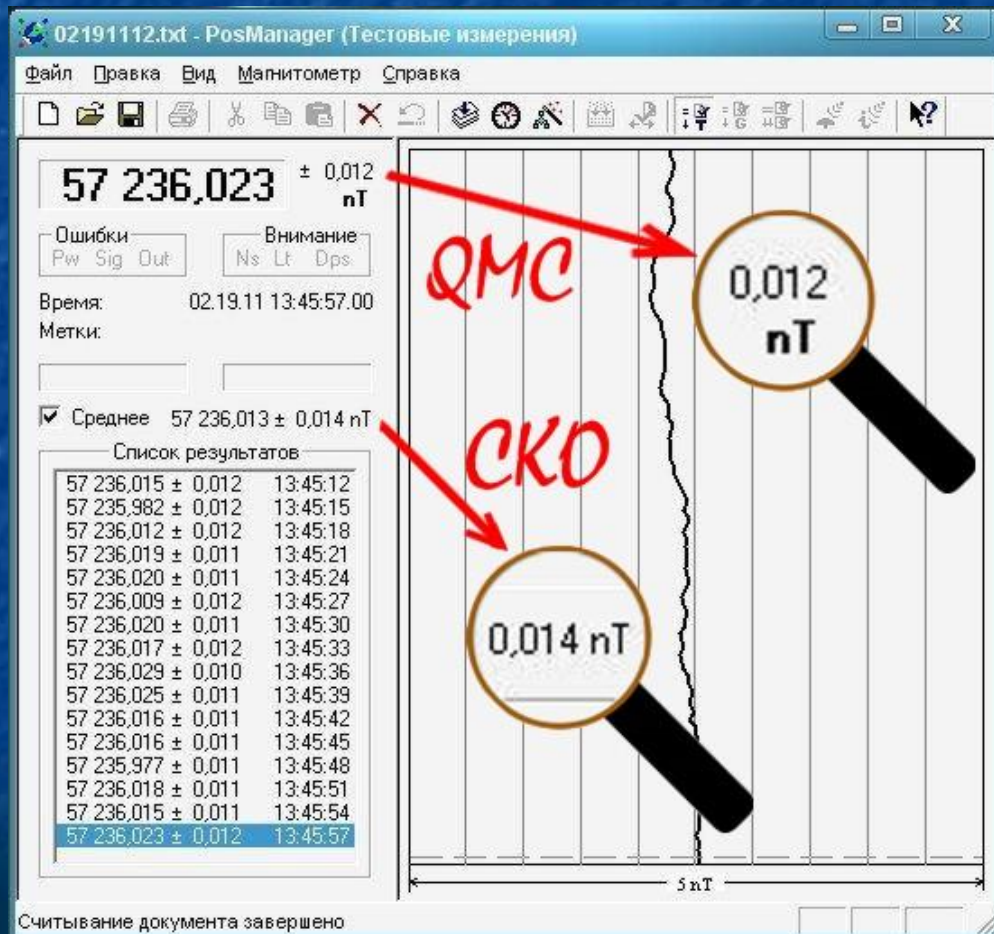
1	Диапазон измерения магнитного поля	20000-7500 0 нТл	Зачем 20000нТл? Величина протонного сигнала пропорциональна полю, значит требования ужесточаются более 2-х раз.
2	Чувствительность	0,01 нТл	СКО или P-to-P или подразумевалась отсутствующее требование по разрядности измерений? СКО не реализуемо при учете всех пунктов ТЗ.
3	Систематическая погрешность измерений не более	0,3 нТл	Кто обеспечивает? ВНИИМ на Гос. Эталоне калибрует до 0,1нТл с утверждением до 0,5 нТл
4	Рабочий агент	Керосин, Спирт	Очевидно из соображений доступности, но они вязкие при -40°C и не обеспечат 3-сек цикл при необходимой длительности прецессии и для столь высокого СКО.
5	Частота непрерывных измерений	3-60сек.	Очевидно, единичное изм. 3 сек., почему? Имеется резерв СКО как степень 3/2 длительности прецессии при обеспечении Т2. Ограничивает использование синхронной поляризации, улучшающей СКО.
7	Время установления рабочего режима, не более	3 сек	Куда спешим? ТЗ исключает использование термостабилизированных прецизионных кварцев.
8	Установка рабочего диапазона измерений	Автоматическая	Реализуемо, но нет требований по динамическому и статическому параметрам и стартовым условиям.
9	Возможность поверки и регулировки частоты кварцевого генератора по сигналам приемника GPS с точностью, не хуже	$10^{-7}$ сек	Каковы условия поверки, неужели без остановки измерений? Разумнее требовать синхронизации по 1-сек. импульсу GPS и поверку на эталонном генераторе.
12	Потребляемая мощность, не более	1Вт	Наверное, скопировано с оверхаузеровского GSM-90L или без учета цикла – скважинности измерений, или мечта?
13	Диапазон рабочих температур	-40 / +50°C	Радует, что не -60°C, которые в принципе доступны.
14	Масса прибора (с датчиком), не более	5кг	Почему? Написано под конкретный прибор без учета резервного аккумулятора? Повышение массы датчика дает резерв СКО. Нобеля получили за ЯМР с ведечным датчика на воде!.....



Теоретическая проработка (инициативный НИОКР) на основе экспериментально проверенных методов показала ограниченную реализуемость ТЗ в рамках серийного POS-1 и возможность модернизации (НИОКР) на базе универсальным протонного и Оверхаузеровского датчика:

	Параметры	Оверхаузер POS-1	Протонный POS-1
1	Диапазон измерения магнитного поля, нТл	20000-100000 нТл	<b>35000-80000</b> нТл
2	Разрядность измерений, нТл	0,001	0,001
3	Чувствительность, СКО, нТл	0,01	<b>0,01 -0,02</b>
4	Систематическая погрешность	0,3 нТл	<b>0,5</b> нТл
5	Рабочий агент	Сверхстабильный раствор нитроксильного радикала	Керосин, гептан, гексан
6	Частота непрерывных измерений	0,5 - 60сек.	<b>3</b> - 60сек.
7	Поддержка обмена по последовательным	RS-232,	RS-232,
8	Время <sup>портам</sup> установления рабочего режима	3 сек	3 сек
9	Установка рабочего диапазона измерений	Автоматическая	Автоматическая
10	Возможность поверки и регулировки частоты кварцевого генератора по сигналам приемника GPS с точностью	Синхронизация измерений по GPS- OEM приемнику с выдачей координат и UTC	10 <sup>-7</sup> сек
12	Напряжение питания	12В, -1В / <b>+3В</b>	12В, -1В / +5В
13	Потребляемая мощность цикл измерений 3 сек. Потребляемая мощность цикл измерений 10	1-2 Вт 0,2-0,3 Вт	3-4Вт 0,6-1 Вт
14	Диапазон <sup>сек</sup> рабочих температур	<b>-10</b> °C - +60°C	-40°C - +50°C
15	Масса прибора (с датчиком)	2 кг	5кг
16	Режимы работы	1. Непрерывный, 2. По запросу с RS232 порта	1. Непрерывный, 2. По запросу с RS232 порта

# Приполярные работы, вариации по ММРОС-1 № 387 при – 35 град. С ПАНГЕЯ заказчик, ВСЕГЕИ - В. Кузнецов, 74 км. От МО ШАИМ



Цена деления 0.5 нТл

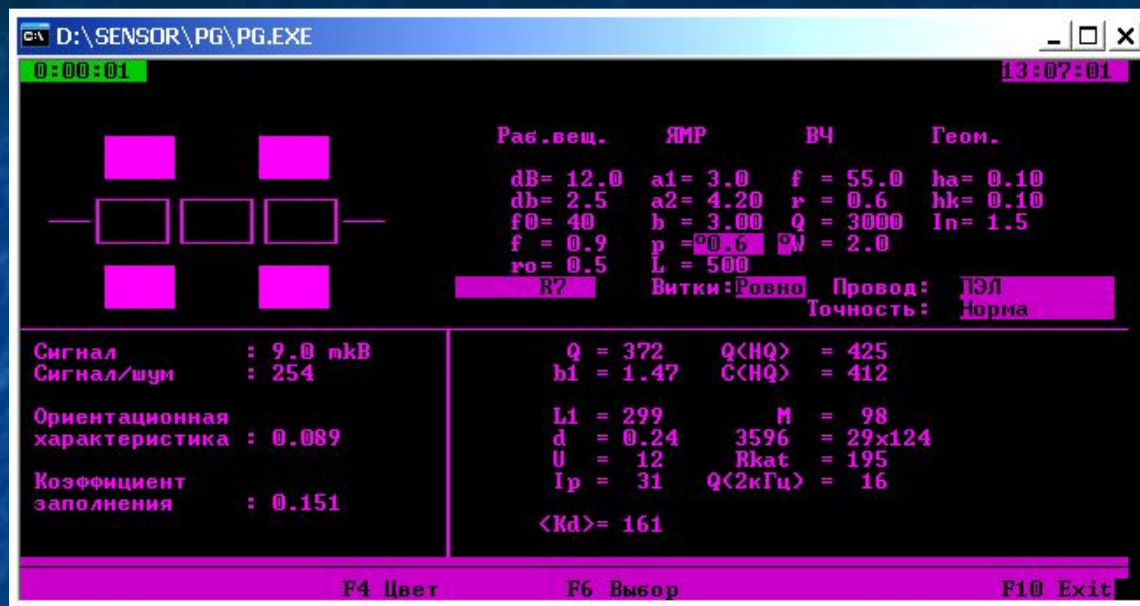
Цикл 3 и 1 сек.

СКО = степень 3/2 цикла

# Расчёт и обработка сигнала прецессии

Расчёт сигнала датчика

$$S_0 = \chi \omega_p L I \eta \theta$$



Оценка чувствительности

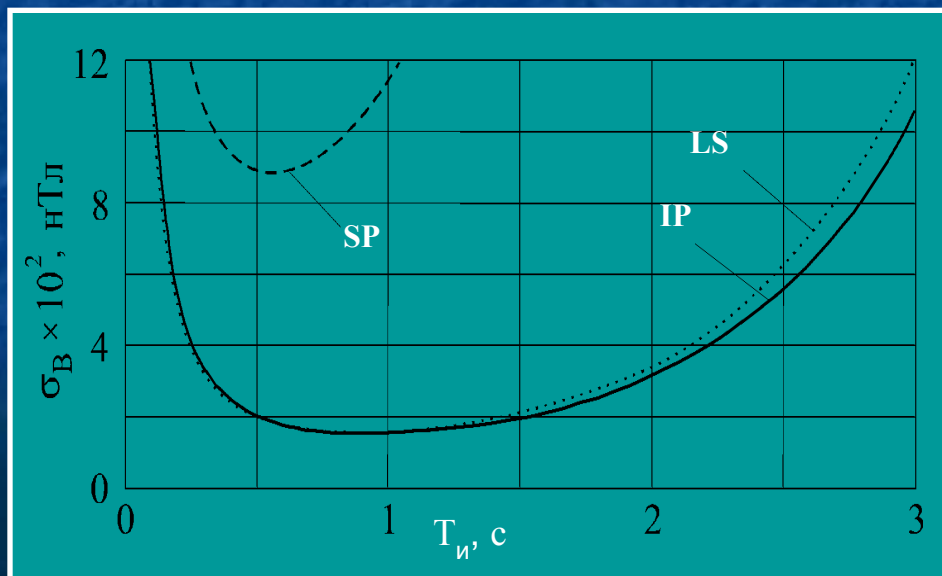
$$\sigma_B^{SP} \cong 6.8 \cdot 10^{-10} (S_0 T_2)^{-1} \sqrt{r w_r / Q}, \quad T_m \approx 1.1 T_2$$

$$\sigma_B^{IP} = \sigma_B^{LS} \cong 2.5 \cdot 10^{-9} S_0^{-1} \sqrt{r / T_2^3}, \quad T_m \approx 1.8 T_2$$

SP – простой периодомер

IP – внутрицикловый периодомер

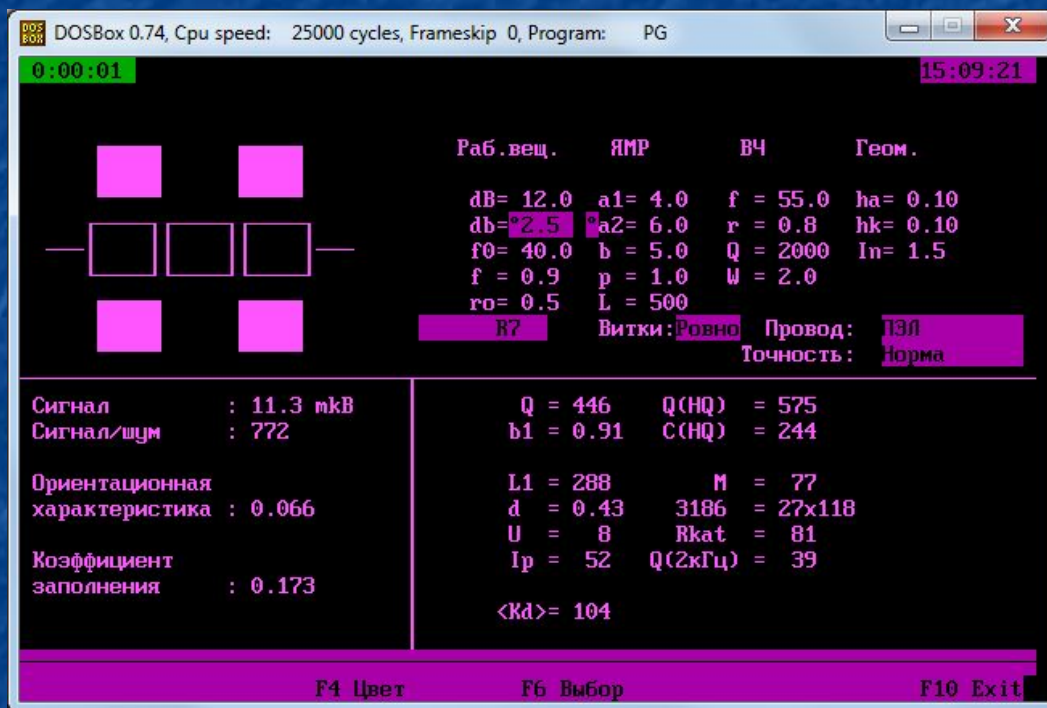
LS – метод наименьших квадратов



# Расчет и Оптимизация Сигнала и СКО протонного датчика совмещенного с Оверхаузеровским датчиком

- Рполяризации = 10 Вт
- T2relax = 1.5 сек для 3 сек. цикла с синхронной поляризацией
- Длина b полукатушки 50 мм
- Каркасы 2 мм
- Индуктивность 500 мГн

A2 мм	50	60	70	80
R Ом	324	153	105	79
Q	19	41	60	80
U	57	39	32	28
S мкВ	0.98	1.15	1.14	1.08
S/N	33	83	119	151
СКО	0.02	0.015	0.012	0.011

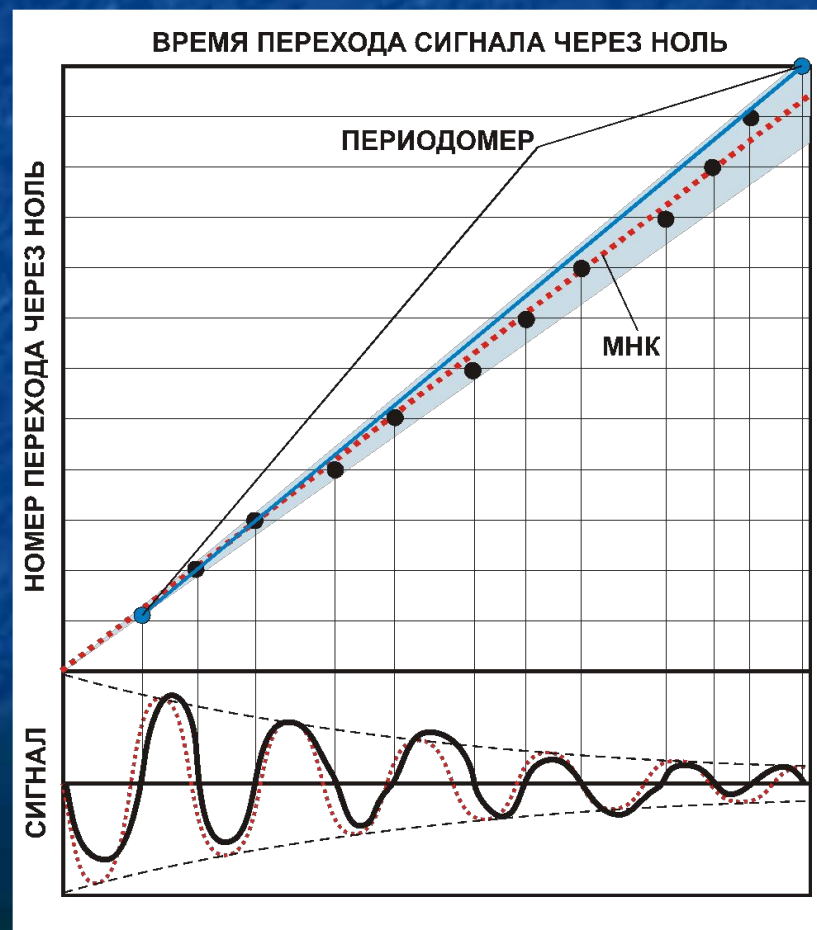


Протонник 4 Вт (ср. мощь.) СКО = 0.015 нТл > Military  
Оверхаузер 1 Вт (ср. мощь.) СКО = 1.5 пикоТл >> Military

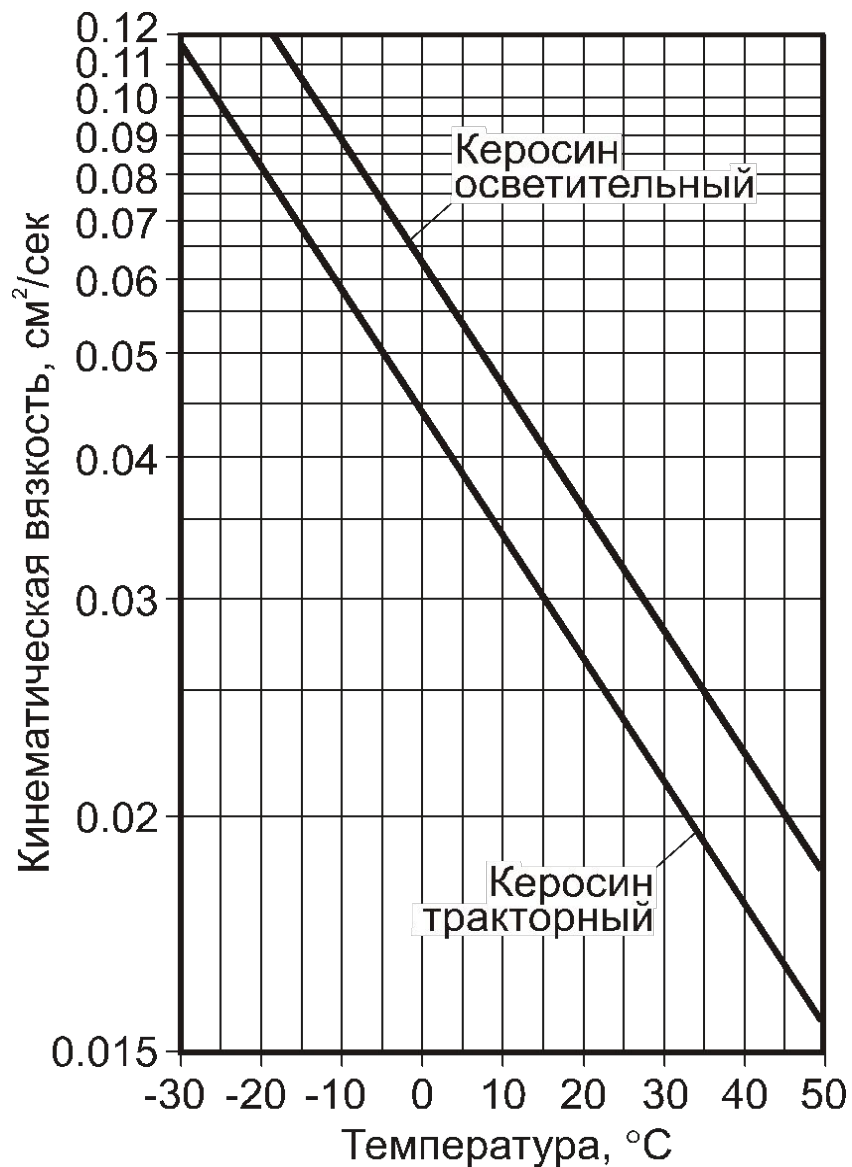
# Что такое оптимальная оцифровка?

<p><b>Периодомер:</b> Запуск таймера с фиксацией времени последнего периода и фиксацией или подсчетом числа периодов. Средний период рассчитывается по крайним точкам пересечения через «0». Если последний период утонул в шумах, то ... «Швах».</p>	<p>СКО определяется <math>S/N</math> первой и последней точек периодов прецессии – «голубой раструб» на рисунке. N интегральный шум, который уменьшается при сужении полосы регистрации, НО, это ограничено переходными процессами и точностью настройки на резонанс с появлением дополнительных погрешностей!</p>
<p><b>ФАПЧ</b> - попытка подстраивать резонанс усилителя или ГУН (упр. генератор) в процессе обработки.</p>	<p>Лучший прибор этого типа – протонный ММП-203, где ФАПЧ с «быстрым – грубым» и «уточняющим» периодами настройки делали мастера НПО «Геологоразведка».</p>
<p><b>Внутрицикловый МНК-периодомер:</b> Запуск таймера с фиксацией времени части или всех периодов прецессии с вычислением среднего периода по МНК – метод наименьших квадратов, в соответствии с корреляционными свойствами шумов.</p>	<p>СКО определяется <math>S/J</math>, т.е плотностью шума. Фактически работает множество простых МНК периодометров параллельно по всем выборкам периодов прецессии – «красный пунктир» МНК на рисунке. «Почти» не требует, и даже «наоборот», сужения полосы – эффект широкополосности. Так работают GSM и POS.</p>

Чем красивей сигнал прецессии на осциллографе, тем лучше? Умножить добротность? Сузить полосу до 0-ля? Применить супер-АЦП и Фурье процессор? ДА! Красиво, но НЕТ, т.к. есть оптимальная мат. обработка!



# Полярная опция POS-1 магнитометра



Вязкость жидкости  $\eta$  определяет время релаксации  $T_{10}$   
 $\eta \cdot T_{10} / T \approx C$  (const)  
При низких температурах короткое  $T_{10}$  керосина на порядки ухудшает СКО протонных датчиков. Растущая растворимость парамагнитного кислорода также уменьшает  $T_{10}$

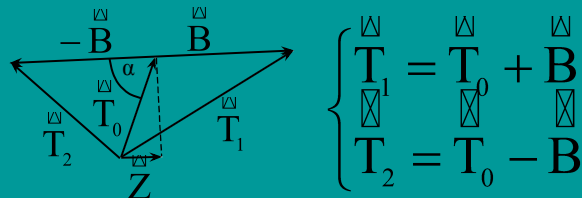
Вакуумирование и маловязкие жидкости с  $T_{10} = 7-10$  сек при н.у. улучшают протонный датчик, но перспектива развития требует значительных усилий

Серийный POS-1 ( $T_1 \approx 1$  сек. при н.у.) задается концентрацией радикала в вакуумном объеме) показывает  $< 0.05$  нТл при температурах до  $-30^\circ\text{C}$ . Хорошая перспектива до  $-60^\circ\text{C}$  при чувствительности до 0.01-0,003 нТл.

# Векторные абсолютные магнитометры на базе скалярного POS-1



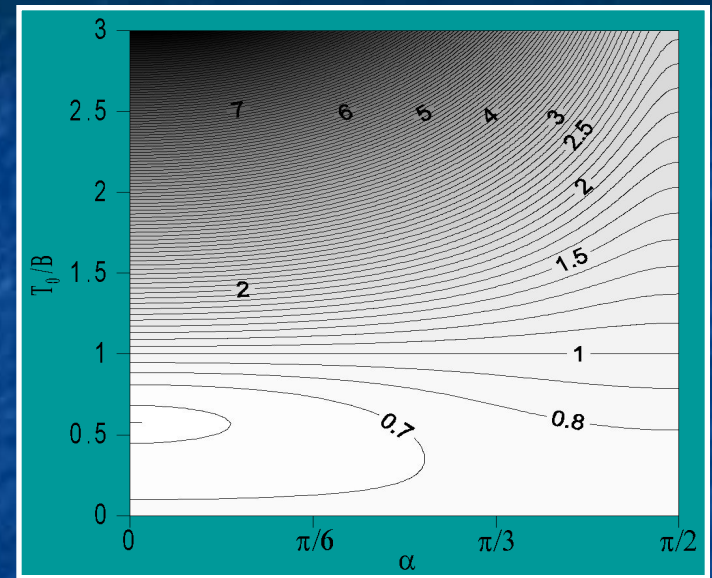
Метод коммутации подмагничивающего поля



Чувствительность по Z

$$\sigma^2(Z) = \frac{\sigma^2(T)}{2} \left\{ 1 + \left( \frac{T_0}{B} \right)^2 - \left( \frac{T_0}{B} \cos(\alpha) \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{T_0}{B} \right)^2 \right] \right\}$$

Обс. КЛЮЧИ  
г. Новосибирск  
Авт. С.Хомутов



GEM System  
dDdI+T GSM19  
вариометр

Макет ZHT оверхаузеровского магнитометра с установкой вертикали соленооида Гаррета по жидкостным уровням.

МОДЕЛЬ ЯДЕРНОГО МАГНИТОМЕТРА  
СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Вход:  $y(t) = A(t) \cos(\omega_p t + \phi_p) + U(t)$   
Выход:  $Y(t) = S(t) \cos(\omega_p t + \phi_p) + U(t)$

ПРИЁМНЫЙ КОНТУР

$$|K| \equiv |K(i\omega_p)| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega_p L - 1/\omega_p C)^2}}$$

$$S(t) = |K| A(t)$$

$$C(t) = C(t) e^{-t/\tau_c}$$

$$\omega_p = \sqrt{\omega_p^2 - \tau_c^{-2}}$$

$$\tau_c = 2Q/\omega_p$$

$$Q = \omega_p L/R$$

$$\omega_p = (LC)^{-1/2}$$

ШУМЫ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

$W_d$  - спектральная плотность шумов датчика

$$\rho(t) = \sigma^2(U(t+\tau))$$

Расчёт соленооида Гаррета

Garret System

Отклонение поля от центрального в рабочей области

Входные параметры		Выходные параметры	
Диаметр каркаса Dext [мм]	50	Длина Lint [мм]	63.67
Диаметр Lext [мм]	150	Отношение Jext / Jint	1.07
Поле в центре Bz0 [мТл]	50000	Плотность тока Jext [А/м]	44.05
<b>Однослойная намотка с тоководами</b>		<b>Однослойная намотка с тоководами</b>	
Диаметр провода [мм]	0.5	Число витков	3000
Диаметр провода по меди [мм]	0.44	Входной ток [мА]	22.03
<b>Рабочая область</b>		Общее сопротивление [Ом]	6.57
Ориентация: <input type="radio"/> Правильная <input checked="" type="radio"/> Поперечная	Шунтирующее сопротивление R [Ом]	30.60	<b>Рабочая область</b>
Диаметр рабочей области Dsub [мм]	30	Отклонение поля на границе [мТл]	4.548
Длина рабочей области Lsub [мм]	30	Отклонение поля на х-границе [мТл]	1.217
Оптимизировать <input checked="" type="checkbox"/>	Отклонение поля на z-границе [мТл]	1.217	Среднее поле [мТл]
Длина Lint [мм]	63.67	СКО поля [мТл]	2.615
Шунтирующее сопротивление R [Ом]	30.60	Оценка времени затухания [с]	1.214

Система соленоидов Гаррета

J - линейная плотность тока

Счет Выход