Современные протонные и оверхаузеровские магнитометры для полярных геофизических исследований

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

Лаборатория квантовой магнитометрии им. Г.В. Скроцкого
Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина
Екатеринбург
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
Протонный ▪Асинхронное единичное измерение ▪Синхронная поляризация для непрерывных изм. G856 США Geometriks GSM-19T Канада GEM ММП-203 Геологоразведка РМ-2 Польша ИЗМИРАН разработка на базе ММП-203 ?	**0,3 - 3 нТл** Зависит от намагничен-ности датчика, релаксации Т2 (ширина ЯМР) исходя из S/N и точности кварца и мн. др.	**10 - 300 пикоТл** В зависимости от: ▪тока поляризации ▪цикличности ▪обработки сигнала ▪конструкции датчика ▪плотности S/J	**0,5 - 5 сек** Асинхронный **0,2 - 5 сек** Синхронная поляризация	**3 - 30 Вт** Пиковая **0,05 - 3 Вт** При повторя-ющихся единичных изм.	**Не ограничен** С дозаливом маловязкие протононасыщен-ные жидкости: **Спирты, Керосин, Гептан –Гексан**
Оверхаузеровский протонный ▪Асинхронный ▪Синхронный ▪Непрерывный сигнал GSM-19 Канада GEM МИНИМАГ Геологоразведка POS НИЛ КМ УрФУ LETI Франция	**0,1 - 1 нТл** Зависит от намагничен-ности датчика, релаксации Т2 (ширина ЯМР) исходя из S/N и точности кварца и мн. др.	**2 - 30 пикоТл** В зависимости от: ▪цикличности ▪энергопотребления ▪обработки сигнала ▪конструкции датчика ▪плотности S/J	**0,5 - 5 сек** Асинхронный **0,2 - 5 сек** Синхронная поляризация **0,05 -100 сек** Непрерывный сигнал	**3 - 5 Вт** Пиковая **0,05 - 1 Вт** Средняя с режимом молчания	**До 10 лет** В зависимости от: ▪температуры ▪типа рабочего вещества ▪способов вакуумирования
Оптическая накачка Непрерывный сигнал	**0,1- 10 нТл** Точность и стабильность констант линий спектра	**0,001 - 10 пикоТл** При межцикловом осреднении	**0,01 – 1 сек** Огранечена только частотой Лармора	**10 - 50 Вт** Прогрев **3 - 10 Вт** работа стартовый	**2000 - 5000 часов** Непрерывной работы

Технико-экономическое сравнение коммерчески доступных магнитометров

Спецификации	**НИЛ КМ УрФУ,** www.magnetometer.ru	**ФГУ НПП Геологоразведка** www.geolraz.com	**GEM System** Канада www.gemsys.ca Дилер в РФ www.agtsys.ru		**Scintrex Ltd** Канада-США www.scintrex.com Дилер в РФ www.agtsys.ru		**Geometrics** США www.geometrics.com Дилер в РФ www.agtsys.ru	
Тип технологии датчика и тип магнитометра	**Оверхаузер.** протонный ЯМР **POS - 1, 2, 4**	**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**	**Оптическая накачка** паров Цезия, **G-859**
Разрядность изм., пикоТл	**1**	10	10	**0,1**	10	10	100	10
СКО, пикоТл	**10-30** (3 сек.) 30-50 (1 сек.) 50-90 (0,5 сек.)	30-50 (2 сек). - -	**20** (3 сек) 40 (1 сек) ? (0.5 сек)	**2,5 пТл/Гц** ? по циклам	100 (0,5 сек.) 30 (3 сек.)	6 (0,1 сек)	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	**0.1**	1	2,5 датчик ±0,2	0,5	1.5 + 0,05°C
Быстродействие	до 0,25 сек.	2 сек.	0,2 сек.	0,05-1	0,5-1-3 сек	0,1	3 сек.	0.2 сек
Масса (2 канала) 4 канала	8 кг 11 кг	7 кг Нет	**6 кг**	8-15 кг с батареями	**4,5** кг нет	**5 кг** Без батарей	**4.5** кг	6-9 кг опции
Энергопотребление, max - Вт	3-4 Вт/канал	3-4 Вт/канал	**2,8** Вт/канал	50 Вт старт 12 Вт 20°C	7-10 Вт	15 Вт старт	10 Вт	**10 Вт старт** 5 Вт при 20°C
Контроль качества	**Есть** 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, нТ/м	**20000 40000 форсаж**	7000	10000	13500	≥7000	**40000**	1000	20000
Время жизни датчика	**10 лет**	5 лет	3-5 лет	2000 часов ресурс	Не ограничен с дозаливом	**≥5000 часов** ресурс	Не ограничен с дозаливом	≥3000 часов ресурс
Цена: 1 канал 2 канала 4 канала Дилер РФ ÷ 40%	330 т. р. 413 т.р. **≅ 700 ÷ 1000 т.руб.** ***зависит от опций***	**220 т.р. 270 т.руб.** нет	23000 USD 30000 USD >>100000 USD Sea option	≅30000 USD ≅45000 USD нет	12000 USD 18000 USD нет	18000 USD 23000 USD нет	**8500 USD 12300 USD** Нет	30000 USD Нет Нет

Лучшие коммерчески доступные скалярные магнитометры

Лучшие по технологии рейтинг	Тип технологии датчика	Комментарии
GSM-19 T G-856	***Протонный*** *по методу Паккарда Вариана с регистрацией частоты Лармора протона.*	***Используется для низкоточной наземной магниторазведки*** *или при низкой квалификации операторов благодаря минимальной цене и высокой стабильности вещества (керосин). В России производство прекращено.*
POS GSM-19 МИНИМАГ	***Оверхаузеровский*** *магнитометр является аналогом протонного с Оверхаузеровским усилением сигнала ЯМР.*	***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.*
GSMP-40 SM-5 G-859	***Оптическая накачка*** *паров щелочных металлов с регистрацией электронного эффекта Зеемана по оптическому каналу.*	***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 предан GEM System ГОИ им. Вавилова с эксклюзивом для РФ.*

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.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

PATTERN APPROVAL CERTIFICATE
OF MEASURING INSTRUMENTS

RU.C.34.005.A № 40335

Действительно до
„ 01 „ августа 2015 г.

Настоящее свидетельство удостоверяет, что на основании положительных результатов испытаний утвержден тип магнитометров POS-1,2
наименование средства измерений

ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина", г. Екатеринбург
наименование предприятия-изготовителя

который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 44807-10 и допущен к применению в Российской Федерации.

Описание типа средства измерений приведено в приложении к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя В.Н.Крутиков

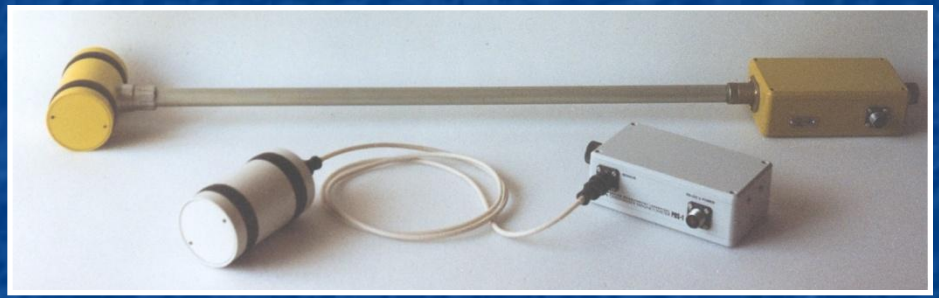
„ 26 „ 08 2010 г.

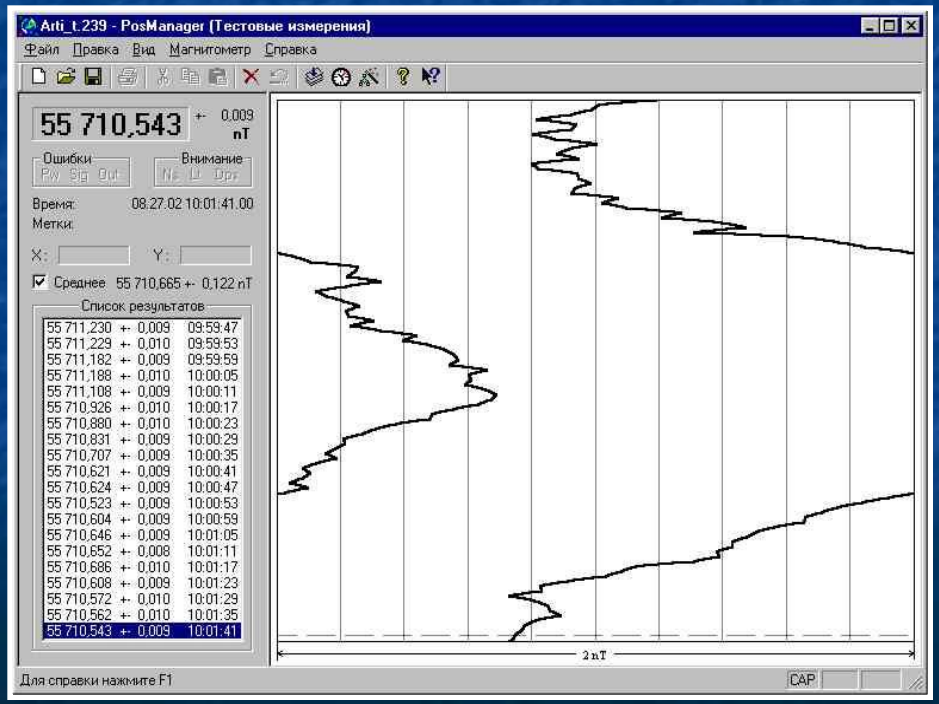
Продлено до
„ „ г.

Заместитель Руководителя

„ „ 20 г.

400335



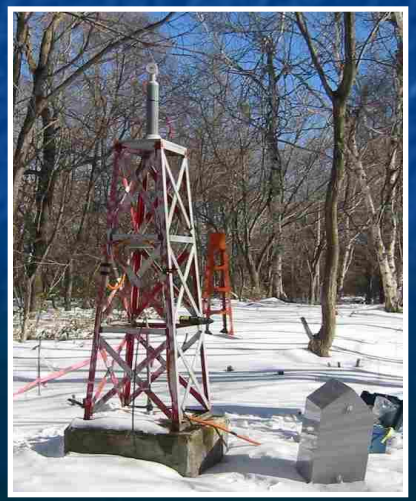


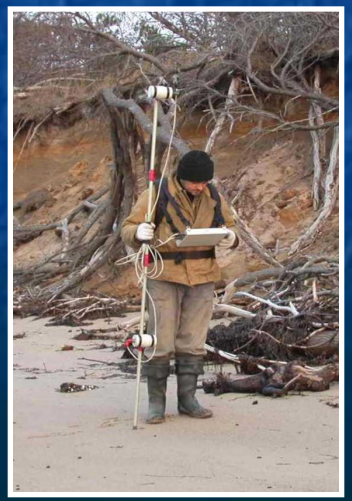
GPS опция POS магнитометра

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

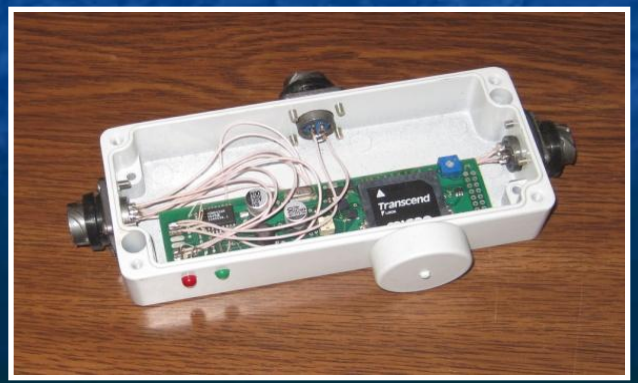
Регистратор DLPOS предназначен для полевых (пикет-маршрутных, GPS) наземных работ и вариационных измерений. Используется на контрольных пунктах и при магнитной очистке территории обсерваторий

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.

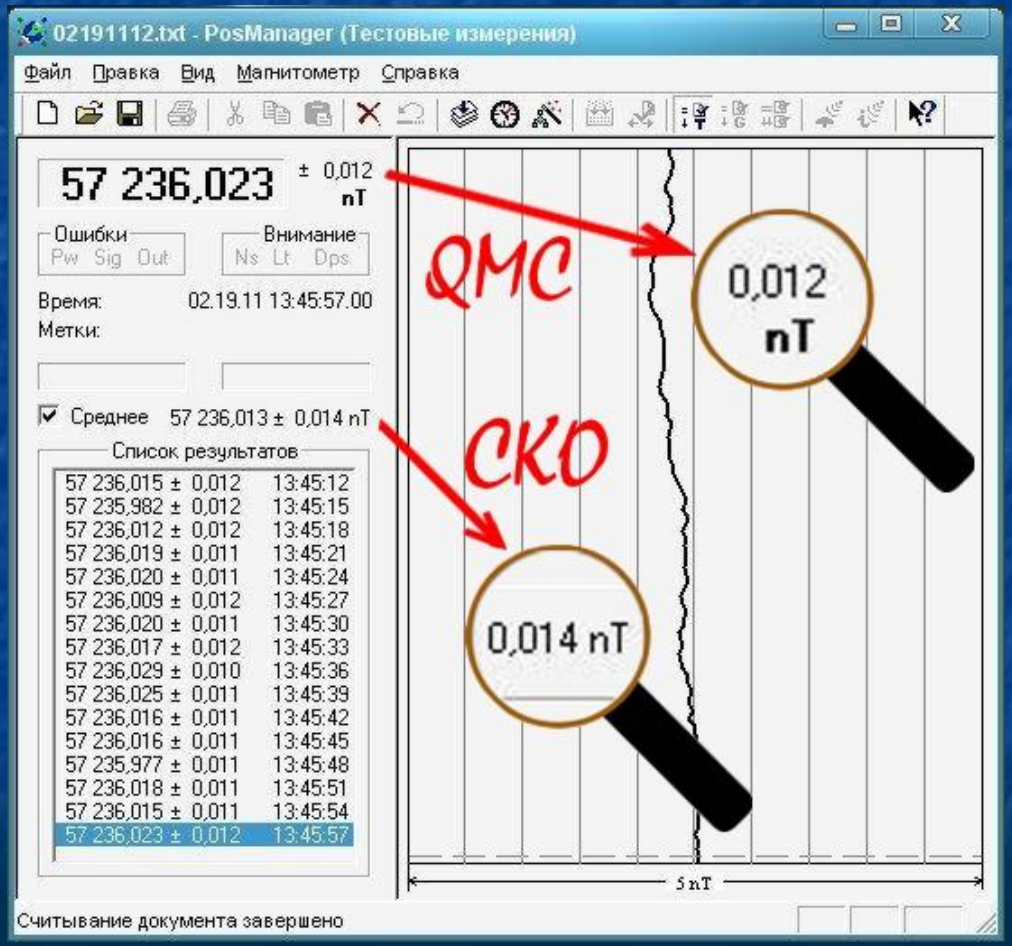
- **2.1.3. Технические требования к прецизионному протонному магнитометру (ППМ).**
- 2.1.3.1. Состав технической продукции
- Прецизионный протонный магнитометр – прибор, осуществляющий непрерывную регистрацию (с максимально возможной частотой дискретизации) …… в различных условиях эксплуатации, в том числе на труднодоступных полярных станциях при отсутствии регулярного обслуживания и проверки.
- 2.1.3.2.1. Должен быть реализован непрерывный режим работы прибора с предустанавливаемым шагом дискретности измерений 1 секунда.
- 2.1.3.2.2. Установка конфигурации прибора должна осуществляется 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.

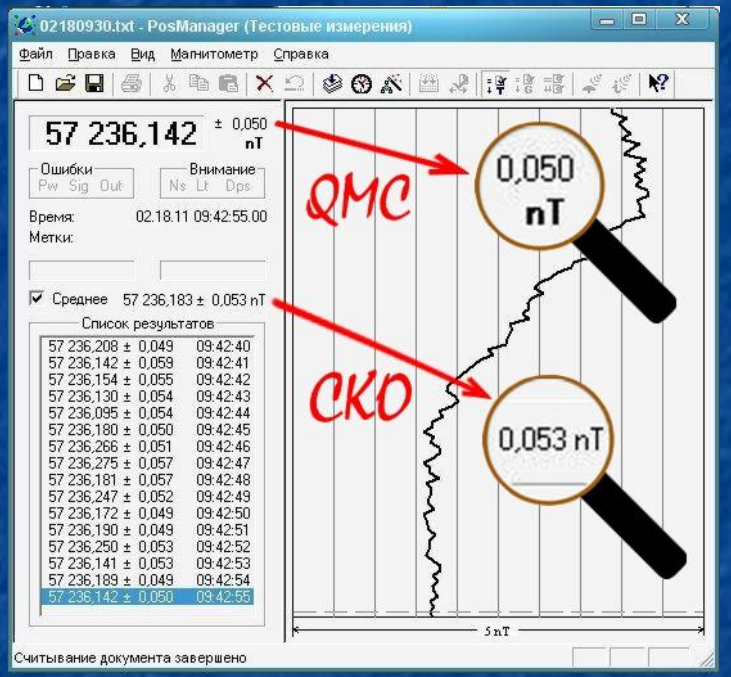
1	Диапазон измерения магнитного поля	20000-75000 нТл	Зачем 20000нТл? Величина протонного сигнала пропорциональна полю, значит требования ужесточаются более 2-х раз.
2	Чувствительность	0,01 нТл	СКО или P-to-P или подразумевалась отсутствующее требование по разрядности измерений? СКО не реализуемо при 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°С 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	Автомати-ческая	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°С	Радует, что не -60°С, 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 ведерным 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	**35000-80000** нТл
2	Разрядность измерений, нТл	0,001	0,001
3	Чувствительность, СКО, нТл	0,01	**0,01 -0,02**
4	Систематическая погрешность	0,3 нТл	**0,5** нТл
5	Рабочий агент	Сверхстабильный раствор нитроксильного радикала	Керосин, гептан, гексан
6	Частота непрерывных измерений	0,5 - 60сек.	**3** - 60сек.
7	Поддержка обмена по последовательным портам	RS-232,	RS-232,
8	Время 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^{-7} сек
12	Напряжение питания	12В, -1В / +**3**В	12В, -1В / +5В
13	Потребляемая мощность цикл измерений 3 сек. Потребляемая мощность цикл измерений 10 сек.	1-2 Вт 0,2-0,3 вТ	3-4Вт 0,6-1 вТ
14	Диапазон рабочих температур	-**10**°С - +60°С	-40°С - +50°С
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 MMPOS-1 № 387 при – 35 град. С ПАНГЕЯ заказчик, ВСЕГЕИ - В. Кузнецов, 74 км. От МО ШАИМ





Цена деления 0.5 нТл

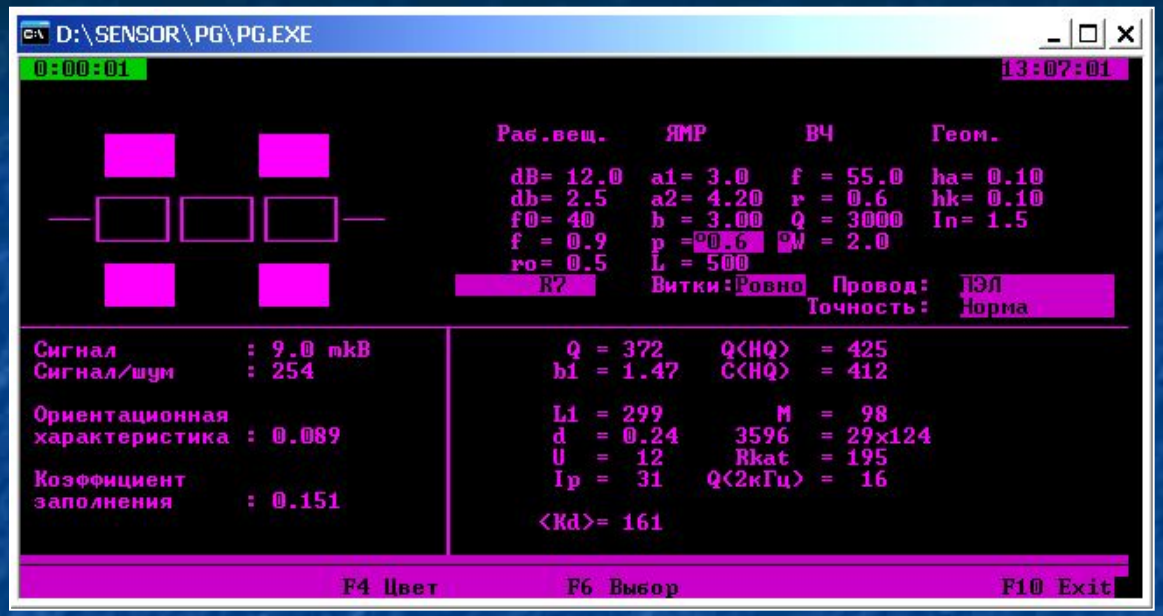
Цикл 3 и 1 сек.

СКО = степень 3/2 цикла

Расчёт и обработка сигнала прецессии

Расчёт сигнала датчика

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



Оценка чувствительности

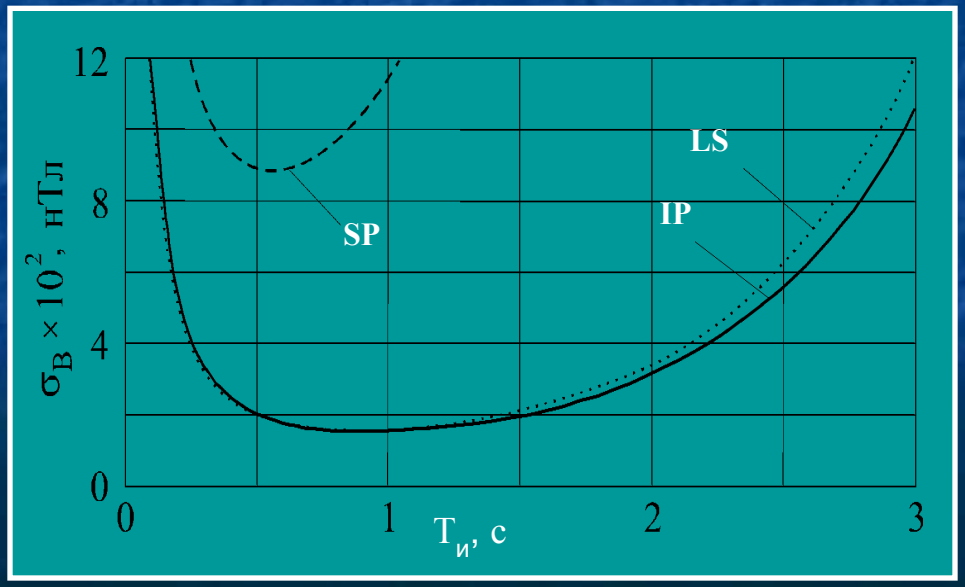
$$\sigma_B^{SP} \cong 6.8 \cdot 10^{-10} (S_0 T_2)^{-1} \sqrt{r w_r / Q}, \quad T_m \approx 1.1 T_2$$

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

SP – простой периодомер

IP – внутрицикловый периодомер

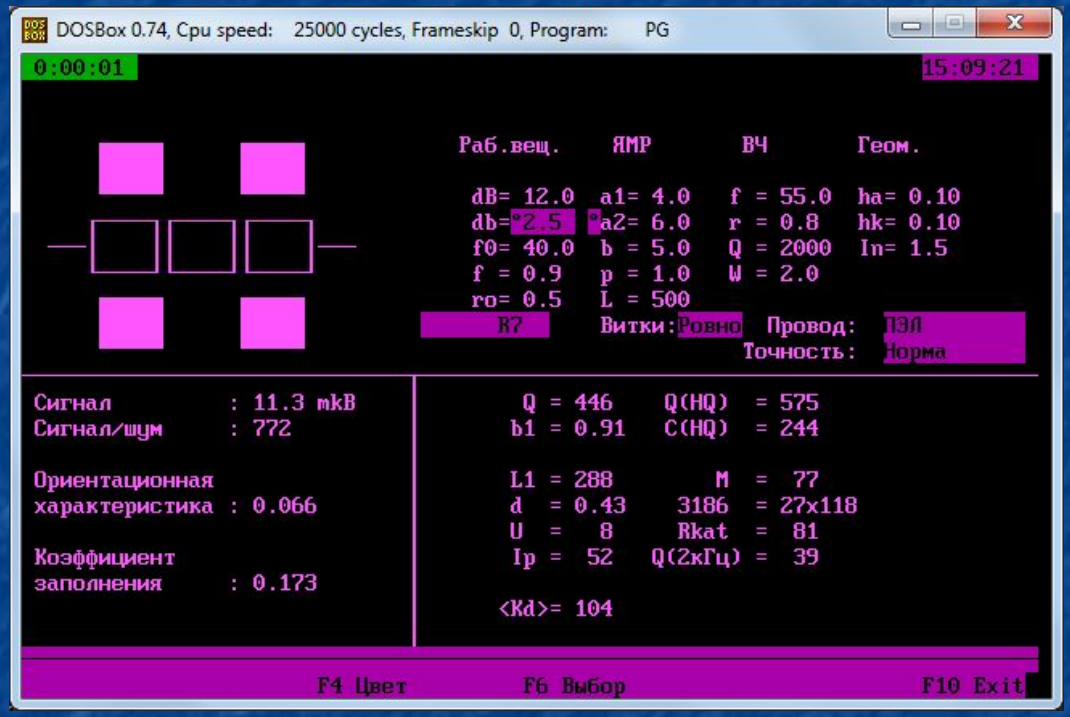
LS – метод наименьших квадратов



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



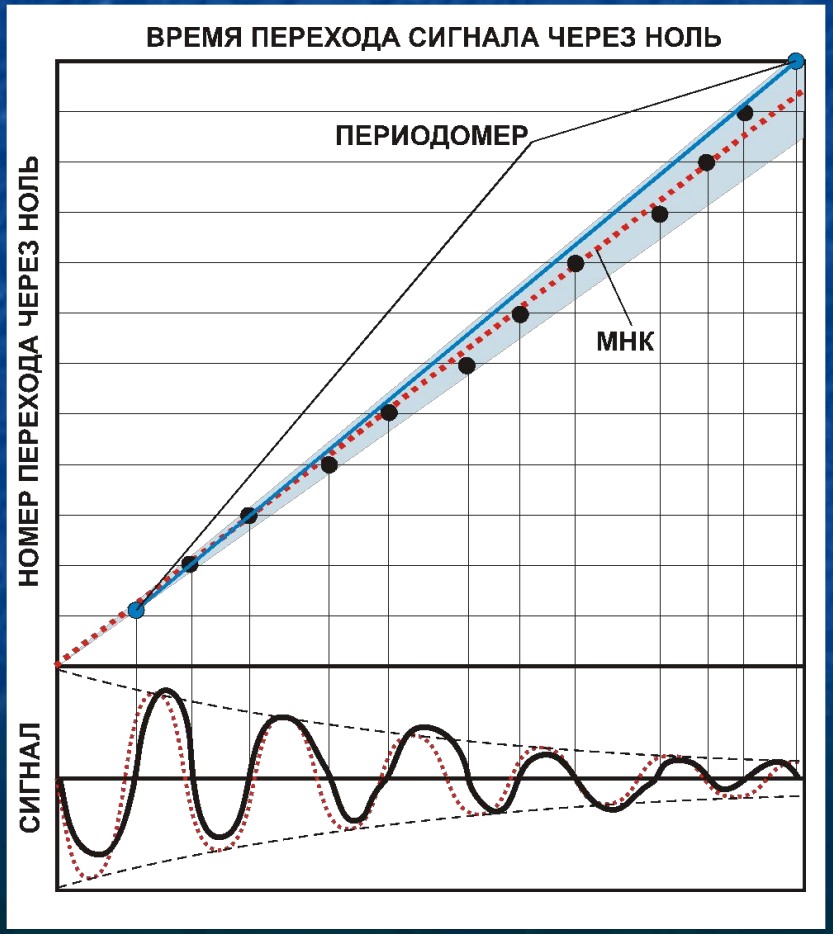
Протонник 4 Вт (ср. мощь.) СКО = 0. 015 нТл > Military

Оверхаузер 1 Вт (ср. мощь.) СКО = 1.5 пикоТл >> Military

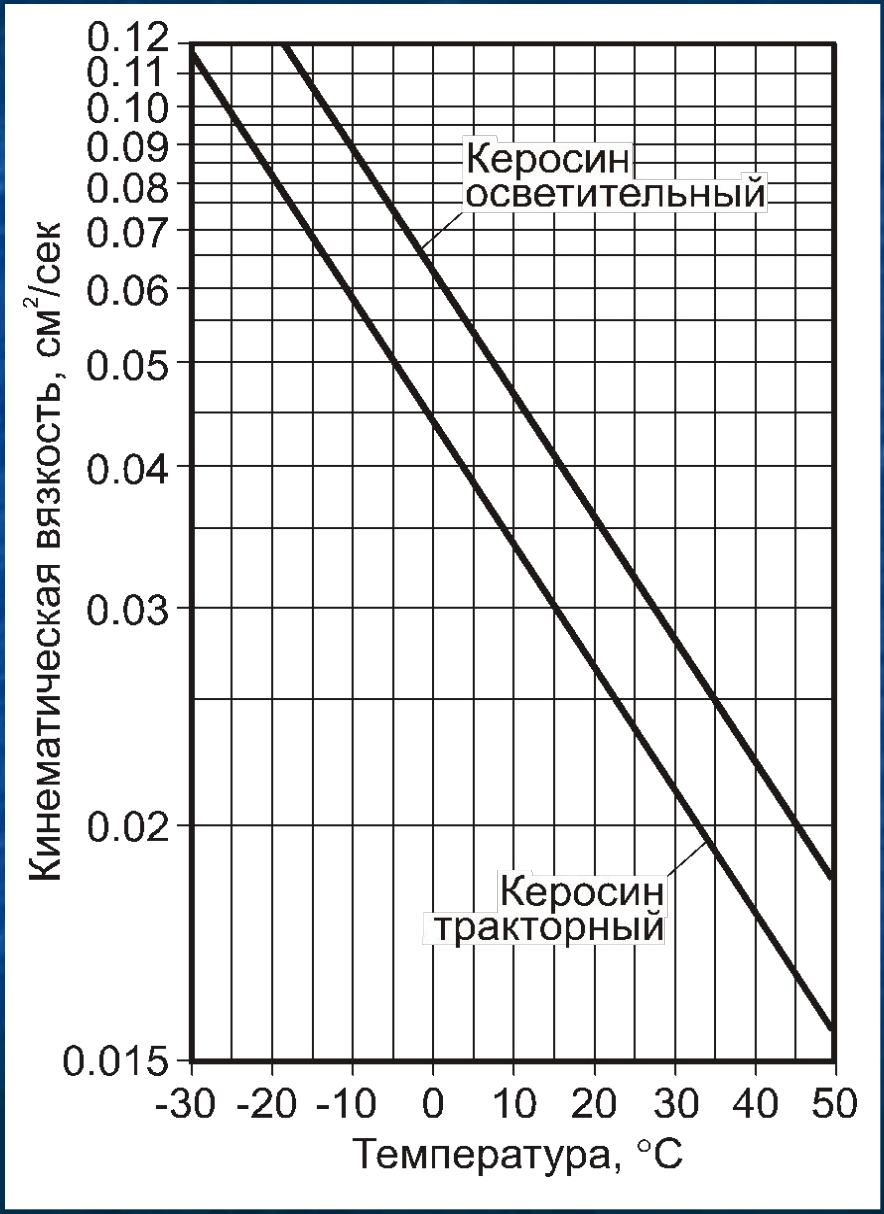
Что такое оцифровка?

Периодомер: 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».**	СКО определяется S/N 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!
ФАПЧ - попытка подстраивать резонанс усилителя или ГУН (упр. генератор) в процессе обработки.	Лучший прибор этого типа – протонный ММП-203, где ФАПЧ с «быстрым – грубым» и «уточняющим» периодами настройки делали мастера НПО «Геологоразведка».
Внутрицикловый МНК-периодомер: 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.	СКО определяется S/J, т.е плотностью шума. Фактически работает множество простых МНК периодомеров параллельно по всем выборкам периодов прецессии – «красный пунктир» МНК на рисунке. «Почти» не требует, и даже «наоборот», сужения полосы – эффект широкополостности. Так работают GSM и POS.

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 η определяет время релаксации T_{10}

$\eta \cdot T_{10}/T \cong C$ (const)

При низких температурах короткое T_{10} керосина на порядки ухудшает СКО протонных датчиков. Растущая растворимость парамагнитного кислорода также уменьшает T_{10}

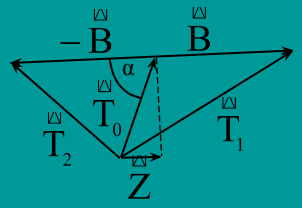
Вакуумирование и маловязкие жидкости с T_{10} = 7-10 сек при н.у. улучшают протонный датчик, но перспектива развития требует значительных усилий

Серийный POS-1 ($T_1 \cong$ 1 сек. при н.у.) задается концентрацией радикала в вакуумном объеме) показывает < 0.05 нТл при температурах до -30°С. Хорошая перспектива до -60°С при чувствительности до 0.01-0,003 нТл.

Векторные абсолютные магнитометры на базе скалярного POS-1

Обс. КЛЮЧИ
г. Новосибирск
Авт. С.Хомутов

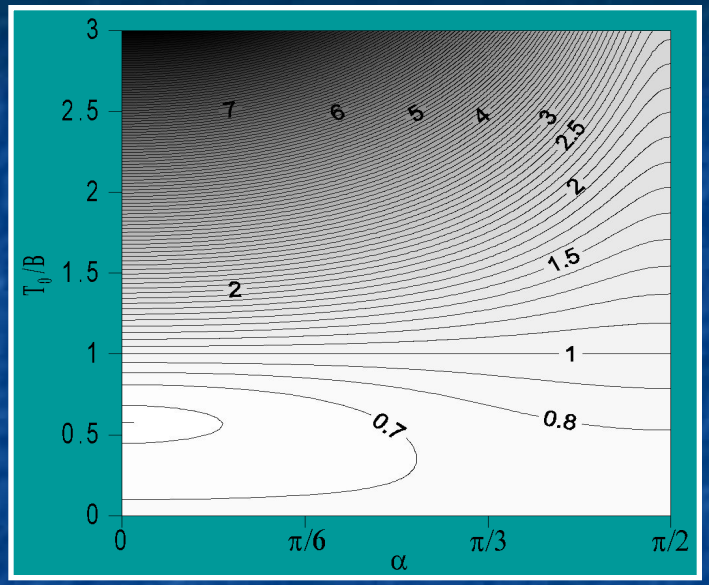
Метод коммутации подмагничивающего поля



$$\begin{cases} \vec{T}_1 = \vec{T}_0 + \vec{B} \\ \vec{T}_2 = \vec{T}_0 - \vec{B} \end{cases}$$

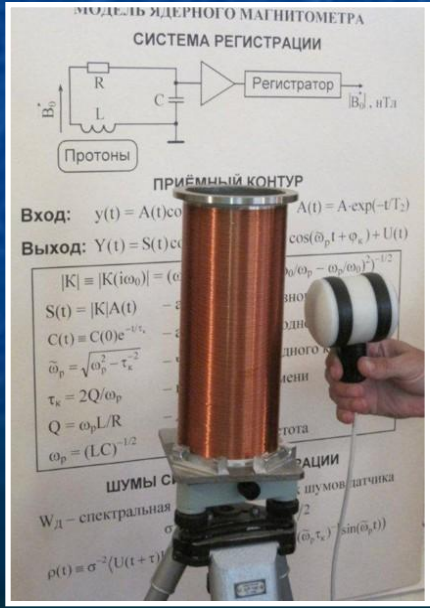
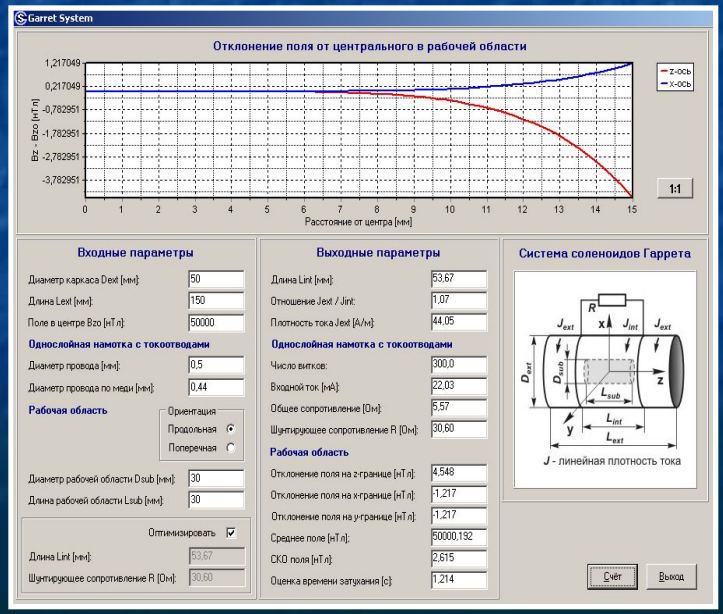
Чувствительность по Z

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



GEM System
dDdI+T GSM19
вариометр

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



Расчёт соленоида Гаррета