

АБСОЛЮТНЫЙ ОВЕРХАУЗЕРОВСКИЙ МАГНИТОМЕТР POS-1 И ОПЫТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЯХ

**В.А Сапунов, А.Ю. Денисов, Д.В. Савельев¹,
С.Ю Хомутов², О.А..Кусонский,
Ю.К. Долманский³, J.L. Rasson³**

1 Лаборатория Квантовой Магнитометрии УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург

2 Институт Геофизики СО РАН, Магнитная Обсерватория «Ключи», г. Новосибирск

3 Институт Геофизики УрО РАН, Магнитная Обсерватория «Аркти», г. Екатеринбург

4 Institut Royal Meteorologique Centre de Physique du Globe, Observatoire Dourbes, Belgique

А н н о т а ц и я

Представлен абсолютный протонный магнитометр POS-1, основанный на эффекте Оверхаузера. Прибор предназначен для геологоразведочных наземных работ, магнитных обсерваторий и мер индукции слабого магнитного поля 1-го разряда. Технические параметры прибора соответствуют и превосходят по ряду параметров иностранные аналоги (диапазон измерений 20000-100000 нТл, абсолютная погрешность $\pm 0,5$ нТл, чувствительность 0,01-0,05 нТл при цикле измерений 3-1 секунда). Представлен организационный и технический опыт внедрения в ряде отечественных и иностранных геологоразведочных и научных организациях. Обсуждается необходимость восстановления или создания новой меры магнитного поля при одной из магнитных обсерваторий Урало-сибирского и Дальневосточного региона.

Оверхаузеровский магнитометр POS-1

Лаборатория квантовой магнитометрии УГТУ-УПИ, длительное время разрабатывающая высокоточные геомагнитометры для различных видов магниторазведки [1], с 1987г. производит, как мало серийное научное оборудование, магнитометры на основе технологии процессорных Оверхаузеровских датчиков POS (Processor Overhauser Sensor), в частности, POS-1, который предназначен для наземных геологоразведочных работ, магнитных обсерваторий, систем сейсмического и вулканического мониторинга, а также мер индукции слабого магнитного поля 1-го разряда [2]. Внешний вид обсерваторского варианта прибора с гибким соединительным кабелем Оверхаузеровского датчика и блока электроники, а также геологоразведочный вариант с жесткой соединительной трубой и фиксатором положения Оверхаузеровского зонда OS-2 показаны на фотографии (рис.1). Технические параметры POS-1 представлены в таблице.

Технические параметры

Принцип действия:	Прецессионный ЯМР измеритель модуля магнитного поля на эффекте Оверхаузера с поляризацией постоянным и ВЧ-полем
Стабильность рабочего вещества (раствор нитроксильного радикала в насыщенных углеводородах [3])	5 лет при 50°C, >10 лет при н.у.
Диапазон измеряемых полей	20000-100000 нТл
Разрядность измерений	0,001 нТл
Чувствительность (СКО изм.) 3 сек. - 1 сек.	0,01 нТл 0,05 нТл
Абсолютная точность измерений	± 0,5 нТл (сертификация УГТУ-УПИ)
Градиентоустойчивость	20000 нТл/м (СКО при максимальном градиенте 55 нТл)
Цикличность измерений	Пользователь может установить однократный или непрерывный режим измерения через порт RS232. Однократное измерение в течение 3 сек. Циклические измерения с периодом 1 сек.
Командные функции, посылаемые терминалом управления или компьютером	- установка времени и даты - выбор периода непрерывных измерений - начальная установка диапазона - пуск однократного измерения - пуск непрерывных измерений - стоп непрерывных измерений
Выходные данные	Трехжильный стандартный RS232 порт (бинарный или текстовый формат): время/дата измерения, величина магнитного поля пикоТл, сообщения ("большой шум", "мало питание", "большой градиент").
Аналоговый выход	Сигнал протонной прецессии Лармора.
Энергопотребление:	2.5 Вт максимум при 10-15 В, 0,05 Вт в режиме ожидания
Температурный диапазон	-30 / +60°C.
Ориентация датчика:	Оптимальная ориентация поля перпендикулярно оси датчика с допуском ±45°. Абсолютная погрешность при ±10°.



Рис. 1. Внешний вид процессорного Оверхаузеровского датчика POS-1

Архитектура магнитометров на основе POS-1 включает в себя собственно процессорный датчик POS-1, который измеряет геомагнитное поле, представляя информацию в обработанном цифровом виде по последовательному интерфейсу RS232, блок регистрации (специализированный или стандартный компьютер), включающий в себя программное обеспечение (интерфейс пользователя) и ряд периферийных устройств, которые также сопрягаются по стандартным цифровым каналам. Данная технология обеспечивает гибкое развитие магнитометрических систем и даже методик их применения, в частности, применение в наземных условиях технологии GPS, т.е. спутникового определения координат с возможностью жесткой синхронизации измерений. Для магнитных обсерваторий в качестве регистратора обычно используется стандартный компьютер, укомплектованный специализированным программным обеспечением VarStat (DOS версия) или POSManager (WIN 32). В качестве примера на рис.2 представлено главное окно POSManager. Данная программа исходно была создана для тестирования POS-1, но при использовании на обсерватории Арти, для регистрации вариаций геомагнитного поля, было предусмотрено ряд опций, которые соответствовали обсерваторским требованиям. В частности, POSmanager обеспечивает ежедневное сохранение данных без остановки измерений с форматом данных, соответствующим обсерваторским требованиям, синхронизацию измерений по часам компьютера по началу минуты (секунды) и т.д. На рис.2 в окне графической визуализации представлен пример реальной записи 239 дня 2003 года (время UTC), масштаб графика 0,2 нТл/деление.

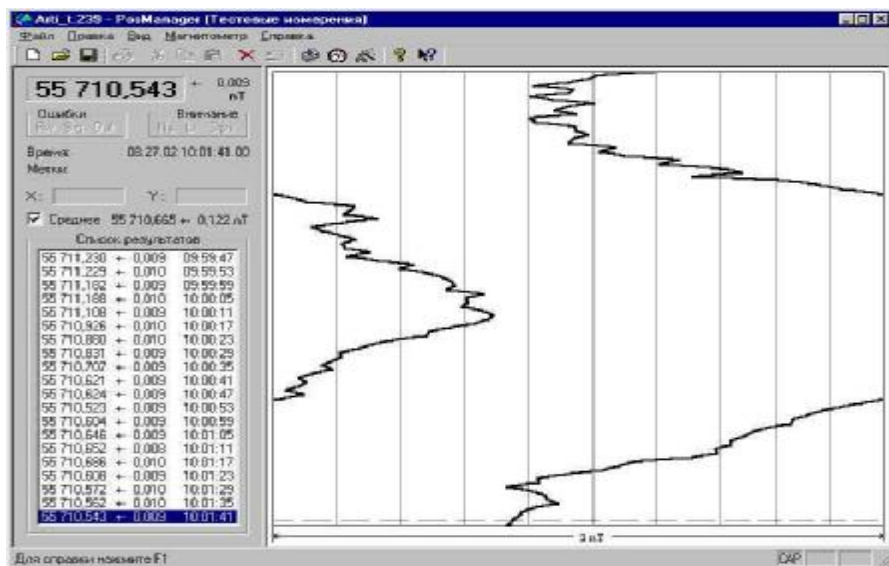


Рис. 2. Программное обеспечение POSManager для обсерваторского применения.

Контроль качества измерений по параметру QMC

Современные протонные магнитометры обработку сигнала протонной прецессии осуществляют с помощью достаточно сложных статистических алгоритмов типа метода наименьших квадратов при регистрации длительности каждого периода протонного сигнала. Это позволяет заметно увеличить чувствительность измерений [4], а также обеспечить новые свойства аппаратуры. Процессорный Оверхаузеровский датчик обладает рядом таких свойств, которые отсутствуют в аналогичной аппаратуре (например, GSM-90 фирмы GEM System), в частности, в формат выходных данных входит параметр не имеющий аналогов, а именно QMC (Quality of Measurement Condition). На рис.2 рядом с текущим значением поля выведен этот параметр (+0,009 нТл), который дает прогноз чувствительности (СКО) для единичного измерения. QMC основан на анализе шумовых свойств периодов сигнала прецессии и фактически соответствует СКО в стабильном магнитном поле. Рис. 3 демонстрирует запись вариаций градиентометром POS-2, с помощью которого исключили вариации поля и сопоставили СКО градиента, пересчитанного на один канал, и параметр QMC. Параметр QMC контролирует величину сигнала, уровень внешних помех, длительность сигнала и на основании расчета в предположении гауссового шума представляет прогноз чувствительности в единицах поля.

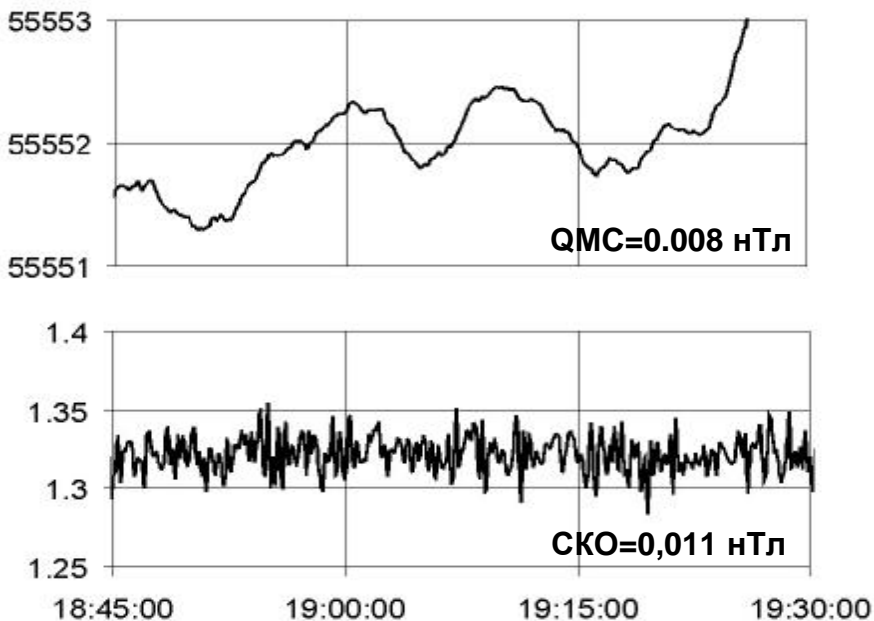


Рис. 3. Запись вариаций поля и градиента для демонстрации контроля чувствительности единичного измерения с помощью параметра QMC (обсерватория Арти, 1999г, цикл измерений 3 секунды).

В магнитометре POS-1 для исключения ошибочных показаний, которые могут быть вызваны одиночными импульсами, помехи, например, молнией или другими техногенными помехами, используется критерий NCE (Noise Criterion Estimation, на жаргоне «Отрубаловка»). Суть параметра NCE - сравнение максимальных отклонений длительностей текущих периодов от начального периода на некий заданный уровень (порядка 10%) и прекращение статистической внутрициклового обработки периодов. Этот же прием обеспечивает высокую градиентоустойчивость измерений POS-1, т.е. при укорачивании сигнала протонной прецессии длительность измерения остается оптимальной для данного градиента, хотя, естественно, при срабатывании «Отрубаловки», чувствительность измерений ухудшается. Рис. 4 демонстрирует запись геомагнитных вариаций на обсерватории «Ключи» ИГФ СО РАН при прохождении грозового фронта. Интересно отметить, что ухудшение качества измерений практически не заметно по графику вариаций, но четко прослеживается по QMC, который представлен ниже графика вариаций.

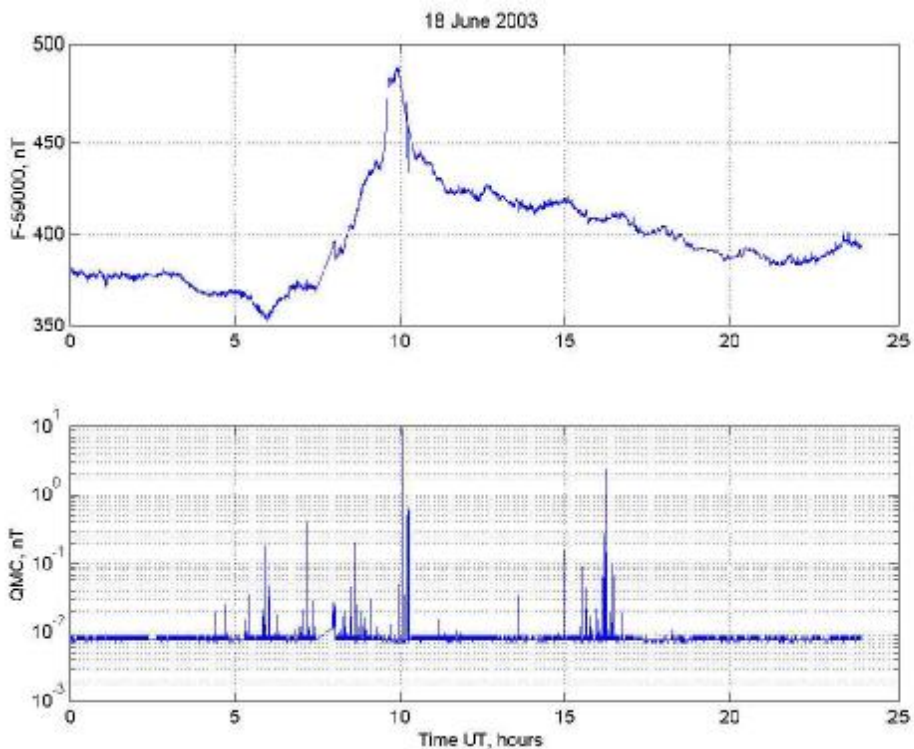


Рис. 4. Регистрация грозового фронта по параметру QMC при записи вариаций поля.

Абсолютная погрешность измерений POS-1

Для многих абсолютных магнитометров, таких как протонные и Оверхаузеровские, гелиевые, щелочно-гелиевые и калиевые магнитометры с оптической ориентацией атомов, имеется утверждение, что они являются абсолютными измерителями, как основанные на мировых константах (гиромагнитном отношении протона и соответствующих спектроскопических константах). С одной стороны, это действительно так, но имеется ряд измерительных особенностей, как самой процедуры измерения частоты, так и свойств датчика, которые должны тщательно рассматриваться, для того чтобы обеспечить абсолютность измерений магнитометров на уровне долей нТл в диапазоне геомагнитного поля. Этим вопросам посвящено множество работ, и, в частности, для протонных Оверхаузеровских магнитометров, имеется несколько источников погрешностей на уровне 0,1-1 нТл [5].

Фактически, уклоняясь от обсуждения серьезных метрологических проблем, для обеспечения высокой абсолютной точности измерений необходимо придерживаться некоей стандартной процедуры, основанной на наличии эталонов магнитного поля. В России источником единого измерительного стандарта является государственный эталон магнитного поля, по которому должны калиброваться вторичные эталонные магнитометры и меры магнитного поля. В рамках системы международной сети обсерваторий IAGA в качестве стандарта приняты протонные Оверхаузеровские магнитометры. В рамках последней методики была проведена эталонировка магнитометра POS-1 относительно магнитометра GSM-90. Калибровка производилась по проекту INTAS (CRENEGON - THE CREATION OF A RENEWED NETWORK OF BASIC GEOMAGNETIC OBSERVATORIES OF NIS COUNTRIES). Методика калибровки изложена в [6] и заключается в синхронной регистрации вариаций поля двумя магнитометрами с последующей переменной датчиков (метод сбивки – определение градиента и разности показаний). На рис. 5 представлен пример калибровочных записей пяти магнитометров POS-1 относительно GSM-90 Королевского института метеорологии (Бельгия).

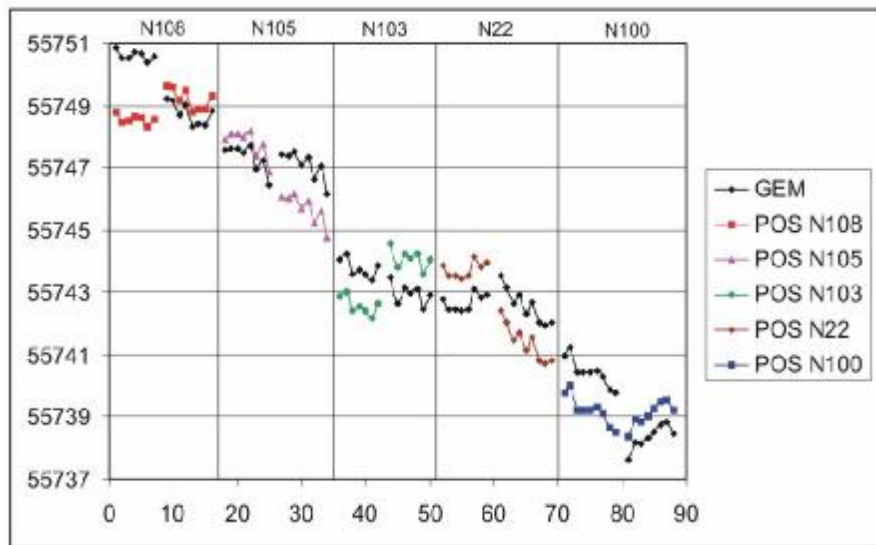


Рис. 5. Калибровка POS-1 на обсерватории Арти относительно эталонного GSM-90.

Пример, приведенный на рис. 5, не является качественной записью, т.к. было установлено, что необходимо выбирать место для «сбивки» магнитометров, которое помимо малости градиента должно обеспечивать стабильность градиента вне зависимости от скорости вариаций.

Соответствующая площадка была найдена при использовании геологоразведочного градиентометра POS-2 с полевым регистратором DLPOS вне территории обсерватории Арти, где калибровочные измерения показали, что датчики POS-1 способны обеспечивать точность лучше 0,1 нТл.

Основное назначение абсолютных протонных Оверхаузеровских магнитометров в рамках обсерваторской практики – это составной элемент стандартной методики определения базовой линии для вариационных компонентных магнитометров, например, феррозондовых вариометров. По инициативе С.Ю. Хомутова (ИГФ СО РАН) были проведены исследования по определению базовой линии модуля поля, найденной по данным абсолютного магнитометра POS-1 и феррозондового компонентного магнитометра LEMI. (Рис.6 представляет пример такой синхронной записи вариаций модуля поля и разности между двумя пирами, на которых были установлены упомянутые магнитометры).

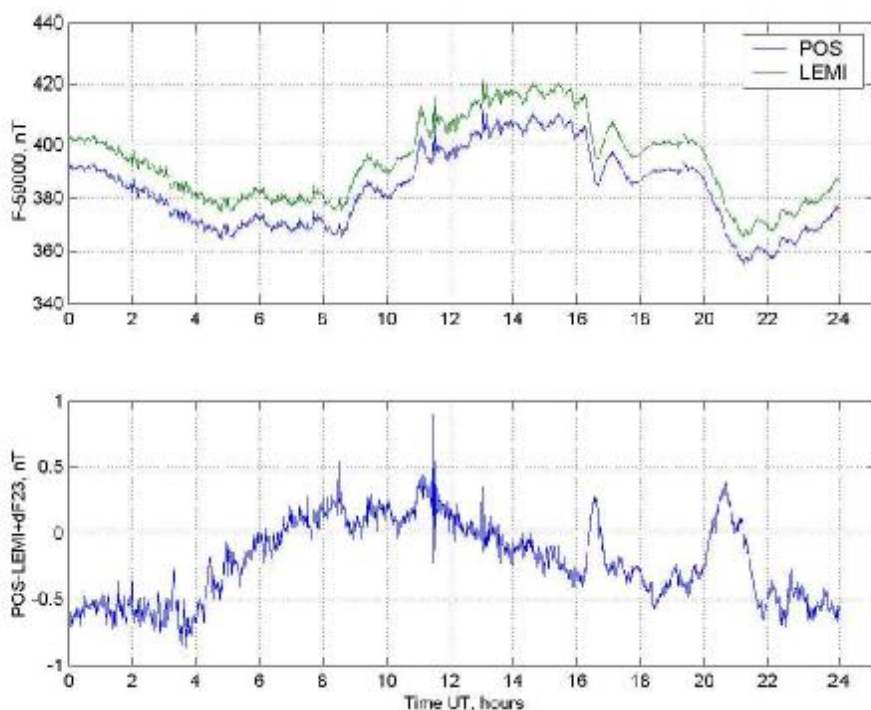


Рис. 6. Пример синхронной записи вариаций модуля поля и разности между двумя пирами, на которых были установлены абсолютный магнитометр POS-1 и феррозондовый компонентный магнитометр LEMI.

Разность измерений между POS-1 и LEM1 представлена с учетом предварительно определенного градиента поля. Нестабильность представленной разности является достаточно серьезным методическим вопросом, поскольку находится на уровне современных требований обсерваторской практики. Имеется несколько предположений по интерпретации представленного факта, и наиболее вероятным является предположение С.Ю. Хомутова о недостаточной точности юстировки осей компонентного магнитометра LEM1 как относительно географических направлений, так и взаимной не перпендикулярности осей компонентных феррозондов. Аналогичные результаты были получены по другим типам феррозондовых магнитометров иностранными исследователями (см. сборник трудов конференции [7]). Естественно, можно высказать еще множество предположений и давать рекомендации по абсолютным измерениям модуля и компонент поля, а также по методам калибровки соответствующих магнитометров, но эти предположения будут достаточно голословны, если не будут опираться на калибровочные эксперименты, проведенные на сертифицированной мере индукции магнитного поля.

В настоящее время в России утрачен ряд эталонов магнитного поля, в частности мера индукции поля 1-го разряда Уральского института метрологии (сдана на цветной металл вандалами). Такая ситуация существенно ограничивает достоверность калибровки обсерваторских магнитометров и является недопустимой, учитывая возрастающие требования международной обсерваторской практики. Фактически стоит задача создания меры геомагнитного поля при одной из обсерваторий Уралосибирского региона и Дальнего Востока. Кстати аналогичные задачи были сформулированы на ассамблее IUGG 2003 года (далее цитата из решения IAGA Working Group V.1): “4. Magnetic induction standard of observatories for VIPM/CCEM. J. Rasson informed the meeting about an initiative by the Russian agency for metrology in St. Petersburg to establish a **M**agnetic **I**nduction Standard in the **G**eomagnetic **R**ANge (MIGRAN). Everybody interested in this project should contact J. Rasson».

В заключении авторы приносят благодарность CRENEGON Infracstructure Action IA-01-01, которая позволила провести ряд представленных выше исследований.

Л и т е р а т у р а

1. *Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В.* Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972.
2. *Сапунов В.А., Савельев Д.В., Денисова и др.* Современные протонные Оверхаузеровские магнитометры: возможности и перспективы в области геологоразведки // Международная геофизическая конференция: Тез. докл. Санкт-Петербург, 2000. С. 423-424.

3. Сапунов В.А., Дорошек А.С., Соболев А.С. и др. Магнитометр с динамической поляризацией ядер. // Авторское Свидетельство №1484103. 1988.
4. Денисов А.Ю., Сапунов В.А., Дикусар О.В. Расчет погрешности измерения ядерно-прецессионного магнитометра // Геомагнетизм и аэрономия, 1999. Т.39, №6. С. 68-73
5. V. Sapunov, A. Denisov, O. Denisova. Proton and Overhauser magnetometers metrology. // Contributions to Geophysics & Geodesy, 2001. V. 31, N1. P.119-124.
6. J. Jankowski, C. Sucksdorff. IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. Warsaw, 1996.
7. Contributions to Geophysics & Geodesy. 2001.V. 31, N1, Ixth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing.