

# Оверхаузеровский компонентный магнитометр POS-4: результаты непрерывных измерений в 2015-2016 гг. на Геофизической обсерватории "Паратунка" ИКИР ДВО РАН, Камчатка

ХОМУТОВ С. Ю.<sup>1</sup>, САПУНОВ В. А.<sup>2</sup>, ДЕНИСОВ А. Ю.<sup>2</sup>, САВЕЛЬЕВ Д. В.<sup>2</sup>,  
БАБАХАНОВ И. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, МИП "НПЦ квантовой магнитометрии" г. Екатеринбург, Россия

e-mail: khomutov@ikir.ru, vsapunov@gmail.com

На магнитных обсерваториях (МО) ведутся непрерывные наблюдения за магнитным полем Земли, на характерных временах от секунд до десятков лет. Для того, чтобы обеспечить корректные результаты в таком широком интервале частот, на МО современной сети INTERMAGNET используются два типа приборов: (1) вариометры, обеспечивающие высокую частоту и чувствительность, однако зачастую измеряющие только вариации и/или не имеющие долговременной стабильности, и (2) магнитометры, измеряющие магнитное поле в абсолютном смысле (полный вектор), но медленные и в общем случае требующие ручной работы. Совместное использование магнитометров этих двух типов дает возможность получать приемлемые результаты, соответствующие стандартам INTERMAGNET [1]. Современные материалы, новые цифровые технологии, процессорные системы позволяют ставить вопрос о создании автоматического прибора, обеспечивающего функции и вариационного, и абсолютного магнитометров. Подобный высокопроизводительный абсолютный магнитометр AutoDIF для практически непрерывного измерения склонения и наклона разработан в Метеорологическом институте (Бельгия, [2]). Естественными абсолютными приборами для измерения модуля поля являются скалярные магнитометры, например, оверхаузеровские POS-1 или GSM-19W. Однако, задача абсолютных измерений полного вектора поля до сих пор аппаратно не решена. Одной из попыток является разработка векторного магнитометра POS-4 (Лаборатория квантовой магнитометрии Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, <http://magnetometer.ur.ru>).

## Аппаратура, условия измерений

Векторный магнитометр POS-4 является новой разработкой; частично технические и методические вопросы POS-4 были решены в двухкомпонентном варианте магнитометра POS-3 [3]. POS-4 позволяет непосредственно измерять модуль магнитной индукции  $F$  и две ортогональные составляющие — вертикальную  $Z$  по оси соленоида Гаррета и горизонтальную проекцию вектора  $F$  на ось системы двойных колец Гельмгольца. Кроме того, измеренные  $F$  и  $Z$  позволяют вычислить горизонтальную составляющую  $H$ . Магнитометр включает первичный преобразователь POS-1, источник высокостабильного тока и магнитные системы, создающие однородное коммутируемое магнитное поле:

- на базе соленоида Гаррета с титановым каркасом, вертикаль которого юстируется по жидкостным уровням не хуже  $10''$ , для измерения вертикальной компоненты  $Z$ ;
- на базе титановой колечной системы, перпендикулярной оси соленоида Гаррета, для измерения горизонтальной проекции вектора  $F$  на ось колец в произвольном азимуте.

Для установки на постамент используется немагнитная подставка (трегер) с горизонтальной шкалой. Связь с компьютером обеспечивается по протоколу RS232, для управления и регистрации используется штатная программа POS Manager. Чувствительность по



Рис. 1. Векторный магнитометр POS-4. На левой панели: слева – источник бесперебойного питания, в центре – датчик (соленоид и колечная система на трегере), справа – электронный блок. На правой панели: павильон POS-4 – датчик магнитометра установлен на постаменте из стеклблоков, дверь в павильон съемная, на латунных болтах (март 2016 г.)

модулю  $F$  составляет около 0.03-0.05 нТл, по компонентам  $ZH$  — около 0.15-0.30 нТл, абсолютная погрешность по модулю не более 1 нТл, по компонентам — 3-10 нТл, цикличность измерений от 1 до 5 с. POS-4 в некоторой степени является аналогом магнитометра dIdD GSM-19FD канадской фирмы GEM Systems, однако он позволяет оценивать в абсолютном смысле не только модуль  $F$ , но и вертикальную составляющую  $Z$ , а при точной ориентации колечной системы – и одну из горизонтальных составляющих ( $X/Y$ ). Фото прибора представлено на рис. 1(левая панель).

Магнитометр POS-4 был приобретен ИКИР ДВО РАН в декабре 2014 г. в рамках гранта РФФИ [4]. Одной из задач была оценка возможности перехода на оборудование российского производства. POS-4 в значительной степени является экспериментальным, это требовало выполнения различных работ (настроек, регулировки, тестирования), согласованных с разработчиком. Кроме того, дополнительные (подмагничивающие) поля, создаваемые соленоидом и колечной системой, оказывают влияние на магнитометры, находящиеся в непосредственной близости. Поэтому для POS-4 был построен специальный немагнитный павильон из бруса размером около 2х2 м с утеплителем (пенополистирол толщиной 10 см) с внутренней стороны. Постамент изготовлен из стеклблоков на немагнитном основании, заглубленным в грунт на 1 м, и имеет сечение 40х40 см<sup>2</sup>, на верхней части приклеена стеклянная пластина. Для снижения уровня возможных помех в павильон не заведено электропитание 220 В и не предусмотрена активная термостабилизация, однако температура внутри непрерывно регистрируется цифровыми термодатчиками на трех высотных уровнях. Общий вид павильона и расположение датчика POS-4 показаны на рис. 1(правая панель). Регистрирующий ноутбук и источник бесперебойного питания установлены в техническом павильоне, на расстоянии около 20 м, штатный кабель связи-питания проложен по поверхности. Система заземлена на шину у технического павильона. Магнитометр не имеет GPS-синхронизации, привязка к UTC выполняется по системному времени ноутбука при запуске измерений; используемый в системе внутренний прецизионный генератор обеспечивал стабильность таймера в течение месяца и более.

В апреле-мае 2015 г. проводилось тестирование магнитометра в различных режимах работы, при различной ориентации колечной системы (осью на магнитный север, поперек,

по географическим направлениям). В июне датчик был окончательно сориентирован осью колечной системы на географический "восток-запад". Программа POS Manager обеспечивает запись в файлы результаты измерений пяти модулей (при полях подмагничивания разной полярности, создаваемых соленоидом и колечной системой, и непосредственно измеренный), дату, время, параметр качества измерения QMC, а также вычисленные значения составляющих Z и X, Y-элементов (X – проекция горизонтальной компоненты вектора поля на ось колечной системы). В дальнейшем использовались только пять исходных значений модулей, компоненты поля вычислялись при обработке, без применения каких-либо процедур чистки, сглаживания и т.п. Непосредственно и независимо получаемые с помощью POS-4 элементы поля — F, Z (проекция на ось соленоида), Y (проекция на ось колечной системы). Предполагается, что все компоненты измерены в один момент времени (при полном цикле 5 с). По полученным F, Z, Y вычислялись остальные составляющие.

## Результаты измерений

Регулярные измерения магнитного поля с помощью POS-4 начаты в июне 2015 г. Как и для остальных магнитометров обсерватории, для POS-4 выполнялся требуемый регламент: ведение журнала учета работ с прибором, журнал обработки, протокольная фото-съемка. Обработка результатов аналогична принятой для других магнитометров и включает: получение базисных значений (сравнением с результатами абсолютных наблюдений с помощью штатных DI-магнитометра LEMI-203 и скалярного POS-1), вычисление минутных значений и вывод в файлы стандартного формата, посуточное сравнение с данными основного вариометра обсерватории.

На рис. 2(левая панель) представлены суточные базисные значения POS-4 (разности между данными POS-4 и результатами абсолютных наблюдений после сглаживания аппроксимирующим сплайном). Скачки в записи POS-4 при регулировках датчика исключены (но для примера показаны для  $Y_0$ ). Среднее  $F_0$  полностью описывается градиентом F между павильонами POS-4 и абсолютным. Значительные  $Y_0$  на невозмущенном уровне объясняются неточной ориентировкой оси колечной системы на географический восток.

Как видно на рис. 2, при высокой стабильности градиента F, базисные  $Z_0$ ,  $Y_0$  с декабря 2015 г. показывают значительные колебания, скорость изменения достигает 2-3 нТл/сут. Наиболее вероятной причиной является нестабильность постаментов POS-4 из-за промерзания окружающего грунта. Наклоны постаментов подтверждаются показаниями штатных уровней датчика POS-4 – уходы достигали несколько делений, т.е. до 1'. На рис. 2 также показана среднесуточная температура наружного воздуха по данным метеостанции Davis. Как видно, в конце ноября температура уже не поднималась выше 0°C, что с учетом низкого уровня снежного покрова зимой 2015-2016 гг. могло вызвать промерзание грунта вокруг постаментов. Более тонкая оценка ситуации осложняется тем, что павильон не обогревается и изменения температуры внутри заметно отличаются от наружной, а снег вокруг павильона распределен очень неравномерно. Существенное влияние на постаменты эффектов при промерзании может быть вызвано недостаточной массивностью фундамента при значительной массе верхней части столба из стеклоблоков. Однако, не исключены также наклоны самого датчика (соленоида и колечной системы) из-за недостаточной опорной базы трегера или нестабильность дополнительных полей, создаваемых соленоидом и кольцами. Можно также отметить заметное ускорение дрейфа  $Y_0$  после сильного землетрясения 30 января 2016 г. с эпицентром на расстоянии около 100 км от обсерватории.

Как вариационный прибор POS-4 имеет аналог — магнитометр dIdD GSM-19FD (GEM Systems, Канада), который работает в непрерывном режиме на всех обсерваториях ИКИР. На рис. 2(правая панель) представлены ряды минутных значений обоих магнитометров

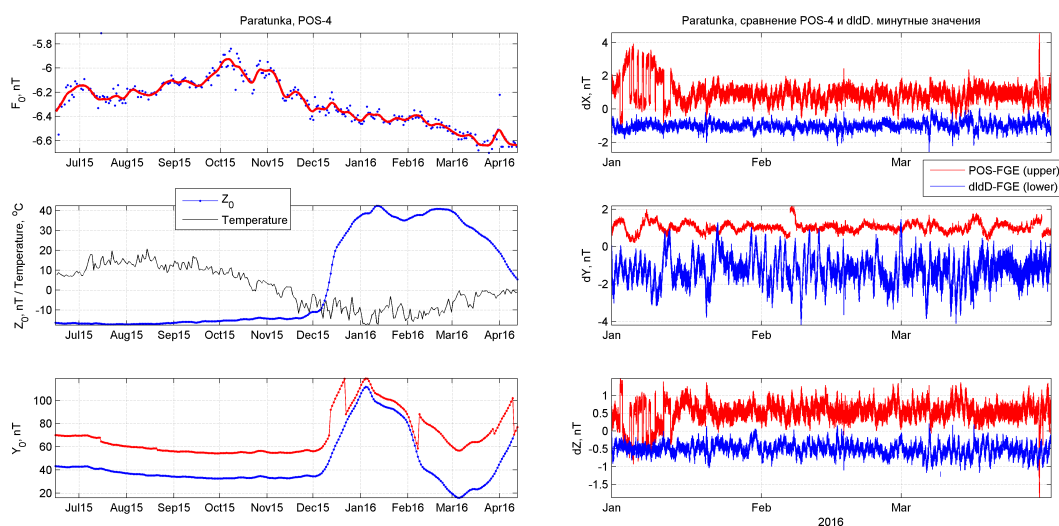


Рис. 2. Левая панель: принятые (аппроксимация сглаживающим сплайном) базисные значения POS-4. Для  $F_0$  точками показаны среднесуточные наблюдаемые значения, для  $Y_0$  показаны также значения до исключения скачков при нивелировке датчика. На графике  $Z_0$  показана среднесуточная температура наружного воздуха. Правая панель: Сравнение минутных данных POS-4 (верхние кривые) и dIdD (нижние кривые). Вариации поля вычтены (по данным магнитометра FGE). Кривые смещены по ординате для лучшего представления.

за январь-март 2016 г. Из-за сильного тренда в базисных значениях POS-4 их интерполяция была сделана на каждую минуту. Естественные геомагнитные вариации вычтены по данным феррозондового вариометра FGE, основного на обсерватории. Можно отметить: (1) случайная компонента в данных dIdD и POS-4 сравнима, несколько больше для X- и Z-составляющих POS-4 и заметно ниже для Y, что связано с ориентацией первичного датчика POS-1 в соленоиде; (2) в Y(dIdD) наблюдается существенная вариация, связанная с температурой (причина не установлена); (3) скачки в X,Z(POS) в январе вызваны температурой в павильоне, однако механизм эффекта не выяснен; небольшие скачки связаны с корректировкой вертикальности соленоида.

## Выводы

Регулярные измерения магнитного поля с помощью векторного магнитометра POS-4 на обсерватории "Паратунка" в 2015-2016 гг. показали следующее:

1) наблюдаются сильные дрейфы в данных POS-4, 2-3 нТл/сут. и более, вероятно связанные с нестабильностью его постамента из-за эффектов промерзания и оттаивания грунта. Отсутствие автокомпенсирующей системы, подобной карданным подвесам dIdD или FGE, приводит к необходимости иметь цифровую систему контроля наклонов соленоида и температуры;

2) имеется повышенный шум в измерениях Z-составляющей POS-4 (и ее производных — H,X), связанный с ориентацией первичного измерителя POS-1 в соленоиде, что, возможно, потребует изменений в конструкции;

3) требуется более надежный и эффективный узел установки датчика на постамент, обеспечивающий лучшую устойчивость и точность регулировки вокруг вертикальной оси;

4) в качестве вариационного прибора POS-4 сопоставим с ближайшим аналогом dIdD

GSM-19FD, при этом будучи заметно более компактным и простым в установке;

5) в течение более чем годового периода эксплуатации POS-4 не имел существенных проблем как в аппаратуре, так и в программе регистрации. Однако, отсутствие GPS-синхронизации создавало неудобства при настройках.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 14-11-00194.*

#### Литература

1. INTERMAGNET TECHNICAL REFERENCE MANUAL. Version 4.6. Edited by: Benoit St-Louis, 2012. – 92 p.
2. Gonsette A., Poncelet A., Marin J.-L., Bracke S., Rasyon J. The AutoDIF validation procedure // XVI IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing, October 7-16, Hyderabad, India. Abstract volume, 2014. - P.29.
3. Бородин П., Денисов А., Кусонский О., Мартышко П., Савельев Д., Сапунов В. Оверхаузеровский векторный FZ-магнитометр POS-3 // Междунар. научно-практ. конференция "Полярная геофизика Ямала: наблюдения, базы данных и информационные системы в практике освоения месторождений нефти и газа. Полар-2014, 13-17 апреля 2014". - 2014.
4. Хомутов С.Ю., Бабаханов И.Ю., Бобылев Я.М., Думбрава З.Ф., Лобода В.А., Поддельский И.Н., Сапунов В.А. Оверхаузеровские магнитометры POS-1 и POS-4: первые результаты измерений на обсерваториях ИКИР ДВО РАН // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 27 сентября — 3 октября 2015 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С.269-273.