

ОВЕРХАУЗЕРОВСКИЕ МАГНИТОМЕТРЫ POS-1 И POS-4: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОБСЕРВАТОРИЯХ ИКИР ДВО РАН

*С.Ю. Хомутов¹, И.Ю. Бабаханов¹, Я.М. Бобылев¹, З.Ф. Думбрава¹, В.А. Лобода¹,
И.Н. Поддельский¹, В.А. Сапунов²*

¹*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с.Паратунка Камчатский край, Khomutov@ikir.ru*

²*Уральский федеральный университет, МИП "НПЦ квантовой магнитометрии",
г. Екатеринбург*

Введение

Скалярные магнитометры, измеряющие модуль вектора магнитной индукции F , являются приборами, широко применяемыми как в прикладных, так и в научных задачах. Современные их модификации на эффекте Оверхаузера позволяют получать абсолютные значения F с погрешностью не более 0.5 нТл, чувствительностью на уровне 0.01 нТл и частотой измерений до 1 Гц. Для этих магнитометров существует достаточно развитое метрологическое обеспечение, имеются эталоны и разработаны поверочные схемы. Наиболее распространенными являются модели POS (Лаборатория квантовой магнитометрии, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург), GSM (GEM Systems Co, Канада), ММП (НПП "Геологоразведка", г. Санкт-Петербург). Разнообразие модификаций, опций и сервиса позволяет выбирать приборы, оптимально ориентированные на конкретные задачи.

Магнитные обсерватории, выполняющие непрерывный мониторинг магнитного поля Земли, а также обеспечивающие основу для проведения разномасштабных магнитных съемок, в своих измерениях также традиционно используют скалярные магнитометры. С одной стороны, эти приборы, являясь абсолютными, совместно с DI-магнитометрами (немагнитный теодолит с феррозондовым датчиком) или укомплектованные колечными системами позволяют получать полный вектор магнитной индукции и обеспечивать контроль базисных уровней трехкомпонентных вариометров. С другой стороны, получаемые скалярными магнитометрами данные дают эффективное средство для контроля итоговых результатов мониторинга магнитного поля. Все эти задачи и требования отражены в стандартах магнитных обсерваторий современной международной сети INTERMAGNET.

ИКИР ДВО РАН имеет в своей структуре четыре геофизические обсерватории (ГФО), на которых ведутся непрерывные магнитные измерения. Три ГФО — "Магадан" (MGD), "Паратунка" (PET, Камчатка) и "Хабаровск" (КНВ) являются сертифицированными обсерваториями INTERMAGNET, на ГФО "Мыс Шмидта" (CPS, Чукотка) мониторинг магнитного поля выполняется практически по стандартам INTERMAGNET. ГФО оснащены различными вариационными магнитометрами (FGE-DTU, dIdD GSM-19FD, ЦМВС "Кварц", MAGDAS и др), имеют абсолютные магнитометры LEM-203 и Mag-01 для измерения склонения и наклона, а также несколько скалярных приборов, включая GSM-19 и ММП-203 различных модификаций [1]. В 2014 г. для всех четырех ГФО через систему госзакупок и по гранту РФФИ были приобретены оверхаузеровские магнитометры POS-1grs в обсерваторской модификации, а также компонентный магнитометр POS-4. Основной задачей было обновить парк имеющихся скалярных приборов более современными и обеспечить надежность измерений аппаратным резервированием. Немаловажным фактором была необходимость перехода на аппаратуру отечественного производства, в особенности это относится к векторному POS-4.

В данном докладе представлено описание особенностей использования и первые результаты работы с магнитометрами POS-1 и POS-4 на обсерваториях ИКИР ДВО РАН.

Используемая аппаратура, условия эксплуатации

Геофизические обсерватории ИКИР ДВО РАН были организованы в 60-х годах прошлого столетия и территориально охватывают значительную часть Дальнего Востока от южных границ до Арктики (см. рис.1). Получаемые на этих ГФО магнитные данные уникальны и важны как для региональных, так и для глобальных исследований. Расположение обсерваторий приводит к

разнообразие условий, в которых выполняются магнитные измерения, в том числе и экстремальным: большой сезонный диапазон температуры с экстремальными положительными значениями до $+40^{\circ}\text{C}$ и отрицательными до -50°C , снежный покров до 2-3 м, специфические грунты с галечником и вечной мерзлотой, сейсмоактивный регион и др. Дополнительные сложности возникают из-за ограниченности размеров магнитных павильонов — установка дополнительных магнитометров приводит к взаимному влиянию и снижению качества измерений. Эти условия затрудняют проведение регулярных магнитных измерений в соответствии со стандартами и выдвигают

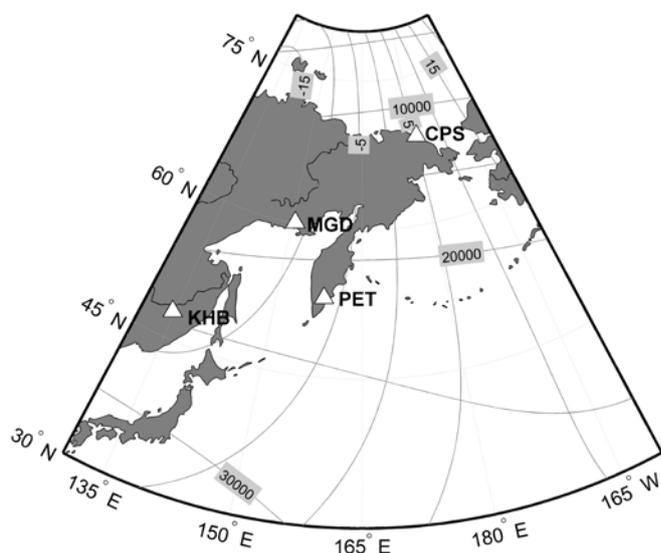


Рис. 1. Расположение Геофизических обсерваторий ИКИР ДВО РАН. Изолиниями показано распределение магнитного склонения и горизонтальной составляющей

дополнительные требования к используемой аппаратуре. Скалярные магнитометры POS-1 на принципе динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера) являются основной разработкой Лаборатории квантовой магнитометрии QML Уральского федерального университета, г. Екатеринбург (magnetometer.ur.ru, см. [2]). Они позволяют измерять модуль индукции магнитного поля Земли в широком диапазоне значений с периодичностью до 1 с, имеют чувствительность на уровне 0.01 нТл и систематическую (абсолютную) погрешность не более 1 нТл. Кроме собственно значения модуля F магнитометр вычисляет параметр QMC (quality of measurement condition), позволяющий оценивать качество измерений (уровень помех, градиент, ориентацию датчика, см. [3]).

Конструктивно магнитометр в обсерваторском исполнении состоит из первичного преобразователя и блока электроники, соединенных гибким кабелем (рис.2). Также имеется встроенный GPS-приемник с выносной антенной, обеспечивающий привязку к шкале UTC и измерение координат, и интерфейсный блок для подключения питания (+12 В) и компьютера (через порт RS232). В комплект входит также источник бесперебойного питания, кабель связи и питания и программа управления и регистрации POS Manager. Для обсерваторий ИКИР ДВО РАН, учитывая условия эксплуатации, разработчиком POS-1 были предоставлены соединительные кабели увеличенной длины.



Рис.2. Магнитометры POS-1 и POS-4. На левой панели: первичный преобразователь POS-1 (справа) и блок электроники (слева), на правой панели: блок электроники POS-4 (справа), коленная система на соленоиде Гаррета с расположенным внутри первичным преобразователем POS-1 (в центре) и ИБП (слева).

Векторный магнитометр POS-4 является новой разработкой, в значительной степени экспериментальной. Частично технические и методические вопросы POS-4 были решены в двухкомпонентном варианте магнитометра POS-3. POS-4 позволяет непосредственно измерять модуль магнитной индукции F и две ортогональные составляющие — вертикальную Z по оси

соленоида Гаррета и проекцию вектора F на ось перпендикулярной 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 соленоиду Гаррета, для измерения горизонтальной проекции вектора F на ось колец в произвольном азимуте либо с ориентированием на магнитный север (горизонтальная компонента H).

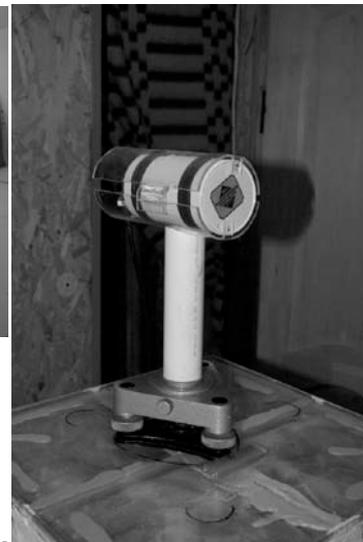
Для установки на постамент используется немагнитная подставка (трегер) с горизонтальной шкалой. Связь с компьютером обеспечивается по протоколу RS232, для управления и регистрации используется программа POS Manager. Чувствительность по модулю F составляет около 0.03-0.05 нТл, по компонентам ZH — около 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 компонентного оверхаузеровского 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).

Основная задача приобретенных POS-1 — использование в качестве абсолютных магнитометров для определения (контроля) базисных уровней непрерывно регистрирующих скалярных магнитометров, включенных в комплекты вариационных приборов (dIdD на всех ГФО и GSM-19T на ГФО MGD и PET). Кроме того, данные POS-1 используются для вычисления полных значений составляющих H и Z , необходимых для контроля базисных уровней вариометров ЦМВС, ЦАИС и MAGDAS. Поэтому на всех ГФО POS-1 были установлены в павильонах для абсолютных наблюдений с регистрирующими компьютерами и системой питания в технических павильонах на расстоянии 20-30 м (более 50 м на CPS). При этом непрерывная запись F позволяет, что очень важно, контролировать изменение магнитной обстановки в абсолютном павильоне. Пример расположения датчиков POS-1 на ГФО CPS и PET представлен на рис.3.

Векторный магнитометр POS-4 в значительной степени является экспериментальным и, в отличие от POS-1, требует проведения различных работ (настроек, регулировки, тестирования). Кроме того, дополнительные поля, создаваемые соленоидом и колечной системой, оказывают влияние на магнитометры, находящиеся в непосредственной близости. В связи с этим для POS-4 был построен специальный



Рис.3. Датчик POS-1 при измерениях на основном постаменте в абсолютном павильоне. Слева — на ГФО "Мыс Шмидта", справа — на ГФО "Паратунка".



немагнитный павильон из бруса размером около 2x2 м с утеплителем на внутренней стороне. Постамент изготовлен из стеклоблоков на немагнитном основании, заглубленным в грунт на 1 м. В павильон не заведено электропитание 220 В и не предусмотрен обогрев, но температура внутри непрерывно регистрируется цифровыми термодатчиками на трех высотных уровнях. Общий вид павильона и расположение датчика POS-4 показано на рис.4.

Результаты

Регулярные измерения с помощью POS-1 на обсерваториях начались в январе-феврале 2015 г. (на ГФО "Магадан" — в ноябре 2014 г.). Измерения были непрерывными, за исключением периодов, когда магнитометры использовались в специальных работах: при сверках, при магнитных съемках, для контрольных наблюдений. Периодичность измерений на ГФО CPS и MGD была установлена 3 с (минимальное значение без потери точности), на ГФО КНВ и PET — 5 с. На ГФО PET и CPS

магнитометры включены в регулярный мониторинг в качестве основных абсолютных приборов, на MGD и КНВ используются в качестве резервных, в режиме непрерывных измерений. Можно отметить удобство работы с POS-1 благодаря компактности (небольшие размеры датчика и блока электроники) и достаточной длине соединительных кабелей.

На всех ГФО результаты измерений с помощью POS-1 вовлечены в процедуры штатной обработки и сравниваются с результатами других скалярных приборов. Для примера на рис.5 показано сравнение POS-1 PET с магнитометрами GSM-19T и GSM-19FD (dIdD). Как видно, при естественных вариациях F размахом до 30 нТл разница между приборами лежит в пределах первых долей нТл. Выделяются отдельные выбросы в данных POS-1. Такие импульсные помехи отмечаются на всех ГФО, при этом их амплитуда может достигать более 1000 нТл, а количество — несколько десятков за сутки. Причина возникновения импульсов не понятна, предположительно они вызваны техногенными наводками в длинных линиях магнитометра и некорректностью их обработки внутренней программой POS-1. На практике выбросы с амплитудой более нескольких нТл легко идентифицируются и программно удаляются, однако более слабые остаются и могут влиять на качество итоговых данных. К сожалению, аппаратными средствами (более качественное заземление, автономное питание, выбор оптимального места установки и др.) проблему этих выбросов полностью решить не удастся. В особенности это актуально для обсерваторий "Магадан" и "Мыс Шмидта" с грунтами, способствующими распространению помех от удаленных источников (на ГФО CPS питание POS-1 постоянно обеспечивается от аккумулятора большой емкости, так как при использовании стационарного питания 220 В уровень помех недопустимо возрастает). Также необходимо отметить проблемы с таймингом измерений с помощью POS-1, эпизодически приводящих либо к недостоверным отметкам даты/времени получаемых данных, либо в уходе режима измерений от привязки к началу минуты.

Векторный магнитометр POS-4 требовал к себе значительно больше внимания, чем стандартные POS-1. До мая 2015 г. выполнялись работы по оценке различных режимов POS-4, частая смена настроек и регулировок. С мая магнитометр был запущен в мониторинговом режиме, с минимумом изменений в настройках — для оценки его долговременной стабильности и надежности. Измерения выполнялись циклами по 5 модулей с общей продолжительностью цикла 5 с. Колечная система была ориентирована осью в направлении, близком к географическому "восток-запад", что обеспечивало измерение Y -составляющей поля. Также штатно регистрировался модуль F и вертикальная компонента Z . На рис.6 в качестве примера представлен суточный ряд измерений F, Z, Y за 15.08.2015 г. (поле в эти сутки было возмущенным), а также разности между 5-секундными данными POS-4 и данными скалярного магнитометра GSM-19T и феррозондового вариометра FGE-DTU. Как



Рис.4. Установка векторного магнитометра POS-4 на ГФО "Паратунка". Слева — павильон POS-4 с DI-магнитометром Mag-01 при измерении склонения и наклонения, справа — датчик POS-4 на постаменте из стеклоблоков, на верхней части соленоида ортогонально расположены два точных уровня, на постаменте — контрольный уровень.

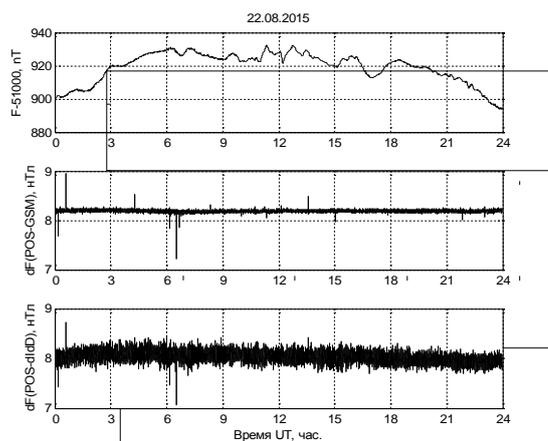


Рис.5. Сравнение результатов измерений POS-1 с GSM-19T и GSM-19FD на ГФО PET

регистировался модуль F и вертикальная компонента Z . На рис.6 в качестве примера представлен суточный ряд измерений F, Z, Y за 15.08.2015 г. (поле в эти сутки было возмущенным), а также разности между 5-секундными данными POS-4 и данными скалярного магнитометра GSM-19T и феррозондового вариометра FGE-DTU. Как

видно из рис.6, наблюдается хорошее совпадение по модулю F (разброс dF лежит в пределах 0.3 нТл), приемлемое по Y-составляющей и более зашумленное для Z (разброс на уровне 1 нТл). Постоянные смещения вызваны как пространственными градиентами поля, так и неточной ориентацией вертикальных колец относительно направления на географический восток. Долговременная стабильность POS-4 может контролироваться с помощью базисных значений (результат сравнения POS-4 с абсолютными магнитометрами), представленными на рис.7. Как видно, стабильность по F и Z достаточно высокая, в пределах 1-2 нТл за 4 мес., но составляющая Y показывает сильный тренд, до 30 нТл за весь период измерений. Причиной может быть влияние температуры или наклон постаumenta.

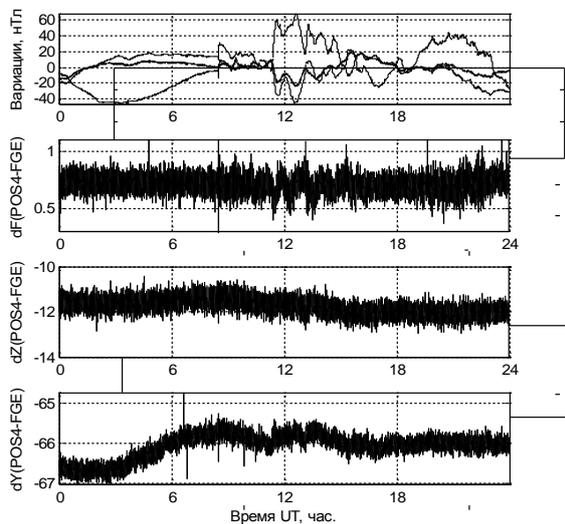


Рис.6. Сравнение данных POS-4 с данными скалярного магнитометра GSM-19T и феррозондового вариометра FGE-DTU.

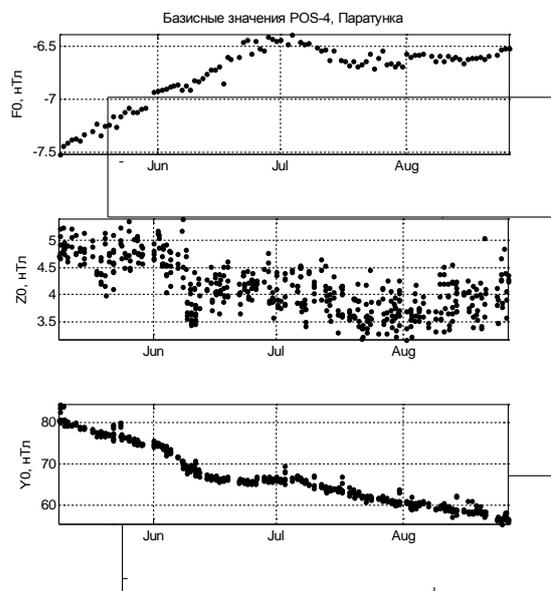


Рис.7. Базисные значения F0, Z0, Y0 векторного магнитометра POS-4 за май-август 2015 г.

Заключение

Первые результаты использования на обсерваториях ИКИР ДВО РАН скалярных магнитометров POS-1 и векторного магнитометра POS-4 показали:

1) POS-1 является приемлемым прибором для абсолютных и вариационных измерений модуля F на магнитных обсерваториях. При этом в его данных отмечается заметное количество импульсных помех значительной амплитуды, причина которых недостаточно понятна. Также фиксируются некоторые проблемы со встроенным таймером;

2) POS-4 по элементам F и Z дает результаты, сравнимые с другими абсолютными магнитометрами. Значительный тренд по Y-составляющей на данный момент не может быть обоснованно интерпретирован.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14-11-00194. Благодарим сотрудников обсерваторий ИКИР ДВО РАН за качественный мониторинг магнитного поля, результаты которого использовались для сравнения с данными новых магнитометров.

Список литературы

1. Бабаханов И.Ю., Басалаев М.Л., Думбрава З.Ф., Поддельский И.Н., Хомутов С.Ю. Новые магнитометры GSM-19FD (GEM Systems) и Mag-01H (Bartington Instruments Ltd) на обсерваториях ИКИР ДВО РАН и их возможности в геофизических исследованиях // VI международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» Паратунка, Камчатский край, Россия, 9 - 13 сентября 2013 г. – С.234-238.
2. Государственный реестр средств измерений РФ, № 44807-10. ТУ 4314-001-020692208-2007.
3. Denisov A.Ya , Sapunov V.A., Khomutov S.Y. Measurement quality estimation of proton-precession magnetometers // Earth, Planets and Space. - 2006. - V. 58 (6). - P.707-710.