

А.Д. Перечесова<sup>1</sup>, И.И. Калапышина<sup>2</sup>, П.А. Сергушин<sup>3</sup>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ОБСЕРВАТОРИИ



<sup>1</sup>Анна Дмитриевна Перечесова,  
Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного  
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.  
Н.В. Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (911)961-0020, E-mail: perechessova@gmail.com.



<sup>2</sup>Ирина Ивановна Калапышина,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет  
ИТМО», Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института  
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (911) 713-7772, E-mail: weir521@yandex.ru.



<sup>3</sup>Павел Анатольевич Сергушин  
Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного  
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.  
Н.В.Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (921) 382-4143, E-mail: spa@izmiran.spb.ru

### Аннотация

В статье представлена разработанная технологическая система калибровки трёхкомпонентных магнитных датчиков на базе магнитно-ионосферной обсерватории СПбФ ИЗМИРАН [1], [2]. Описаны методы измерения основных метрологических характеристик магнитометра (коэффициент преобразования, диапазон измерения, АЧХ/АФЧХ, порог чувствительности, смещение нуля, шумы, температурный дрейф) с использованием трёхкомпонентной колечной системы Гельмгольца и программных средств сбора данных. Показана эффективность работы комплекса в условиях естественного магнитного поля (~50 000 нТл) и промышленных помех с учётом требований ГОСТ [3] и мировых практик калибровки [4]. Полученные результаты подтверждают соответствие

метрологических характеристик датчиков заявленным требованиям и возможности применения описанной методики в геофизических исследованиях.

*Ключевые слова:* магнитометр, обсерваторская калибровка, система Гельмгольца, арамидный торсионный подвес

## **Введение**

Трёхкомпонентные (векторные) магнитометры используются для точных измерений индукции магнитного поля Земли в геофизике, геологии и магнитной картографии. Созданный в СПбФ ИЗМИРАН магнитометр магнитостатического типа [5] обеспечивает регистрацию векторных компонент поля в диапазоне рабочих частот 0–0,5 Гц и разрешающей способностью порядка десятых долей нТл. Для получения достоверных результатов необходимо экспериментально определить его метрологические характеристики и учесть отклонения характеристик реального датчика от расчётных значений (смещение нуля, линейность, неортогональность каналов и т.д.). Проблема калибровки усложняется работой в условиях естественного поля (~50 000 нТл) и промышленных электромагнитных помех.

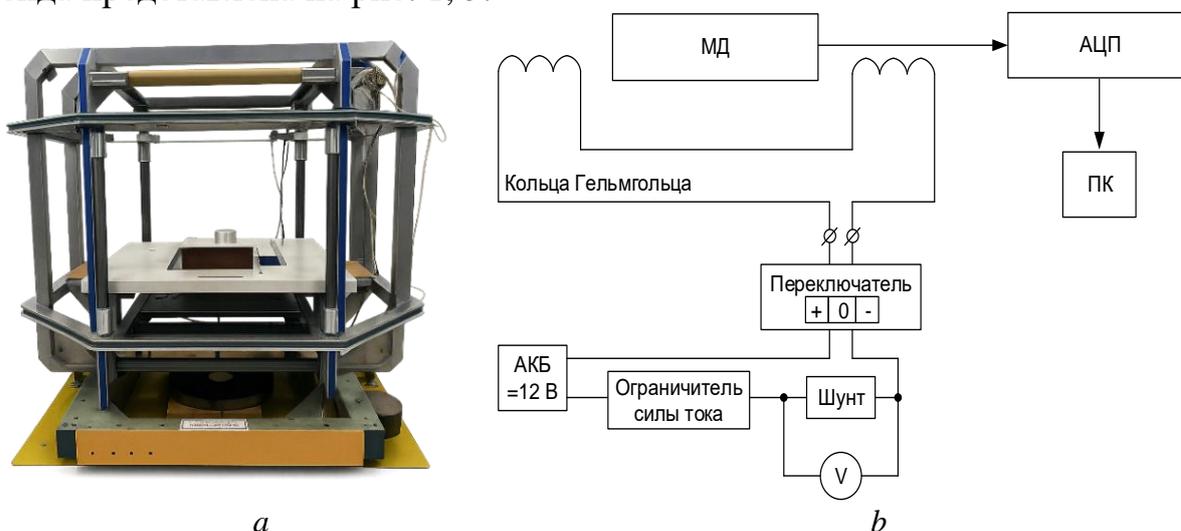
Согласно государственным стандартам, порядок проведения поверок магнитометрических средств задаётся, в частности, ГОСТ [3], [6]. В мировой практике для калибровки магнитометров часто используются специальные лабораторные установки с трехкомпонентными системами колец Гельмгольца [4]. «Клетки Гельмгольца» (Helmholtz cage) обеспечивают контролируемое однородное поле по трём осям и применяются в университетах и обсерваториях (Россия, Финляндия, Польша, США, Индия, Нидерланды и др.). При этом часто используется совместная работа векторных датчиков с эталонными скалярными магнитометрами для повышения точности калибровки [4].

Настоящая работа объединяет и расширяет результаты ранее разработанных методик калибровки трехкомпонентного магнитометра [7]. Предложена интегрированная технологическая система – программно-аппаратный комплекс на базе магнитно-ионосферной обсерватории СПбФ ИЗМИРАН, включающая испытательный стенд с трехкомпонентной коленной системой Гельмгольца, систему компенсации внешнего поля и средства автоматизированного сбора данных. В таких условиях удаётся проверять метрологические характеристики датчиков непосредственно в естественном поле, соблюдая требования точности и стабильности измерений [3].

## Методы

Испытания проводились на примере трехкомпонентного магнитоэлектрического магнитометра разработки СПбФ ИЗМИРАН. В основе датчика – магнитная система на торсионном подвесе, обеспечивающая детектирование проекций вектора магнитного поля по трем взаимно-ортогональным осям (D, Z, H). Для компенсации положения магнитов в датчике используется отрицательная обратная связь: сигнал датчика усиливается и подаётся на катушки обратной связи, создавая компенсационное поле [8].

Основной испытательный стенд (рис. 1, а) представляет собой трёхкомпонентную коленную систему Гельмгольца (каждая плоскость – пара квадратных катушек размером 1000×1000 мм), смонтированную на немагнитном сейсморазвязанном постаменте. На площадке в центре коленной системы расположен калибруемый датчик. Система спроектирована так, чтобы внутри кольца обеспечивалось однородное магнитное поле в диапазоне частот 0–10 Гц. На стенде реализована функция активной компенсации фонового поля Земли и помех: внешнее поле автоматически компенсируется (особенно для низких частот), что позволяет более точно задавать измеряемое поле. Структурная схема испытательного стенда представлена на рис. 1, б.



**Рис. 1.** Испытательный стенд внешний вид (а): трёхкомпонентная коленная система Гельмгольца на сейсморазвязанном постаменте и структурная схема испытательного стенда (б): магнитный датчик, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер, Кольца Гельмгольца габаритом, аккумуляторная батарея, ограничитель силы тока (блок сопротивлений), шунт (резистор прецизионный), вольтметр, переключатель (полярности)

При калибровке датчика последовательно оценивались следующие характеристики:

- Коэффициент преобразования (чувствительность) – измерялся как отношение выходного сигнала датчика к напряжению на опорном шунте при подаче известного тока в катушку соответствующей компоненты.

- Диапазон измерения индукции – определялся путём пошагового увеличения тока в катушках до видимого насыщения вектора датчика. Граница диапазона равна значению поля при насыщении.

- АЧХ/АФЧХ – амплитудно-частотная характеристика определялась отношением выходных сигналов датчика к сигналам на опорном шунте на разных частотах (обычно 0,01–1 Гц); фазочастотная – как относительная задержка выходного сигнала датчика.

- Порог чувствительности – определяется как минимально различимый уровень сигнала (обычно порядка 0,1 нТл).

- Смещение нуля – измерялось методом разворота оси датчика на 180°: ожидаемое изменение сигнала сравнивалось с известным значением компоненты поля в этой точке. Разброс значений нуля после калибровки должен был быть минимальным (менее нескольких сотен нТл в наших измерениях).

- Дрейф нуля по температуре – оценивался как изменение выходного сигнала при стабилизации рабочей температуры датчика: по данным дрейф нуля составлял порядка  $\pm 10$  нТл/°С.

- Уровень собственных шумов – определялся как среднеквадратичное отклонение сигнала датчика в магнито-спокойный интервал (либо в экранированном помещении), при отсутствии внешних возмущений.

Для практической оценки шумов была применена методика дифференциальной записи сигналов двух одинаковых датчиков. С целью исключения влияния помех оба датчика располагали параллельно на постаменте и подключали к АЦП с синхронной записью сигналов в течение ~24 часов. Из записанных данных выбирались ночные интервалы с наименьшими помехами (обычно 2–5 ч ночи по местному времени). После этого вычислялось СКО разности сигналов двух датчиков, что давало значение уровня собственных шумов. Проверочное требование – СКО шумов по модулю в полосе рабочих частот не превышает 0,1 нТл. Сбор данных и обработка проводились с помощью разработанного в СПбФ ИЗМИРАН ПО.

Важным элементом комплекса является программное обеспечение, позволяющее автоматизировать генерацию команд источника тока, сбор сигналов с датчика и проведение вычислений метрологических параметров. Для привязки измерений к внешним стандартам при необходимости может использоваться эталонный скалярный магнитометр (плотностный магнитометр или Overhauser-магнитометр) по методикам мировых обсерваторий.

## Результаты и обсуждение

Проведённые измерения подтвердили выполнение заданных метрологических требований. Полученные значения основных характеристик датчика составили: диапазон измеряемых индукций –  $\pm 70\,000$  нТл, полоса рабочих частот – 0,005–0,5 Гц, коэффициент преобразования по осям  $\sim 100$ –110 ед./нТл, смещение нулей – в пределах  $\pm 2500$  нТл, СКО шумов – до 0,1 нТл, температурный дрейф нуля –  $\pm 10$  нТл/°С. Эти результаты укладываются в заданные технические условия и соответствуют характеристикам аналогичных отечественных и зарубежных систем.

Полученные АЧХ в полосе 0,005–0,5 Гц оказались практически плоскими (амплитуда на краях диапазона отличается от значения на 0,01 Гц не более чем на  $\pm 2\%$ ). Наблюдавшиеся погрешности Линеаризованные по частоте были малы. Смещение нуля после калибровки фактически выравнивалось (среднее смещение  $\approx 0$  нТл), а разброс по осям не превышал указанных в табл. 1  $\pm 2500$  нТл. Шумы датчика, полученные методом синхронной записи и вычитания (разностный метод), не превышали 0,1 нТл RMS по модулю. Этот уровень соответствует мировым показателям для магнитоэлектрических вариометров и позволяет фиксировать колебания поля порядка 0,2–0,3 нТл.

Таким образом, итоговые калибровочные коэффициенты и характеристики демонстрируют требуемую точность: например, средний коэффициент преобразования  $\sim 105$  ед./нТл и приводимые разбросы по каналам, а шумовая характеристика не превышает критических значений. Для визуализации результатов используются графики зависимости выходных сигналов от задаваемого тока, АЧХ и др., подтверждающие линейность и стабильность измерения.

Сравнение наших результатов с мировым опытом показало хорошее соответствие. Описанная методика опирается на распространённый подход к калибровке векторных магнитометров с помощью трехкомпонентных колец Гельмгольца [4]. Например, аналогичная система в Индии (Alibag Observatory) после модернизации служит национальным калибровочным комплексом для наземных и космических магнитометров. В других странах широко используются коммерческие и университетские «Helmholtz cage» для отладки и поверки датчиков [4]. Важно отметить, что большинство подобных установок рассчитаны на калибровку в условиях компенсации земли, тогда как разработанный нами комплекс эффективно работает непосредственно в реальном поле с применением активной компенсации. Это позволяет учесть возможные эффекты нестабильности фонового поля и обеспечить калибровку в среде обсерватории.

Система питания и электроники датчиков обеспечила стабильность работы: колебания питающего напряжения не сказывались на измерениях (изменение вывода при колебаниях питания  $<0,01\%$  благодаря стабилизированному источнику). Использование современного АЦП с разрешением 24 бит позволило реализовать указанные пределы чувствительности (1300 нТл/ед. АЦП) при шуме  $<0,1$  нТл. Программное обеспечение обеспечивало синхронность каналов и автоматическое масштабирование сигналов, что совпадает с требованиями к параллельной регистрации многоканальных магнитометров.

Полученные результаты удовлетворяют государственным стандартам: методика и полученные параметры соответствуют поверочной схеме измерений магнитной индукции ГОСТ 8.030-2013. Достигнутые шумовые характеристики и стабильность нулей укладываются в требования стандарта. Калибровочную лабораторию планируется аттестовать по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 (требования к компетентности калибровочных лабораторий) [6], что повысит доверие к результатам измерений.

С учётом вышеизложенного, разработанная система калибровки МД признана эффективной. Она позволяет операторам магнитометрических обсерваторий получать достоверные метрологические данные о сенсорах при относительно невысокой трудоёмкости процедуры. Подход демонстрирует гибкость: анализ и автоматизация процессов (подбор оптимальных точек калибровки, оценка равномерности поля) обеспечивают воспроизводимость результатов.

## **Заключение**

Разработана и реализована технологическая система калибровки трёхкомпонентных магнитных датчиков на базе обсерватории СПбФ ИЗМИРАН. В состав системы входят специализированный стенд с трехосной системой Гельмгольца, средства компенсации фонового поля и автоматизированное ПО.

Предложенная методика обеспечивает измерение основных метрологических характеристик магнетометра: коэффициента преобразования, диапазона индукций, АЧХ/АФЧХ, смещения нуля, температурного дрейфа и шумов (включая их разностную оценку). Результаты калибровки были подтверждены на практике – диапазон  $\pm 70$  кнТл, шум  $\leq 0,1$  нТл, температурный дрейф  $\sim 10$  нТл/°С.

Показано, что описанная технология соответствует современным метрологическим требованиям и стандартам: калибровка проводится с учётом ГОСТ 8.030-2013 [3] и рекомендаций международных практик (IAGA, INTERMAGNET) [4].

Практическое значение работы заключается в обеспечении высокоточной калибровки магнитометров в реальных условиях обсерватории. Предложенные решения – активная компенсация поля, новая автоматизация измерений, оптимизация условий регистрации – позволяют повысить качество геомагнитных наблюдений и снизить систематические погрешности.

В дальнейшем планируется расширить систему автоматического анализа данных и верификации калибровочных коэффициентов, а также применить её для калибровки других типов векторных магнитометров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006 – № 28. – С. 173-174.
- [2] Копытенко Ю.А., Петрищев М.С., Сергушин П.А., Леваненко В.А., Перечесова А.Д., Устройство для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов // Заявка на патент РФ №2012140673/12(065633), МПК D07B3/00, D04C3/00, приоритет от 18.09.2012 г.
- [3] ГОСТ 8.030–2013. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции. – М.: ИПК Изд-ва стандартов, 2013.
- [4] Mahavarkar P., John J., Dhapre V., Dongre V., Labde S. Tri-axial square Helmholtz coil system at the Alibag Magnetic Observatory: upgraded to a magnetic sensor calibration facility // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. – 2018. – V.7. – P.143–149.
- [5] Коробейников А.Г., Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Леваненко В.А., Гатчин Ю.А., Федосовский М.Е., Поляков В.И. Применение полимерных материалов при разработке торсионов применяемых в высокочувствительных системах измерения низкочастотных магнитных полей // XXIV Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем". Сб. Структура и динамика молекулярных систем. под ред. Щербиной А.А. – 2017. – С. 46-54.
- [6] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартиформ, 2019.
- [7] Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. — 320 с.: ил.

- [8] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // Key Engineering Materials. 2010. T. 437. C. 621-624.

A.D. Perechesova<sup>1</sup>, I.I. Kalapyshina<sup>1,2</sup>, P.A. Sergushin<sup>1</sup>

## TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR OBSERVATORY CALIBRATION OF MAGNETOMETERS

<sup>1</sup>Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, Russia;

<sup>2</sup>ITMO University, Russia.

### Abstract

The article presents the developed technological system for calibration of three-component magnetic sensors. It's based on the magnetic-ionospheric observatory of the Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial [1], [2]. The methods for measuring the main metrological characteristics of the magnetometer (conversion coefficient, measurement range, frequency response/amplitude-frequency response, sensitivity threshold, zero offset, noise, temperature drift) using a three-axis Helmholtz ring system and data collection software are described. The efficiency of the complex under conditions of a natural magnetic field (~50,000 nT) and industrial interference is shown, taking into account the requirements of GOST [3] and world calibration practices [4]. The obtained results confirm the compliance of the metrological characteristics of the sensors with the stated requirements and the possibility of using the described technique in geophysical research.

*Key words:* magnetometer, observatory calibration, Helmholtz system, aramid torsion bar

### REFERENCES

- [1] Sergushin P.A. Magnetovariometer as a means of measuring magnetic fields // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2006 – No. 28. – P. 173-174.
- [2] Kopytenko Yu., Petrishchev M., Sergushin P., Levanenko V., Perechesova A. Device to making instrument sensitive element torsion suspensions // patent RF №2519888, D07B3/00, 20.06.2014, No17
- [3] GOST 8.030–2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. State hierarchy scheme for means measuring magnetic flux

- density, magnetic flux, magnetic moment and gradient of magnetic flux density. – M.: IPC Publishing Standards, 2013.
- [4] Mahavarkar P., John J., Dhapre V., Dongre V., Labde S. Tri-axial square Helmholtz coil system at the Alibag Magnetic Observatory: upgraded to a magnetic sensor calibration facility // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* – 2018. – V.7. – P.143–149.
- [5] Korobnikov A.G., Perechesova A.D., Kalapyshina I.I., Levanenko V.A., Gatchin Yu.A., Fedosovsky M.E., Polyakov V.I. Application of polymeric materials in the development of torsions used in highly sensitive systems for measuring low-frequency magnetic fields // *XXIV All-Russian Conference "Structure and Dynamics of Molecular Systems"*. Collection. Structure and Dynamics of Molecular Systems. edited by Shcherbina A.A. - 2017. - P. 46-54.
- [6] GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [7] Afanasyev Yu.V., Studentsov N.V., Khorev V.N., Chechurina E.N., Shchelkin A.P. Means of measuring magnetic field parameters L.: Energy, Leningrad Branch, 1979. - 320 p.
- [8] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // *Key Engineering Materials*. 2010. T. 437. C. 621-624.