

## Феррозондовый поисковый буксируемый магнитометр-градиентометр: опыт разработки

Любимов Владимир Валерьевич, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук  
Зверев Алексей Сергеевич, инженер  
Суменко Константин Георгиевич, инженер  
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

### ВВЕДЕНИЕ

Поисковый буксируемый феррозондовый магнитометр-градиентометр (МФМГ-1) является векторным прибором, который предназначен для измерения модуля (Т) вектора магнитной индукции (ВМИ) поля Земли и его градиента ( $\Delta T$ ) в двух разнесённых точках пространства, а также градиентов каждой из составляющих ВМИ при работе с использованием жёсткой «измерительной базы» [1, 2]. Этот прибор предназначен для проведения исследовательских, поисковых и специальных работ как на научно-исследовательских судах, так и на маломерных судах и немагнитных надувных плавсредствах (шлюпках, катерах, плотках).



Рис. 1. Общий вид комплекта поискового буксируемого феррозондового магнитометра-градиентометра МФМГ-1.

Прибор включает в себя две части: *забортную* и *набортную*, соединенные между собой кабелем-буксиром (при работе в режиме жёсткой «измерительной базы») или двумя кабелями при использовании двух погружных гондол (ПГ) отдельно, при работе с переменной «измерительной базой». Набортная часть прибора состоит из блока питания (БП) и персонального компьютера (ПК). Забортная часть прибора включает в себя буксировочный кабель и две ПГ (каждая размером 3170x1000 мм и массой около 10 кг), которые буксируется на расстоянии не менее трех длин корпуса судна-буксировщика от его кормы (не более 380 м). «Измерительная база» между ПГ может быть переменной длины и составляет от 20 до 100 м. При использовании жёсткой «измерительной базы», её величина может меняться в пределах 3..6 м. Общий вид рабочего комплекта МФМГ-1 представлен на *рис.1*.

Некоторые особенности конструкции созданного прибора и его метрологические, технические характеристики и эксплуатационные возможности обсуждаются ниже.

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА

Магнитоизмерительные преобразователи (МИП) прибора выполнены на базе феррозондовых датчиков (ФД). При создании прибора и поиске необходимых для использования в конструкции его МИП датчиков рассматривались варианты применения нескольких известных отечественных и зарубежных малогабаритных конструкций ФД, сравнительные основные технические характеристики некоторых из них представлены в *табл.1*.

Таблица 1. Сравнительные параметры ФД для применения их в МФМГ-1.

Параметры ФД	FL3-100	FLC3-70	НВ0302А	WFG-110	WFG-120	WFG-140
Фирма-производитель	Stefan Mayer Instruments, Германия		ООО «НПО ЭНТ», Россия	WUNTRONIC, Германия		
Диапазон, мкТл	±100	±200	±50...1000	±100		±100, ±1000
Относительная погрешность, %	0,5	±1 ±0,5 <u>диап.</u>	3 + 0,01 <u>диап.</u>	±0,2	±0,1	±0,2
Неортогональность осей, угл.град.	<0,5	±1	5 (0,5)	±2	±0,2	±0,2
Точность, нТл	<5	Не указаны	Не указаны	Не указаны		
Дрейф нуля, нТл/°С	<0,1	<2	<2	<±5	<±2	-
Рабочий диапазон частот, Гц	0...2000	0...1000	0...400	0...400		
Аналоговый выход, В	10	±4	10	±4	±4	10
Питание, В	±5 (12...16)	4,8...12	7...12	±5 (±7...±12)		±15
Ток потребления, мА	+22, -15 (4,4 мА/100мкТл)	6	60	+30, -30 (±20)	(±20)	+60, -60
Крутизна преобразов., В/мкТл	0,1	±0,0285	0,1	±0,04		0,1
Шумы в полосе 1 Гц, нТл	<20	<120	-	<300		<30
Размеры, мм	140x26x26	Ø25x50	Ø22x185	Ø18,4x38	70x19x19	118x38x38
Вес, г	115	80	100	18	30	



**Рис.2.** Общий вид двух ФД, применяемых в MFMG-1 (которые расположены в ПГ) и элемент бортовой части прибора – блок питания БП.

В результате анализа характеристик и проведённых сравнительных и оценочных экспериментальных работ для схемы МИП прибора были выбраны ФД типа FLC3-70 (Stefan Mayer Instruments, Германия), которые были испытаны и сертифицированы впоследствии во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Эти ФД реализуют отчётную точность измерения 1 нТл в диапазоне от 0 до  $\pm 70$  мкТл по каждому измерительному каналу. Общий вид двух используемых в приборе ФД показан на фото на *рис.2*

Главным критерием при выборе этого варианта ФД явилось более высокая точность измерений и низкое потребление (6 мА) энергии от однополярного источника питания. Низкое потребление (малое значение тока компенсации в измерительных обмотках ФД) было важно для уменьшения (или исключения) эффекта взаимовлияния измерительных каналов у трёхкомпонентного малогабаритного ФД друг на друга. Этот эффект возникает при резком изменении положения ФД в пространстве (например, при его буксировке в водной среде), что приводит к возникновению дополнительной погрешности при вычислении модуля (Т) вектора ВМИ поля Земли и градиента между датчиками ( $\Delta T$ ) даже на фиксированной «измерительной базе».

ПГ включает в себя магниточувствительный датчик (МЧД) и блок управления (БУ), расположенные на расстоянии около 40 см друг от друга. МЧД представляет собой трехкомпонентный ФД, установленный примерно посередине корпуса ПГ, а БУ включает в себя плату микроконтроллера (включающего трёхканальный АЦП и драйвер RS-422), плату инклинометров и датчик гидростатического давления (датчик глубины). БУ обеспечивает статистическую обработку сигналов с ФД, вычисления значений измеренного поля, формирования результатов измерений и передачи их в линию данных (через кабель-буксир). Помимо этого БУ обрабатывает данные, поступающие от цифровых инклинометров (датчиков положения в пространстве) и датчика глубины.

Наборная часть MFMG-1 (см. *рис.2*) включает в себя БП (размером 120x 50 x 200 мм и массой около 2 кг), в схему которого кроме источника питания входит и блок линии данных (БЛД), обеспечивающий обмен данными между ПК и бортовыми устройствами. Измеренная информация с помощью БЛД по линии связи (протокол RS-422) в цифровой форме передаётся на борт судна-буксировщика в ПК. По этой же линии связи осуществляется управление режимами работы прибора. Обе ПГ

оснащены также цифровыми датчиками гидростатического давления (MS5541B размером 6,2x6,4 мм) и инклинометрами (ADIS16209), установленными в непосредственной близости от ФД и позволяющими иметь информацию о глубине буксировки каждого ФД, а также и о динамике буксировочного процесса. Максимальная глубина буксировки ПГ не более 130 метров при использовании прибора в режиме измерения вертикального градиента поля (при использовании «вертикальной измерительной базы») или при «зависании ПГ на стопе» (при остановке судна). Точность измерения глубины хода ПГ составляет 0,2 м.

Программное обеспечение (ПО) MFMG-1 позволяет управлять основными параметрами процесса сбора данных, такими, как период снятия отсчетов, фильтрацией результатов измерений, записью данных в файл, визуализацией измеренных и других необходимых данных в реальном времени на дисплее ПК, а также осуществлять контроль глубины и визуализацию процесса буксировки ПГ. ПО также позволяет воспроизводить записанные данные и переводить их в формат, удобный для последующей обработки. Предусмотрена возможность работы прибора совместно с GPS-приёмником для привязки измеренных данных к координатам.

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА

Предварительные проверочные и метрологические поверочные испытания прибора проводились в абсолютном павильоне магнитной обсерватории (МО) «Москва» (в ИЗМИРАН). Основной целью испытаний было поведение исследований ФД с целью определения их предельных метрологических характеристик и их пригодности для использования в составе феррозондового градиентометра с жесткой или гибкой «измерительной базой» в движении.

Для проведения испытаний прибора и его метрологии применялась стандартная измерительная, специальная и уникальная аппаратура, а также специально изготовленные для проведения исследований приспособления:

- Колечная система (КС) Гельмгольца с известной постоянной ( $S_k=505$  нТл/мА);
- Двухкомпонентная КС Гельмгольца с известной постоянной ( $S_k=1000$  нТл/мА) с пультом управления и задания значений тока компенсации;
- Жидкостной уровень с точностью деления 20 угл.сек.;
- Специальный немагнитный юстировочный стол (см. *рис.3*);

- «Измерительный куб» с точными гранями и подставкой (для фиксации ФД);
- Немагнитная подставка с юстировочными ножками-винтами;
- Немагнитные юстировочные кольца и насадки на ФД для осуществления их поворота;
- Специальное немагнитное поворотное устройство с точной нониусной шкалой;
- Жесткая (немагнитная) измерительная «база» длиной 3 м.

В качестве контрольной специальной аппаратуры использовались протонный

магнитометр (ПМ) типа МР-03МО (вариационная станция, разработки ИЗМИРАН) [3] и пешеходный ПМ типа ММП-203 (аттестованный во ВНИИМ) [4].

Методика исследований была стандартной при определении чувствительности, крутизны и линейности преобразования ФД. Для определения углов отклонения осей

ФД от горизонтальной плоскости применялись жидкостной уровень и КС Гельмгольца (с известной постоянной  $S_k$ ), а также ПМ. Определение временного дрейфа ФД осуществлялось путем сравнения результатов измерений Т с данными параллельно работающими (в режиме вариационной станции) двух ПМ, установленных в соседних комнатах абсолютного павильона МО в течение продолжительного времени. Определение изменений показаний трехкомпонентного ФД по каждому измерительному каналу и по вычисленному модулю Т вектора ВМИ поля Земли при изменении его положения в пространстве определялось при помощи прикрепленных к МЧД двух инклинометров и ПК.

Работы по определению неортогональности чувствительных осей ФД и паразитному влиянию измерительных каналов друг на друга и на результаты общих измерений

проводились по специально разработанной методике. Для этого были изготовлены специальные немагнитные приспособления: «измерительный куб» с точными и ортогональными гранями для установки и крепления ФД (см. *рис.3*), поворотные устройства и немагнитные подставки. В процессе работ для контроля вариаций поля Т применялся ПМ а также использовалось специально созданное ПО.

Работы по измерению горизонтального градиента поля ( $\Delta T$ ) в пространстве проводились с помощью специально изготовленной жесткой «измерительной базы» длиной 3 м (см. *рис.3*). Предварительно была проведена скрупулезная юстировка измерительных осей обоих МЧД относительно этой «измерительной базы» и друг относительно друга с определенной и максимально достижимой точностью на уровне нескольких угловых минут.



**Рис.3. Фото различных приспособлений изготовленных для исследования ФД.** Фрагменты фото с экрана дисплея ПК (внизу слева) при исследовании одного из измерительных каналов МЧД MFMG-1 с результатами измеренных значений составляющих (X, Y, Z) вектора ВМИ поля Земли и вычисленного модуля (Т) в процессе проведения методических работ. Здесь также представлены данные цифровых инклинометров (X, Y, R).

Таблица 2

Значение магнитной индукции $B_0$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_x$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_y$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_z$ , нТл
+70000	-90	+70	+250
-70000	-410	-610	-300
+60000	-110	+30	+210
-60000	-390	-580	-270
+50000	-130	-40	+170
-50000	-370	-530	-220
+40000	-150	-80	+120
-40000	-350	-490	-180
+30000	-150	-100	+100
-30000	-330	-450	-150
+20000	-150	110	+50
-20000	-310	-410	-120
+10000	-10	-210	-10
-10000	-90	-300	-80
+5000	-30	-240	-30
-5000	-70	-280	-70
+3000	-40	-240	-40
-3000	-65	-270	-70
+2000	-40	-250	-40
-2000	-60	-270	-60
+1000	-40	-230	-40
-1000	-50	-260	-50
+500	+10	-230	+10
-500	-40	-110	-40

Таблица 3

Значение магнитной индукции $B_0$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_x$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_y$ , нТл	Значение поправки $\Delta V_z$ , нТл
+70000	+100	+150	+40
-70000	-340	-150	-160
+60000	+70	+130	+20
-60000	-300	-130	-140
+50000	+40	+110	0
-50000	-270	-110	-130
+40000	+10	+90	-20
-40000	-240	-90	-110
+30000	-10	+90	-20
-30000	-210	-70	-100
+20000	-30	+90	-30
-20000	-180	-60	-100
+10000	-100	0	-50
-10000	-160	+10	-70
+5000	-120	+10	-60
-5000	-140	0	-70
+3000	-135	+10	-60
-3000	-140	0	-70
+2000	-120	+10	-60
-2000	-135	0	-70
+1000	-130	0	-70
-1000	-140	0	-70
+500	-130	-10	-70
-500	-140	0	-70

### НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА

В результате проведённых испытаний и исследований МИП прибора были изучены некоторые возможности

(ранее не совсем нам понятные и о которых не было данных в проспектах) ФД и МЧД в целом и получены следующие результаты:

[www.esa-conference.ru](http://www.esa-conference.ru)

Исследована линейность преобразования поле-напряжение всех измерительных

каналов МЧД и определены коэффициенты преобразования по каждому из применяемых ФД. Результаты определённых поправок ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$ ) для ФД представлены в *табл.2* и *табл.3*

Определены погрешности результирующего поля при изменении наклона корпуса

МЧД на небольшие (до 3-х угловых минут) углы относительно горизонтальной плоскости и большие (до 10-ти угловых градусов) углы. Опытным путём было определено, что наклон отдельного ФД на угол  $\pm 3$  угл. минуты приводит к возникновению погрешности при вычислении модуля Т вектора ВМИ поля Земли от  $\pm 1$  до  $\pm 3$  нТл. При увеличении наклона ФД в любой плоскости на угол до  $\pm 10$  угл. градусов это значение погрешности увеличивается до  $\pm 50 \dots 100$  нТл.

Определены погрешности вычисления модуля Т вектора ВМИ поля Земли при

различной ориентации МЧД в пространстве и вычислены ошибки измерения в точке с известным значением поля Т. Смещение нуля в компонентах X, Y и Z составляет соответственно: (+120 и +220) нТл, (+20 и +300) нТл и (+110 и -30) нТл. При этом среднее квадратическое отклонение смещения нуля у обоих ФД составляет 15 нТл.

Исследованы временные дрейфы показаний каждого из МЧД прибора в течение 3...10 суток в сравнении с данными ПМ и протонной вариационной станции. Проведена сверка результатов измерений с ПМ при различных значениях поля Т и определена предельная чувствительность каждого из МЧД.

Исследованы погрешности измерения модуля Т и компонента ВМИ при изменении

углов крена и дифферента МЧД в известных полях с применением инклинометров (фрагменты фото с экрана дисплея ПК в процессе проведения работ показаны на

*рис.3* внизу слева). Эти погрешности для обоих углов составили  $\pm 0,1$  угл. град.

Определены значения неортогональности чувствительных осей используемых ФД

на основе предложенных различных методик исследований и изучено взаимовлияние каналов друг на друга в процессе проведения измерений в статике и при наклоне МЧД. Отклонение углов между магнитными осями (ZY, ZX и XY) ФД от 90 градусов составляет соответственно: (+1,2 и +0,9) угл. град., (+0,9 и -0,5) угл. град. и (+0,4 и +0,7) угл. град.

Проведена юстировка МЧД на жёсткой немагнитной «измерительной базе» длиной

3 м в горизонтальной плоскости и исследовано поведение этой «измерительной базы» в процессе ее перемещения в пространстве в различных плоскостях.

Исследована чувствительность MFMG-1 в режиме измерения градиента поля ( $\Delta T$ ) на жесткой «измерительной базе» в статике при перемещении металлических предметов в пространстве в непосредственной близости и на некотором отдалении относительно нее.

В процессе натурных испытаний прибора в морских условиях исследовались вопросы снижения погрешности измерения прибора различными доступными методами. Так уменьшение погрешности измерения Т было достигнуто при помощи устранения неортогональности измерительных осей ФД относительно друг друга электрическим (компенсационным) способом, а также улучшением стабилизации хода ПГ в процессе их буксировки с использованием механических стабилизаторов на их корпусах. В практике морских работ также очень эффективно было применение так называемых штанг-«выстрелов», позволяющих выводить кабель с буксируемым устройством (ПГ) из кильватерной струи. Эти устройства также могут оборудоваться резиновыми жгутами-амортизаторами для компенсации внезапных рывков судна на ходу.

#### Основные технические характеристики прибора обеспечивают:

Диапазон измерений модуля Т магнитной индукции	25 ... 65 мкТл
Диапазон регистрации градиента $\Delta T$ магнитного поля между двумя магнитометрическими каналами	0...10 мкТл
Диапазон регистрации глубины хода ПГ	0...130 м
Основную абсолютную погрешность, не более	5 нТл
Разрешающую способность цифрового отчётного устройства по всем измерительным каналам	0,1 нТл
Период измерений	~0,07 с
Максимальную скорость буксировки	10 узлов
Питание от сети переменного тока (потребление)	220 $\pm$ 22 В (50 В А).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитометр-градиентометр MFMG-1 прошёл натурные и эксплуатационные испытания на акватории Чёрного моря и показал удовлетворительные результаты. В процессе испытаний отработывалась методика работы с двумя ПГ с применением жёсткой и гибкой «измерительной базы». Фрагменты работы с прибором показаны на фото на *рис.4*

В последние годы магнитометр-градиентометр MFMG-1 активно использовался для проведения поисковых, научно-исследовательских и производственных работ на акватории Мирового океана в ряде рейсов научно-исследовательских судов сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова.



Рис.4. Проведение натурных испытаний MFMG-1 на акватории Чёрного моря.



[www.esa-conference.ru](http://www.esa-conference.ru)

### Литература:

1. Морской буксируемый феррозондовый магнитометр-градиентометр МФМГ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ООО «Спектр-Геофизика», М., 2009. -15 с.
2. Любимов В.В. Новые магнитометры для градиентометрических исследований: Обзор разработок // *Perspektywiczne opracowania sa nauka I technikami – 2012/* Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji 07 – 15 listopada 2012/ Fizyka. Vol.17, Przemysl. Nauka I studia, 2012. S.58-69.
3. Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 1: Протонные магнитометры // *Геофизический вестник*. М.: Евро-Азиатское геофизическое общество, 2014, №2. С.19-25.
4. Магнитометр пешеходный протонный ММП-203. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ФГУ НПП Геологоразведка: С.- Петербург, 1990. – 22 с.