

УДК 550.380.87

ФЕРРОЗОНДОВЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, СОЗДАННЫЕ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ (ОБЗОР РАЗРАБОТОК)

© 2025 г. В. В. Любимов¹, *

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН),

Москва, Троицк, Россия

*e-mail: lvv_store@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Работа посвящена описанию конструкции измерительного модуля (феррозондового магнитного компаса) и созданию на его основе различных магнитометрических приборов. Эти приборы предназначены для проведения геомагнитных и специальных работ в различных условиях и средах как для применения в стационарных пунктах наблюдений, так и для работы в условиях экспедиций.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитные измерения, магнитные съемки, магнитометры, градиентометры, магнитовариационные станции, феррозондовые магнитометры, измерительный модуль

DOI: 10.31857/S0016794025010116, **EDN:** ADKANT

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже давно умы конструкторов-приборостроителей магнитометрической аппаратуры в ИЗМИРАН занимала мысль о создании универсального, экономичного и компактного измерительного прибора для его использования при проведении научных исследований в различных условиях и средах с возможностью незначительного добавления в его схему дополнительных устройств, необходимых для проведения конкретных работ. В настоящее время возможности современной техники и технологий позволяют реально продвинуться по пути решения этой задачи. При этом в качестве основного элемента прибора, — магнитометрического датчика, — появилась возможность использовать малогабаритные феррозондовые датчики (ФД), которые в настоящее время промышленность научилась изготавливать довольно компактными, микропотребляющими и высокочувствительными [Любимов, 2024].

ФД представляет собой первичный магнитомодуляционный преобразователь, используемый в качестве магнитометра для преобразования магнитной индукции в электрический сигнал [Афанасьев, 1986]. Действие ФД основано на модуляции магнитного состояния ферромагнитного сердеч-

ника с помощью вспомогательного переменного магнитного поля (МП). Иногда ФД называют ферромодуляционным преобразователем, подчеркивая его принадлежность к магнитомодуляционным преобразователям. Классическая схема феррозонда включает в себя магнитопровод, обмотку возбуждения (питаемую переменным током) и измерительную обмотку (см. схему на рис. 1а).

В настоящее время существует множество различных конструкций магнитоизмерительных преобразователей (МИП), которые созданы на основе феррозондовых магниточувствительных датчиков (МЧД) [Афанасьев, 1986].

Как уже было сказано ранее, феррозондовые приборы характеризуются малогабаритностью и компактностью, малым энергопотреблением, высокой чувствительностью и точностью. Современные ФД и приборы на их основе обладают малыми собственными шумами, что позволяет проводить работы с высокой надежностью в очень слабых МП и широком диапазоне температур. Использование приборов (магнитометров) на основе ФД при проведении геомагнитных исследований позволяет (в отличие от других типов МЧД) реализовать возможность непосредственного измерения составляющих вектора магнитной индук-

ции (ВМИ), что обеспечивает получение полной информации о структуре поля и его источниках как на стационарных измерительных пунктах наблюдений, так и в движении, при проведении различного рода экспедиционных и поисковых работ.

Как у нас в стране, так и за рубежом уже существует большое число разработок МИП на основе ФД, которые имеют аналоговый или цифровой вывод измеряемой информации. Наряду с определенными достоинствами всех известных компонентных ФД (и МИП на их основе), таких как компактность и малое энергопотребление, эти приборы обладают некоторыми недостатками. К этим недостаткам относятся изменение и увеличение погрешности измерений за счет изменения внешней температуры окружающей среды (температурный дрейф), а также погрешность измерений за счет неконтролируемого изменения их ориентации в пространстве в процессе длительной эксплуатации. Вот эти параметры ФД необходимо контролировать и учитывать [Любимов, 1992, 2017, 2024], особенно при проведении длительных стационарных измерений как в условиях магнитной обсерватории (МО), так и при проведении экспедиционных работ.

Возможности современной техники позволяют в настоящее время реализовать не только контроль параметров ФД, накопление, обработку и коррекцию получаемых данных и их передачу по каналам связи на расстояние, но и иметь привязку и синхронизацию получаемых данных при проведении полевых работ, например, с помощью системы GPS.

В настоящем обзоре представлены некоторые проекты и конструкции магнитометров [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 1994, 2004, 2018, 2019а, б, в, 2020а, 2024; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019] для проведения долговременных и кратковременных измерений, имеющих высокую (на уровне 1 нТл и выше) разрешающую способность и выполненных на основе универсального измерительного модуля (ИМ), который может быть реализован с применением различных конструкций феррозондовых МЧД.

2. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

В начале 2009 г., в результате проведения экспериментальных и исследовательских работ с различными типами ФД, коллективом сотрудников под руководством А. С. Зверева была создана конструкция ИМ (см. рис. 1 σ) и всесторонне испытан опытный образец [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 2021; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019]. Этот ИМ являлся универ-

сальным шестиканальным преобразователем аналоговых геофизических данных с возможностью последующего их накопления, передачи на расстояние и регистрации в цифровом виде. Схема построения этого ИМ универсальна и технологична, что позволяет использовать его в составе различных измерительных комплексов при проведении работ в различных условиях и средах.

ИМ включает в себя три различных самостоятельных преобразователя аналог-цифра (см. рис. 1 σ): трехканальный МИП, трехканальный преобразователь углов наклона – цифровой инклинометр (ЦИ) и датчик температуры (ДТ). Сочетание магнитных датчиков с инклинометрами в практике геофизических работ называют бесплатформенным магнитным компасом (МК).

Использование в ИМ компонентных ФД и дополняющими их другими приборами (ЦИ и ДТ) позволяет компенсировать искажения МП, которые возникают из-за различных факторов, что позволяет избавиться от части дополнительной погрешности измерения, например, при изменении угла наклона датчика или влиянии температуры окружающей среды.

МИП построен на основе ФД и включает в себя три измерительных канала (ИК) для измерения составляющих ВМИ поля Земли D, H и Z. Функциональная схема ИМ представлена на рис. 1 σ и включает в себя: трехкомпонентный ФД, плату инклинометров (ПИ), которая включает в себя три ЦИ и ДТ, а также плату микроконтроллера (ПМК), в состав которой входят схемы АЦП, микроконтроллера (МК) с интерфейсом последовательного канала передачи данных (RS232) и блока питания (БП).

При создании прибора и поиске необходимых для использования МЧД в конструкции его МИП рассматривались варианты применения нескольких известных отечественных и зарубежных малогабаритных конструкций ФД (см. данные табл. 1 в работах [Любимов, 1994; Любимов и др., 2019]). В результате анализа характеристик и проведенных сравнительных и оценочных экспериментальных работ для базовой схемы МИП прибора были выбраны ФД типа FLC3-70 немецкой фирмы Stefan Mayer Instruments GmbH & Co. (<http://www.stefan-mayer.com>). Эти датчики реализуют отсчетную точность измерения 1 нТл в диапазоне от 0 до ± 70 мкТл и коэффициент преобразования поле–напряжение 35 мкТл/В по каждому ИК. При этом собственные шумы каждого ФД не превышают уровень 0.1–0.15 нТл. Общий вид используемого в схеме прибора трехкомпонентного ФД и некоторые варианты конструкций ИМ показаны на рис. 1 σ .

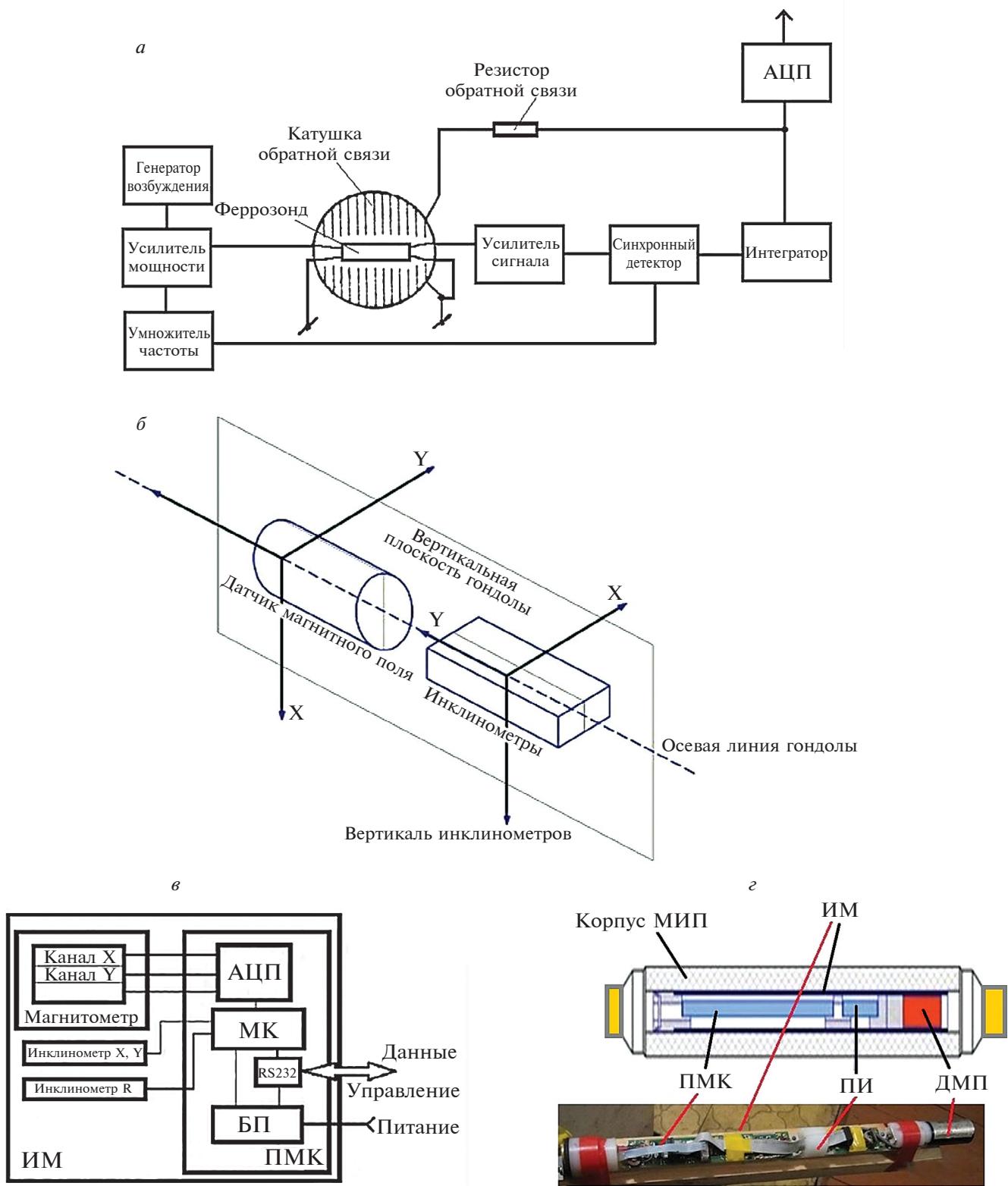


Рис. 1. Блок-схема одноканального феррозондового МИП (а), схема расположения ФД и ЦИ (б), функциональная схема ИМ (в) и конструкция ИМ (г).

Главными критериями при выборе этого варианта ФД явилась более высокая точность измерений и низкое потребление (6 мА) энергии от однополярного источника питания (ИП). Низкое потребление (малое значение тока компенсации в измерительных обмотках ФД) было важно для уменьшения (или исключения) эффекта взаимовлияния измерительных каналов друг на друга в конструкции трехкомпонентного малогабаритного ФД, особенно когда ИМ используется в процессе перемещения в пространстве.

Аналоговое напряжение (± 2 В) с выхода каждого из трех ИК (D, H и Z) МИП поступает на входы АЦП, который расположен на плате микроконтроллера (ПМК), где также находятся схемы МК с интерфейсом последовательного канала передачи данных (RS232) и БП. С выхода АЦП данные от МИП поступают на вход МК и далее через последовательный порт RS232 в цифровой форме на выход ИМ. Через этот последовательный порт RS232 осуществляется также управление извне (например, при помощи компьютера) режимами работы МИП, накоплением и коррекцией поступающих данных.

Для контроля пространственной ориентации ФД используется трехкомпонентный инклинометр, который выполнен на базе микросхемы ADIS16209 (<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16209.pdf>) и содержит два устройства (две микросхемы) для измерения углов наклона (см. рис. 1б, в). Выбор данной микросхемы для ЦИ был обусловлен ее компактностью, высокой точностью измерений (см. данные табл. 2 в работе [Любимов и др., 2019]), а также использованием однополярного ИП и малым энергопотреблением, что очень важно при установке ЦИ вблизи ФД. Главным достоинством этого ЦИ является наличие в нем встроенного ДТ, который позволяет проводить коррекцию измеряемых данных как ЦИ, так и ФД.

Инклинометры X, Y измеряют отклонения в горизонтальной плоскости, а инклинометр R измеряет угол наклона ФД в вертикальной плоскости. ЦИ жестко закреплены (см. рис. 1г) относительно ФД на плате инклинометров (ПИ) и удалены от них на расстояние 55 мм (для исключения влияния на результаты измерений ФД). При помощи инклинометров (одновременно и синхронно с измерением компонент ВМИ) осуществляется измерение и контроль трех углов отклонения измерительных осей ФД, а точность этих измерений составляет $\pm 0.1^\circ$.

Для обеспечения благоприятного температурного режима работы ФД вся схема ИМ размещена в немагнитном корпусе-контейнере (см.

рис. 1г), который в зависимости от условий применения может быть выполнен из дюраля или из пластика с минимальным внутренним диаметром 50 мм и длиной 250–300 мм.

Созданный ИМ на основе трехкомпонентного ФД является функционально законченной конструкцией прибора, который имеет достаточно высокие характеристики по точности измерений и низкое энергопотребление (не более 30 мА), что позволяет использовать его в виде универсального элемента для многих геофизических измерительных систем. Например, предложенная схема и конструкция ИМ была использована при разработках морских магнитометров и градиентометров [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 2019а, в, 2020а; Любимов и др., 2019], а также использовалась при создании поисковых полевых приборов [Любимов, 2020б] и магнитовариационных станций (МВС) [Любимов, 2021, 2024]. Следует отметить, что в зависимости от способа применения ИМ (при решении различных геофизических и специальных задач) его весовые характеристики (масса) могут быть изменены в пределах от 0.3 до 5 кг.

Ниже остановимся на новых решениях и конструкциях созданных приборов и на перспективных проектах реализации устройств и специальных приборов на основе ИМ.

3. МАГНИТОВАРИАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ

На основе универсального ИМ разработан новый магнитометрический прибор – феррозондовая МВС, который позволяет проводить измерения и научные исследования как в условиях МО, так и в условиях экспедиции, в поле [Любимов, 2021; Lyubimov, 2021б]. При этом использование ЦИ позволяет устанавливать в процессе исследований ФД произвольно, измерять составляющие ВМИ и вычислять его модуль.

Предложенная конструкция ИМ (и МВС на его основе) предполагает два основных варианта использования станции, которые показаны на рис. 2а. Первый вариант использования МВС предназначен для работы прибора в условиях МО или стационарного пункта наблюдения, где реализуется установка ИМ на немагнитном постаменте, оборудованном тремя ножками-винтами для нивелировки контейнера с МИП в горизонтальной плоскости (см. рис. 2б). При работе МВС в полевых условиях предусмотрен второй вариант – установка контейнера с ИМ в вырытой в земле яме, которая расположена ниже уровня земли (см. рис. 2а).

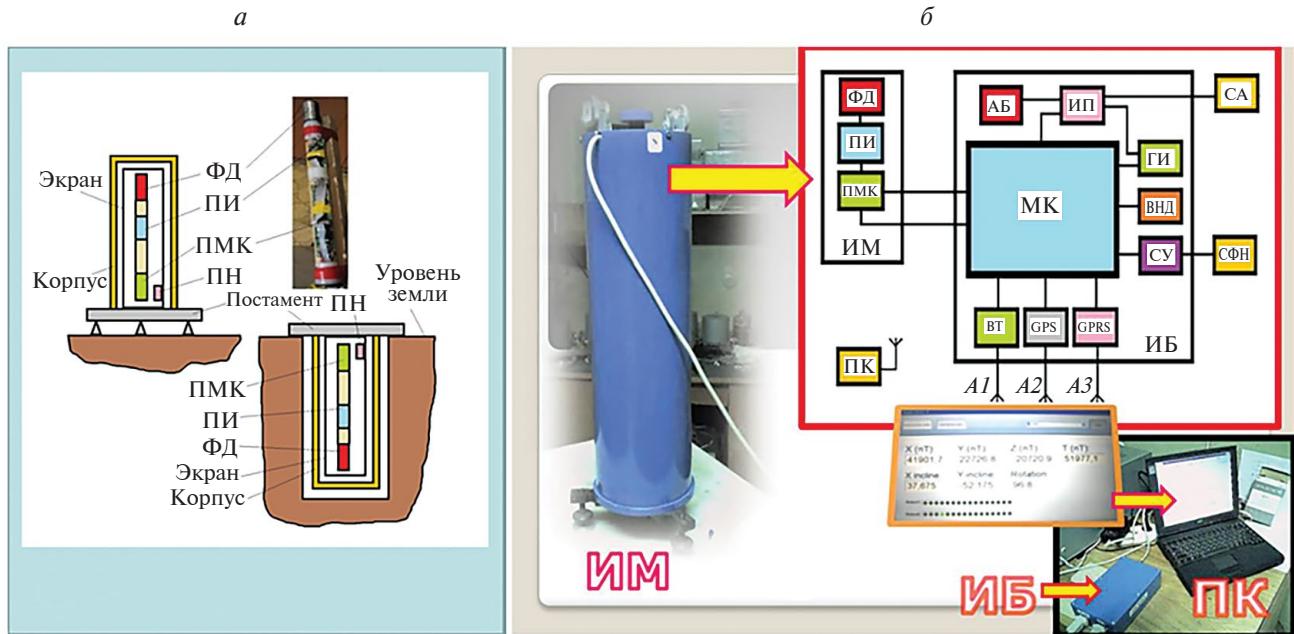


Рис. 2. Общий вид двух вариантов конструкции ИМ: настольный вариант для работы в МО и экспедиционный вариант (а) и функциональная схема МВС с регистрацией данных на ПК (б).

Как было отмечено ранее, основная схема ИМ (в конкретном случае применения) дополнительно оборудована подключенным к МК по линии связи (RS232) цифровой ДТ. Этот датчик установлен (см. рис. 2) внутри корпуса ИМ и расположен вблизи от ФД, что позволяет с точностью 0,1°C контролировать температуру рядом с ФД. ДТ выполнен с применением микросхемы типа LM35D, имеет пластиковый корпус исполнения и потребляет ток не более 60 мкА, что позволяет исключить его электромагнитное влияние на результаты измерений ФД.

Для обеспечения благоприятного температурного режима работы ФД вся схема ИМ размещена в немагнитном корпусе-контейнере, который выполнен из дюраля или из пластика (ПХВ или стеклоэпоксидная труба) с размерами Ø150×300 мм. Внутри корпуса установлена утепляющая вставка из пенопласта толщиной 20 мм (на рис. 2а не показана), за которой расположен экран, выполненный из фольгированного двухстороннего стеклотекстолита (толщиной 1 мм), который одновременно является электростатическим экраном для ФД. Внутри этого экрана закреплен (припаян) нагревательный элемент (НЭ), который выполнен на основе малогабаритного керамического саморегулирующего позисторного нагревателя (ПН) типа СТ6-1Б-1 [Любимов, 2017].

ПН питается напряжением постоянного или переменного (превышающего примерно на порядок частоту возбуждения ФД) тока от схемы БП. При этом контроль температуры осуществляется ДТ и регулируется при помощи МК.

Функциональная схема МВС (построенная на базе ИМ) показана на рис. 2б. Здесь также представлен внешний вид одного из созданных вариантов МВС для МО. Схема МВС включает в себя: ИМ и измерительный блок (ИБ), которые соединены между собой кабелем, для подачи питающего напряжения от ИП, обмена данными и управляющими сигналами между блоками по стандарту RS232 на расстоянии до 25 м.

В состав ИБ входят следующие функциональные узлы: МК, схема управления (СУ), графический индикатор (ГИ), аккумуляторная батарея (АБ), источник питания (ИП), а также приемник GPS и модули передачи данных Bluetooth (BT) и GPRS с антеннами соответственно A2, A1 и A3.

Модуль GPS оснащен по выходу временными стробами. Модуль Bluetooth имеет опции дальности передачи данных: модуль 2 класса – до 30 м, модуль 1 класса – до 100–200 м, а модуль 1 класса с выносной антенной – до 300–400 м. Конструкция модуля GSM выполнена с применением сменной SIM-карты.

В состав схемы ИБ также входят часы реального времени (с энергонезависимым питанием)

и “буферная” энергонезависимая память (ЭП) – внутренний накопитель данных (ВНД) объемом 8 Мб.

Перед началом проведения работ цикл измерений МВС устанавливается при помощи внешнего персонального компьютера (ПК) и специального программного обеспечения (ПО). Общий вид получаемых МВС данных в цифровой форме на дисплее ПК представлен на рис. 2б. ПО позволяет получать также данные в графическом виде, производить по измеренным составляющим ВМИ вычисление и визуализацию модуля ВМИ (Вт), а также проводить коррекцию получаемых магнитометрических данных на основании данных ЦИ и встроенных ДТ.

В качестве внешнего съемного накопителя цифровых файловых данных (СФН) используется накопитель на ЭП объемом до 4 Гб, который подключается к ИБ и позволяет накапливать измеренные данные в автономном режиме работы, без подключения ПК.

МВС позволяет накапливать и хранить данные в процессе проведения работ во внутреннюю ЭП, а также передавать накопленные данные по имеющимся каналам GPRS и BT на удаленный приемный пункт (компьютер).

Общее потребление схемы ИМ в данной конструкции (без НЭ) – не более 25 мА, а общее потребление всего прибора в режиме передачи данных через канал связи составляет 250 мА. Питание МВС может осуществляться как от АБ напряжением 7–24 В, так и от сети переменного тока 220В (50 Гц) при помощи сетевого адаптера (СА) напряжением 12–24 В.

4. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МАГНИТОМЕТР-ГРАДИЕНТОМЕТР

Многоканальный МГ (ММГ) [Любимов, 2020б] является универсальным прибором, который позволяет проводить компонентные (или модульные) геомагнитные исследования с целью картирования местности, поиска локальных магнитных аномалий. ММГ применяется для поиска локальных ферромагнитных объектов, которые расположены в толще немагнитной среды (в грунте или воде). Методика измерений предполагает одновременное параллельное перемещение МЧД, которые расположены на определенном и устанавливаемом расстоянии (ИБ) друг от друга, в пространстве с одновременным проведением измерений и вычислений элементов ВМИ. В данном варианте конструкция прибора построена с применением пяти МИП. Такая конструкция измерительной

части прибора позволяет за один проход исследовать достаточно большую площадь по ширине, которая может быть переменной и шире, чем у известных современных специальных приборов [Звежинский и Парфенцев, 2009а, б].

Каждый МИП представляет собой ИК и выполнен на основе ИМ и ФД, в качестве которого используется прибор типа FLC3-70. Разрешающая способность каждого из ИК составляет 1 нТл. Применение ЦИ в данной конструкции прибора позволяет обеспечить измерение градиента МП и составляющих ВМИ в процессе движения не хуже 1–5 нТл.

Структурная схема ММГ представлена на рис. 3а. На рис. 3б и рис. 3в показаны соответственно схема расположения основных функциональных узлов прибора при проведении работ по измерению горизонтального градиента (ГГ) и вертикального градиента (ВГ) МП и возможные варианты применения прибора.

На рис. 3а представлена развернутая функциональная схема ММГ, которая реализует основную идею метода измерения градиента ВМИ как на суше, так и в водной среде. При использовании прибора в водной среде дополнительно используется длинный специальный кабель и датчики гидростатического давления (ДГД), которые монтируются в корпус каждого МИП. На рис. 3б показаны схема расположения основных узлов прибора в процессе проведения исследований и возможные варианты его использования при измерении ГГ и ВГ магнитного поля.

На рис. 3в представлены возможные способы проведения исследований с использованием прибора в пешеходном, автомобильном или морском варианте.

Функциональная схема ММГ (см. рис. 3а) включает в себя пять МИП, которые расположены на устройстве их крепления (УКИМ) на определенном (заданном или зависящем от ширины места исследований и размеров УКИМ) расстоянии друг от друга. Каждый МИП подключен через канал передачи данных RS232 к ИБ. В состав ИБ входят следующие функциональные узлы: МК, схема управления (СУ), графический индикатор (ГИ), АБ, ИП, ДТ, а также приемник GPS и модули передачи данных Bluetooth (BT) и GPRS с антеннами А1–А3.

Система передачи данных ММГ, включающая в себя приемник GPS и модули передачи данных BT и GPRS с антеннами, как и схема ВНД, аналогичны тем, что используются в конструкции МВС и описаны выше.

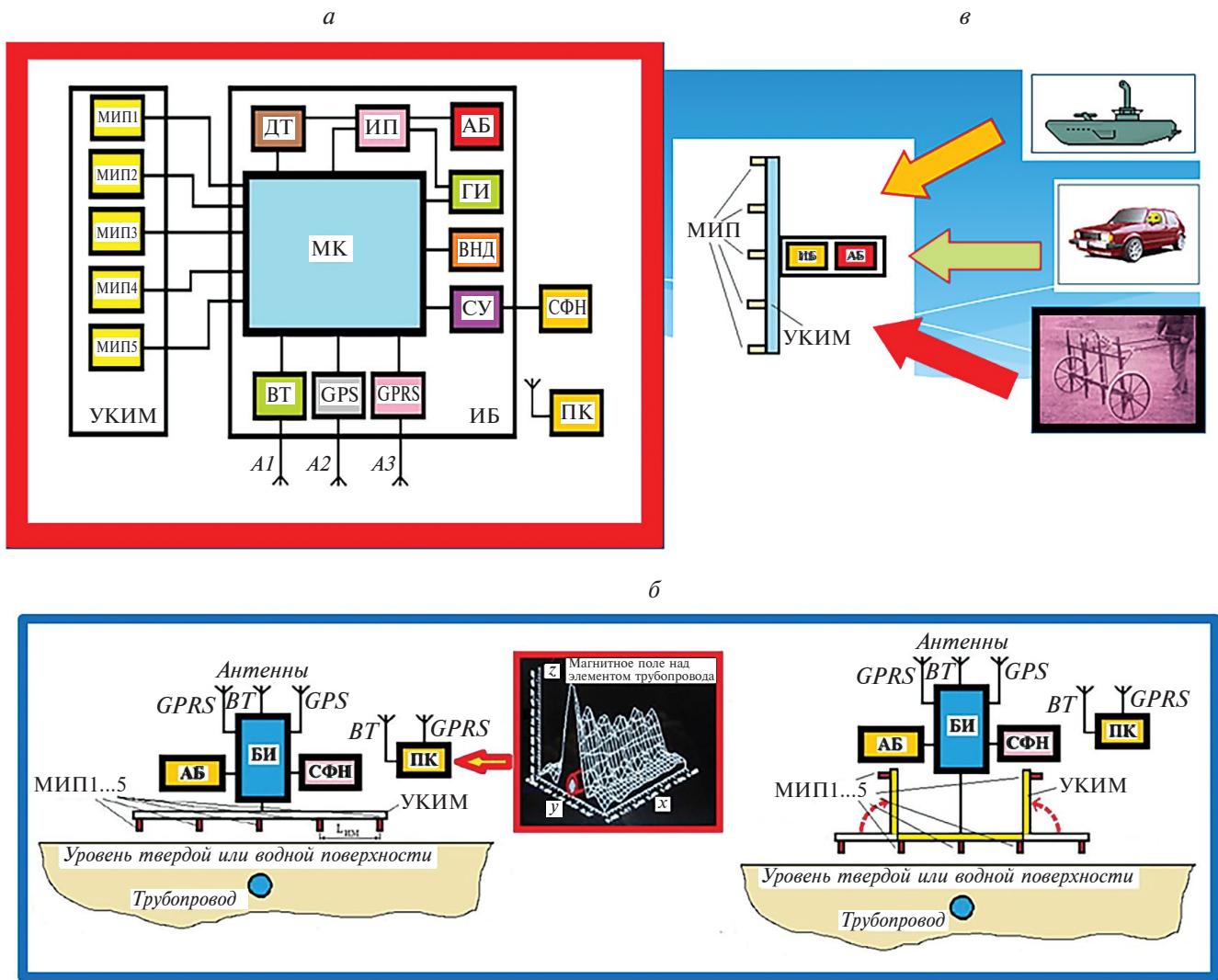


Рис. 3. Функциональная схема прибора (а), схема расположения основных функциональных узлов прибора при проведении работ по измерению ГГ и ВГ (б) и возможные варианты применения прибора (в).

ММГ позволяет накапливать и хранить данные в процессе проведения работ во внутреннюю ЭП, а также передавать накопленные данные по имеющимся каналам GPRS и BT на удаленный приемный пункт (компьютер). Общее потребление одного МИП – не более 15 мА, а общее потребление всего прибора в режиме передачи данных через канал связи составляет 250 мА.

ММГ можно успешно использовать в пешеходном режиме, а также и при движении с его буксировкой в качестве прицепа к транспортному средству по земной поверхности или на плоту – по воде. Прибор позволяет одновременно регистрировать данные каждого из МИП и градиенты поля между ними.

Уникальность конструкции ММГ состоит в том, что при измерении ВГ или ГГ магнитного поля нет необходимости юстировать измерительные оси МЧД относительно друг друга (как это делается в большинстве выпускаемых приборов [Звежинский и Парфенцев, 2009а, б]) с высокой точностью. Эту работу берет на себя ЦИ и МК, которые в процессе проведения измерений вносят корректизы и вычисляют реальные значения, измеренные МЧД.

Использование компонентных измерений, – одновременно синхронное измерение ГГ и ВГ составляющих ВМИ в процессе магнитной съемки, – повышают точность и информативность проводимых исследований. Это особенно важно

при поиске и определении локальных аномалий, что значительно труднее сделать при использовании модульных магнитометров или однокомпонентных градиентометров.

5. ГРАДИЕНТОМЕТР ДЛЯ ГИДРОМАГНИТНЫХ СЪЕМОК

Морской компонентный градиентометр (МКГ) был разработан на основе феррозондового ИМ [Зверев и Любимов, 2019; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019]. Созданный прибор предназначен для относительных измерений МП в пространстве в точках и градиента между ними в морских условиях при проведении гидромагнитной съемки (ГМС), в том числе может эффективно использоваться для поиска ферромагнитных предметов и объектов.

Прибор включает в себя две основные части, соединенные между собой кабелем-буксиром, — забортную и набортную. Функциональная схема МКГ представлена на рис. 1 в работе [Зверев и Любимов, 2019].

Набортная часть прибора включает в себя блок питания (БП) и персональный компьютер (ПК) и устанавливается на борту судна-буксировщика. Забортная часть прибора включает в себя два буксировочных кабеля (БК) и две погружные гондолы (ПГ), которые буксируются на расстоянии (для исключения влияния магнитной мас-

сы судна) не менее трех длин корпуса судна-буксировщика от его кормы.

Скорость буксировки ПГ ограничена в пределах от 3 до 10 узлов при допустимой амплитуде волнения моря не более 5 баллов. Общий вид отдельных частей прибора и схема его использования при проведении ГМС показаны соответственно на рис. 4а и рис. 4б. ПГ сконструирована таким образом, чтобы иметь возможность буксировки на горизонтах и глубинах до 130 м. Глубина погружения каждой из ПГ фиксируется при помощи встроенного датчика гидростатического давления (ДГД), позволяющего иметь информацию о ходе и глубине буксировки ПГ с точностью не хуже 0,2 м.

Блок-схема измерительной части МКГ (измерительного модуля — ИМ) прибора, который расположен в каждой из ПГ, включает в себя плату МК, плату ЦИ и МЧД. Измерение составляющих ВМИ в приборе и градиента между ними осуществляется с помощью двух аналоговых трехкомпонентных ФД типа FLC3-70. Аналоговые сигналы, которые поступают с каждого из трех ИК обоих ФД, соответствующих компонентам ВМИ, преобразуются в цифровой код с помощью 24-разрядного АЦП.

Для контроля пространственной ориентации ФД используется двухкомпонентный ЦИ, который содержит два устройства для измерения угла наклона. Инклинометр X, Y измеряет отклонения от горизонтали плоскости, проходящей через осевую линию гондолы и перпендикулярной “вертикали” гондолы, инклинометр R измеряет угол наклона (вращения) гондолы в плоскости, перпендикулярной осевой линии. Расположение ЦИ относительно ФД в ПГ показано на рис. 1б. С помощью инклинометров осуществляется измерение углов крена и дифферента ПГ, при этом точность этих измерений составляет $\pm 0.1^\circ$. Как было показано выше, для контроля глубины хода ПГ применяется цифровой ДГД, который расположен внутри ПГ на максимальном удалении от МЧД. Чувствительный элемент ДГД соединяется с помощью канала с внешней средой (водой).

Информация с каждой ПГ по последовательному интерфейсу RS422 передается по кабелю на борт судна. Проходя через набортное устройство преобразования интерфейса (ПИ), которое входит в состав БП, данные преобразуются в стандарт RS232 и поступают на ПК. С помощью ПО осуществляется накопление и обработка данных и их визуализация в той или иной форме на экране ПК. Для точной временной привязки текущих измерений к СОМ порту компьютера подключен GPS-приемник.

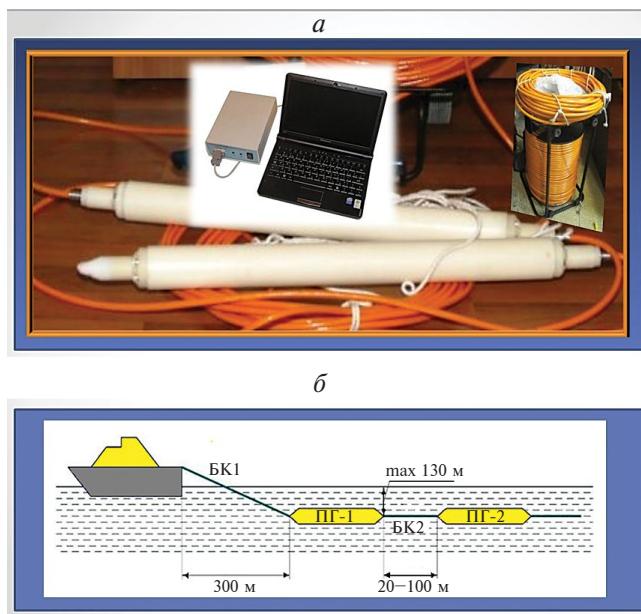


Рис. 4. Общий вид набортной и буксируемой частей МКГ (а) и схема буксировки прибора (б).

В качестве БК используется немагнитный кабель на основе кевлара с повышенным разрывным усилием, порядка 1500 кг. Этот кабель (см. рис. 4а) имеет внешний диаметр 12 мм и включает в себя две токопроводящих жилы для подачи напряжения питания, две витых пары для передачи цифровой информации и экран. Длина БК, соединяющего ближнюю БГ с набортной частью прибора, составляет 380 м. Для измерения ГГ при ГМС на разных ИБ в комплект МКГ входит два аналогичных кабеля длиной 100 м и 20 м.

Конструкция ПГ в сборе [Любимов и др., 2019] состоит из немагнитного корпуса с закрепляемыми на нем съемными стабилизатором и грузом. Стабилизатор предназначен для увеличения устойчивости ПГ при буксировке, а груз необходим для уменьшения колебаний гондолы вокруг продольной оси и для фиксации положения ее вертикальной плоскости. Ближняя от корпуса судна БГ имеет два кабельных ввода, а дальняя БГ – один.

МКГ имеет измерительные диапазоны по всем компонентам ВМИ по каждому из магнитометрических ИК от 0 до ± 70 мкТл, при этом основная погрешность измерений составляет не более 5 нТл, а точность отсчета, реализуемая при помощи АЦП, составляет 0.1 нТл. Диапазон регистрации градиента между МЧД в ПГ по каждому из измерительных магнитометрических каналов лежит в пределах от 0 до ± 10 мкТл. Диапазон регистрации глубины погружения БГ от 0 до 130 м, при этом точность регистрации глубины хода и погружения составляет 0.2 м.

Информация от измерительных каналов магнитометров в двоичном коде выводится через последовательный интерфейс RS422 по линии связи (две жилы буксировочного кабеля) в набортное регистрирующее устройство со скоростью 115200 бод.

В процессе морской съемки (МС) питание прибора (при использовании морских судов) осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой 50 ± 5 Гц, при этом потребляемая мощность составляет не более 50 ВА. Для работ, выполняемых с использованием различного типа малых “плавучих средств”, предусмотрена возможность питания МКГ от АБ на напряжением 10–15 В.

Корпуса обеих ПГ, выполненных на основе полиуретановой немагнитной трубы (толщина стенок корпуса 18 мм), имеют габаритные размеры: диаметр 70 мм и длину 1000 мм. Масса ПГ, включая расположенные внутри нее ИМ и МЧД, составляет не более 10 кг, а общая масса применяемого в приборе в различных вариантах используемого

зования БК, составляет не более 100 кг. Набортная часть МКГ, БП (размером $120 \times 50 \times 200$ мм) и ПК имеет массу не более 5 кг.

6. МОРСКОЙ МАГНИТОМЕТР-ГРАДИЕНТОМЕТР

Для реализации способа МС, который предложен в работе [Любимов, 2019в], была предложена новая конструкция морского компонентного магнитометра (МКМ), выполненного на основе ИМ. Этот способ измерения градиента МП в водной среде используется при МС, что позволяет повысить точность измерения путем исключения погрешностей, связанных с переменными условиями буксировки ПГ такими как: нестабильность ИБ, “рысканием” и различным заглублением ПГ [Любимов, 2019а, в]. Применение только одной буксируемой ПГ значительно упрощает методику работ (особенно спуско-подъемных), а также работ, связанных с выводом двух или нескольких ПГ при буксировке, например, при измерении ГГ МПЗ, на один горизонт. При этом в качестве главного элемента синхронизации (и метрологического инструмента для реализации точности) всех измерительных процессов магнитометрической аппаратуры используется акустический канал, включающий в себя управляемый импульсный пневмоизлучатель (ПИ), установленный на судне-буксировщике, и пьезо-приемник давления (ППД), установленный в буксируемой ПГ. Этот канал формирует импульс ультразвуковой энергии (эхо-сигнал акустической волны), который распространяется в водной среде с некоторой скоростью $V_{\text{зв}}$.

На рис. 5 представлена структурная схема устройства, которое реализует основную идею способа измерения градиента МПЗ на море. Это устройство содержит немагнитную буксируемую ПГ, внутри которой расположены ИМ и различные датчики. ИМ содержит микроконтроллер (МК1), АЦП, преобразователь питания (ПП) и интерфейс для передачи данных и управления работой (RS422). К этому ИМ (через АЦП) подключены ФД (три измерительных канала X, Y, Z) магнитометра, два инклинометра (измерительные каналы X, Y и R), датчик гидростатического давления (ДГД) и ППД.

ПГ буксируется при помощи кабеля произвольной длины за кораблем. Как правило, длина кабеля-буксира выбирается после практического определения магнитного момента судна-буксировщика и не должна быть менее 2–3 длин его корпуса. Также при выборе длины кабеля-буксира имеет значение размер акватории, где производится МС, и ее глубина.

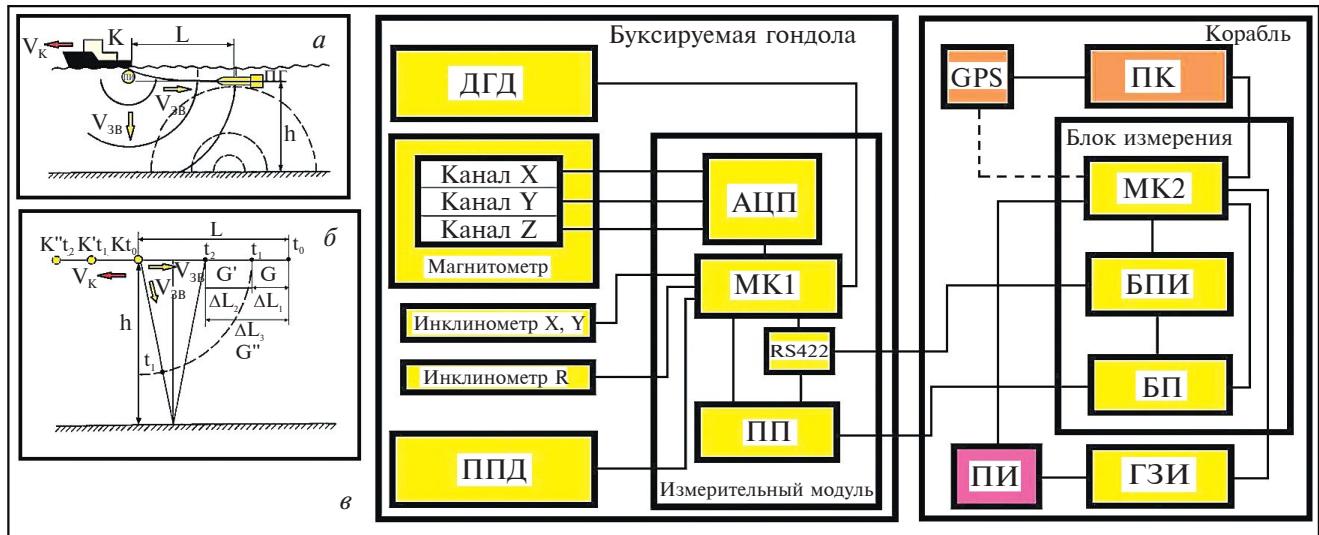


Рис. 5. Структурная схема МКМ для измерения горизонтального градиента МПЗ в водной среде.

На корабле расположены блок измерения (БИ), с подключенными к нему персональным компьютером (ПК), приемником GPS, генератором зондирующих импульсов (ГЗИ) и пневмоизлучателем (ПИ). В состав БИ, являющимся основным элементом синхронизации работы всей системы, входит микроконтроллер (МК2), блок преобразования интерфейса (БПИ) и блок питания (БП).

МК1, расположенный в ПГ, осуществляет синхронизацию и управление получением данных от датчиков в цифровой форме и передачу их через интерфейс RS422 на борт корабля. МК2 осуществляет полную синхронизацию всех данных с мировым временем и их позиционирование с помощью системы GPS, а также осуществляет управление акустическим каналом синхронизации измеренных данных при помощи ГЗИ и ПИ. При этом может быть реализовано два варианта использования ПИ, который может быть жестко закреплен на корпусе корабля или буксироваться за его кормой.

Точность измерения ИБ в предлагаемом устройстве при измерении горизонтального градиента МПЗ определяется параметрами излучаемого ПИ импульса ультразвуковой энергии и позволяет иметь разрешение в условиях ГМС порядка 1–10 см. В качестве ДГД применяется датчик с цифровым выходом (микросхема MS5541B), который позволяет контролировать глубину буксировки ПГ с точностью до 20 см.

Точность измерения МКМ составляющих МПЗ определяется параметрами самих применяемых в магнитометре ФД (в данной конструкции

использован ФД типа FLC-70, имеющий неортогональность осей $\pm 1^\circ$), а также точностными параметрами ЦИ. Оба инклинометра выполнены на основе цифровой микросхемы ADIS16209, которая в настоящее время является наиболее точным интегральным измерительным инструментом. Это позволяет обеспечить точность измерения углов при буксировке ПГ порядка 0.1° (угл. градуса) при разрешающей способности 0.025°.

Опыт применения ЦИ (и, в частности, данной модели) при создании морских магнитометров с буксируемыми ПГ обеспечивает измерение составляющих ВМИ в процессе проведения МС не хуже 1–5 нТл [Любимов, 2019в, 2020а; Любимов и др., 2019].

7. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМ

Созданная конструкция ИМ на основе трехкомпонентных ФД может найти свое применение в различных сферах научной, исследовательской, медицинской деятельности [Gurfinkel' et al., 1995а, б; Lyubimov, 2021а]. В том числе – для электромагнитного мониторинга окружающей среды и специальных исследований, например, в радиотехнической промышленности, а также и в военных целях [Афанасьев, 1986; Любимов, 1994, 2004, 2018, 2019б, 2024]. При этом созданная конструкция ИМ компактна, обладает высокой чувствительностью (на уровне единиц нТл) и малым энергопотреблением.

На основании проведенных исследований и полученного опыта предлагается применение нескольких ИМ в медицинских палатах, магнитных камерах и в производственных рабочих помещениях для проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды. С помощью необходимого ПО возможно построение карт магнитной обстановки в исследуемых помещениях и рабочих комнатах в реальном масштабе времени [Любимов, 2004, 2018, 2019б, 2024].

При использовании измерительной схемы, показанной на рис. 6а, появляется возможность исследовать (с использованием нескольких ИМ) в помещении магнитный момент (ММ) различных изделий, например, крупных научных и других приборов, спутников, различной специальной техники. При этом появляется возможность многоканальных измерений как ММ (при вращении испытуемого объекта в отдельных плоскостях и направлениях), так и проводить трехкомпонентные градиентные измерения (в том числе модуля ВМИ-Вт).

При организации аналогичной (как на рис. 6а) измерительной многоканальной схемы (4 и более ИМ) в полевых условиях появляется возможность для проведения специальных работ, например, исследования ММ у танков, спецмашины, бронетехники, различного оружия. Так, при установке нескольких ИМ в водной среде (в руслах рек и каналов или на плотах) можно исследовать ММ как различных плавсредств, так и кораблей и подводных лодок (см. рис. 6б).

Данное решение устройства на основе ИМ вполне применимо для охранной высокоточной деятельности и для защиты морских и сухопутных границ (см. рис. 6в). Его можно использовать на немагнитных дрейфующих (в том числе метеозондах и высоколетящих) аэростатах [Любимов, 2024] при проведении научных специальных гравиометрических исследований с большой “измерительной базой” (см. рис. 6г).

В настоящее время применение магнитометрической аппаратуры на основе ФД становится актуальным для проведения научных исследований

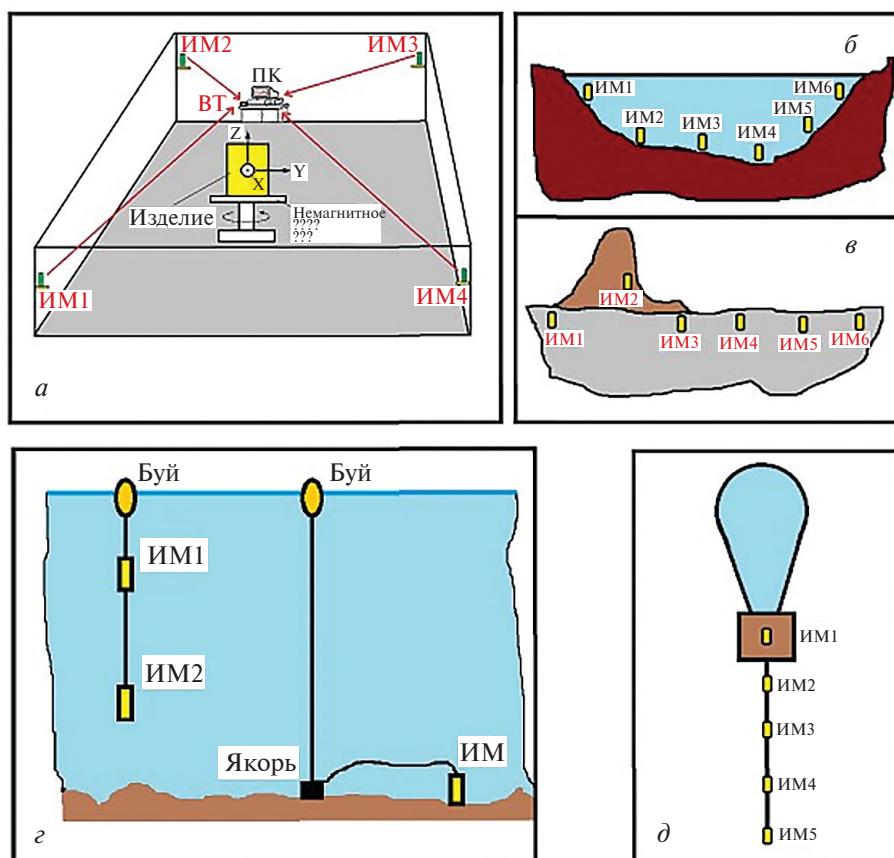


Рис. 6. Схемы проведения исследований с применением ИМ: по изучению ММ изделия (а) и проведение многоканальных градиентометрических измерений в водной среде (б, г), на суше (в) и в воздухе (д).

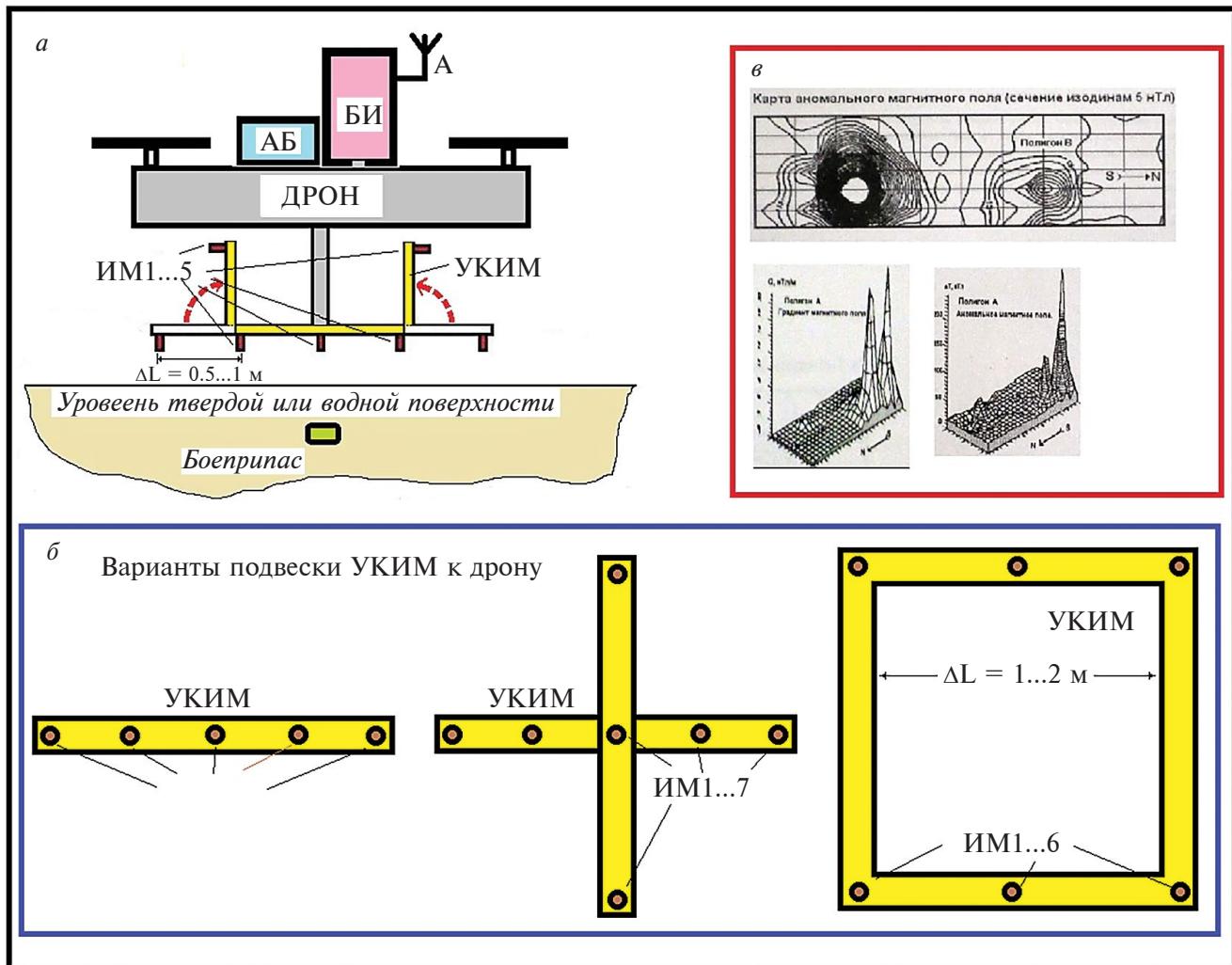


Рис. 7. Конструкция многоканального магнитометра-градиентометра для установки на низколетящих дронах разных конструкций (а), варианты подвески различных конструкций УКИМ (б) и пример проведения поисковых работ при обнаружении магнитных объектов (в).

и поисковых работ с низколетящими над земной или водной поверхностью аппаратами, любого типа БПЛА (дронов) с полезной нагрузкой 2–5 кг.

Предложенная конструкция многоканального магнитометра-градиентометра для дрона (МГД), созданная на базе ИМ и показанная на рис. 7а, предназначена для площадных съемок, когда наземные пешеходные и автомобильные съемки не возможны. МГД может использоваться для съемок с высоким разрешением для обнаружения небольших объектов в земле, например, мины, бомбы и неразорвавшиеся боеприпасы, а также при проведении археологических изысканий.

Применение специального ПО обеспечивает накопление измеренных данных во внутреннюю

ЭП или передачу данных в режиме реального времени, как это выполнено у ММГ. Применение низко потребляющих малогабаритных МЧД в схеме прибора делает его достаточно экономичным и позволяет более длительное время его использования от АБ в процессе съемки. А также значительно уменьшить общий вес УКИМ. Варианты подвески различных конструкций УКИМ к дрону показаны на рис. 7б.

Пример обнаружения магнитных объектов в процессе проведения исследований с использованием МГД представлен на рис. 7в, на котором показаны карты аномального МП и его градиента при проведении поисковых работ на одном из полигонов.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре показано несколько конструкций магнитометрических приборов для долговременных и кратковременных измерений на основе ИМ, имеющих высокую (на уровне 1 нТл и выше) разрешающую способность и позволяющих проводить как научные и геофизические исследования, так и специальные работы в различных направлениях. При этом основное направление разработок было направлено на компактность создаваемых приборов и их экономичность с использованием самой передовой зарубежной элементной базы.

В настоящее время возникает настоятельная необходимость в отечественном приборостроении ориентироваться на применение собственной продукции приборостроения и элементной базы. Например, в качестве ФД для новых разработок ИМ можно достаточно успешно применять российские трехкомпонентные МЧД НВО391.5-20/3, НВО391.5-35/3 или преобразователи НВ0302 (различных модификаций), выпускаемые фирмой ООО “Магнитные приборы” (www.magnetic.spb.ru). Основные технические характеристики этих МЧД не очень заметно отличаются от лучших на данный момент зарубежных образцов ФД [Звежинский и Парфенцев, 2009а, б; Любимов и др., 2019].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хотел бы выразить благодарность и признательность инженерам, ученым, научным сотрудникам и медицинским работникам (Выдрину В.В., Гурфинкелю Ю.И., Звереву А.С.) – участникам и идеологам работ, которые внесли большой личный вклад в создание феррозондовых магнитометров и проведение уникальных исследований с ними. Хотелось отметить также авторов уникальных компьютерных программ (Кириакова В.Х., Суменко К.Г.), созданных для различных модификаций современных феррозондовых приборов, которые используются в настоящее время при проведении научных изысканий и проведении специальных работ в различных условиях и средах [Любимов, 2024]. При использовании созданного оригинального ПО результаты исследований с помощью созданных устройств на основе феррозондовых МЧД могут легко интегрироваться во многие отечественные и зарубежные проекты по спору, обработке и коллекционированию полученных цифровых данных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 188 с. 1986.

- Звежинский С.С., Парфенцев И.В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. № 1. С. 16–29. 2009а.
- Звежинский С.С., Парфенцев И.В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов. Окончание // Спецтехника и связь. № 2. С. 16–23. 2009б.
- Зверев А.С., Любимов В.В. Градиентометр для гидромагнитной съемки // Датчики и системы. № 12 (242). С. 46–50. 2019. <https://doi.org/10.25728/datsys.2019.12.7>
- Любимов В.В. Феррозондовые магнитометры. Вопросы разработки. Часть 1: Способ устранения температурной нестабильности компенсационной обмотки датчика. Препринт № 50 (997). М.: ИЗМИРАН, 29 с. 1992.
- Любимов В.В. Феррозондовые диагностические магнитометры, созданные в ИЗМИРАН в период с 1989 по 1994 гг. (Обзор). Препринт № 15 (1065). М.: ИЗМИРАН, 19 с. 1994.
- Любимов В.В. Приборы для электромагнитного мониторинга и экологических исследований окружающей среды // Датчики и системы. № 9. С. 25–27. 2004.
- Любимов В.В. К вопросу повышения точности измерений магнитного поля: Опыт термостатирования датчиков магнитометров // Приднепровский научный вестник. Т. 3. № 4. С. 84–93. 2017.
- Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 2: Инструментарий для электромагнитного мониторинга окружающей среды и некоторые результаты его применения // Приднепровский научный вестник. Т. 6. № 12. С. 3–19. 2018.
- Любимов В.В. К вопросу измерения градиента магнитного поля на море: новая идеология создания приборов для ГМС // Проблемы научной мысли. Т. 5. № 11. С. 3–12. 2019а.
- Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 3: Приборы для медико-биологических исследований и электромагнитного мониторинга окружающей среды // Евразийское научное объединение. № 6 (52). С. 91–98. 2019б. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3271160>
- Любимов В.В. Способ измерения горизонтального градиента магнитного поля в водной среде и устройство для его реализации: буксируемый компонентный магнитометр // Евразийское научное объединение. № 11 (57). С. 233–238. 2019в. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3579443>
- Любимов В.В., Зверев А.С., Суменко К.Г. Феррозондовый поисковый буксируемый магнитометр-градиентометр: опыт разработки / Евразийское научное объединение. № 1 (47). С. 416–420. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2560101>
- Любимов В.В. Морской градиентометр на основе одной буксируемой гондолы // Приборы. № 2 (236). С. 39–43. 2020а.

- Любимов В.В. “Феррозондовые грабли” — прибор для поиска магнитных предметов и геомагнитных исследований // Евразийское научное объединение. № 7 (65). С. 120–123. 2020б. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3978400>
- Любимов В.В. Универсальный измерительный модуль на базе трехкомпонентного феррозондового датчика и магнитовариационная станция на его основе // Евразийский союз учёных. Сер. Технические и физико-математические науки. № 10 (91). С. 31–36. 2021. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.91.1473>
- Любимов В.В. Приборы на базе феррозондовых датчиков и их применение в различных условиях и средах (публикации сотрудников ИЗМИРАН) // Вектор научной мысли. № 3 (8). С. 138–158. 2024.
- Gurfinkel' Yu.I., Lyubimov V.V., Orayevskii V.N. Experience in the use of a diagnostic magnetometer in the emergency clinic // Biophysics. V. 40. № 5. P. 1047–1054. 1995.
- Gurfinkel' Y., Lyubimov V., Parfenova L. Geomagnetic monitoring: Experiments and prospects in biology and medicine // Non-equilibrium and Coherent Systems in Biology, Biophysics and Biotechnology / Proceedings of International Conference Dedicated to the 120th birthday of Alexander Gavrilovich Gurwitsch (1974–1954) September 28 – October 2, 1994. Moscow, Russia. M.: Bioinform Services Co. P. 473–476. 1995.
- Lyubimov V.V. Instruments to the natural magnetic field visualization for medical institutions // Polish Journal of Science. № 44 (1). P. 10–17. 2021a.
- Lyubimov V.V. Three-component fluxgate magnetovariation station // East European Scientific Journal. № 10 (74). P. 63–66. 2021b. <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.74.135>
- Zverev A.S., Lyubimov V.V. Marine component gradiometer // Евразийский союз учёных. № 10 (67). 5 часть. С. 4–7. 2019.

Fluxgate Magnetometers for Geophysical and Special Research, Created on the Basis of a Universal Measuring Module (Development Review)

V. V. Lyubimov *

*Pushkov Institute of Earth Magnetism, ionosphere and radio wave propagation Russian Academy of Sciences (IZMIRAN),
Moscow, Russia*

*e-mail: lvv_store@mail.ru

The work is devoted to the description of the design of the measuring module (ferrosonde magnetic compass) and the creation on its basis of various magnetometric devices. These devices are designed to carry out geomagnetic and special works in various conditions and environments, — as for use in stationary observation points, also working on expeditions.

Keywords: magnetic field, magnetic measurements, magnetic surveys, magnetometers, gradiometers, magnetovariation stations, fluxgate magnetometers, measuring module