

РАЗРАБОТКА ПРОТОННЫХ МАГНИТОМЕТРОВ В ИЗМИРАН

В. В. Любимов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

С самого основания и по настоящее время ИЗМИРАН занимался разработкой и изготовлением приборов для геомагнитных исследований. В данной статье описаны основные этапы разработки протонных магнитометров для измерения модуля магнитного поля и приведены характеристики основных приборов, изготавливавшихся в ИЗМИРАН.

Ключевые слова: протонный магнитометр, магниточувствительный датчик.

На протяжении многих лет различными коллективами сотрудников ИЗМИРАН [Бурцев и др., 1989] велась активная работа по созданию новых современных геофизических приборов для решения научных и специальных задач. Одним из традиционных направлений деятельности в институте является разработка аппаратуры нового поколения, в том числе на базе протонных датчиков. Основные результаты этих разработок за последние 25 лет, начиная с 1990 г. и по настоящее время, а также коллективы многочисленных авторов-создателей приборов, — отражены в публикациях [Бурцев и др., 2006; Кузнецов, 2009] и в перечне публикаций, приведённых в работе [Любимов, 2014]. Разработанные в ИЗМИРАН протонные магнитометры (ПМ) [Зверев и др., 2004; Любимов, 2012а, б] в настоящее время применяются для проведения научно-исследовательских работ в стационарных условиях, в магнитных обсерваториях (МО) и для решения различного рода прикладных и поисковых задач [Любимов, 2014].

Началом нового этапа в развитии протонного приборостроения в институте послужило в середине 80-х гг. прошлого века проведение по техническому заданию (ТЗ) ИЗМИРАН (Цветков Ю. П.) работ по созданию Специальным конструкторским бюро физического приборостроения (СКБ ФП) РАН автономной протонной вариационной станции (АПС) и переносного ПМ для их применения при проведении полевых экспедиционных работ. В процессе проведения работ был максимально использован опыт отечественного и зарубежного научно-производственного приборостроения такого класса магнитометров. Были проведены многочисленные расчёты различных узлов ПМ и созданы для испытаний макеты магниточувствительных датчиков (МЧД) различных конструкций. В результате в начале 1984 г. был создан первый макет переносного ПМ под названием ПМП1-02 [Любимов, 2014].

Протонный магнитометр был построен по схеме дискретного частотомера с непосредственным преобразованием измеряемой частоты в единицы магнитной индукции. Для обеспечения необходимой стабильности измерений в качестве задающего генератора в ПМП1-02 был применён

(на то время — новейшее достижение техники!) резонатор-термостат типа РК256ДГ, имеющий рекордно малую нестабильность частоты в широком диапазоне температур. В процессе работ был создан технологичный МЧД оригинальной тороидальной конструкции, достоинством которого была простота в изготовлении и его тиражировании при последующих реализациях. В качестве «рабочего вещества» в этом датчике впервые в практике был применён гептан (C_7H_{16}), который позволял использовать ПМ при низком (до $-50\text{ }^\circ\text{C}$) значении температуры окружающей среды, что было важно при проведении полевых и аэростатных работ [Цветков, 2001].

Прибор ПМП1-02 имел диапазон измерения модуля магнитной индукции в пределах $30...70\text{ мкТл}$ с разрешающей способностью по цифровому табло $0,1\text{ нТл}$. При габаритных размерах устройства измерительного (УИ) $214\times 225\times 94\text{ мм}$ и МЧД ($\varnothing 142\times 120\text{ мм}$) общая масса прибора составила не более 8 кг . Общий вид прибора и различные конструкции изготовленных для него датчиков представлены на рис. 1. Прибор прошёл метрологические испытания, использовался сотрудниками ИЗМИРАН в период с 1990 по 1995 г. при проведении научно-исследовательских работ в районах Крайнего Севера и в Крыму [Любимов, 2014].

В 1985 г. были выпущены три опытных образца прибора под названием МПП-102 (см. рис. 1). В период с 1986 по 1990 г. выпущена малая серия (10 экз.) модифицированных приборов под тем же наименованием, которые разошлись по различным отделам ИЗМИРАН и по различным МО («Москва», «Калининград» и др.).

В начале 1990-х гг., в связи резким сокращением финансирования науки и фактическим прекращением всех финансируемых приборостроительных и экспедиционных геофизических работ, внутри ИЗМИРАН инициативно организовался коллектив из наиболее творческих и дееспособных инженеров-разработчиков аппаратуры из разных отделов института, который продолжительное время просуществовал и творил под названием Научно-производственный кооператив (НПК) «МИРФА». Этим коллективом под руководством А. Н. Козлова был разработан и создан в условиях и на производственных мощностях ИЗМИРАН ряд магнитометрических приборов, в том числе и ПМ. Разработанные ПМ под коммерческим названием ГПМ использовались в МО и при проведении морских экспедиционных работ различными коллективами и организациями РФ и за рубежом. При непосредственном участии А. Н. Козлова, В. А. Гарбацевича и В. А. Мачинина была выпущена серия морских и обсерваторских приборов.

Особенностью этой разработки явилось применение цифрового накопителя данных на твёрдотельной памяти с применением модемного канала записи данных. Общий вид одного из блоков ГПМ показан на рис. 2. Под руководством А. Н. Козлова был также осуществлён проект по созданию протонного магнитометра для Армении. Отличием этой разработки стало то, что в результате создания особой конструкции МЧД, были достигнуты высокая стабильность ПМ и разрешение по измерению магнитной индукции порядка $0,01...0,02\text{ нТл}$. Следует отметить, что никаких публикаций по количеству созданных в НПК «МИРФА» ПМ и их основным техническим характеристикам не обнаружено.



Рис. 1. Полевые протонные магнитометры ПМП1-02 и МПП-102



Рис. 2. Полевые и обсерваторские ПМ, созданные в условиях ИЗМИРАН



Рис. 3. Морские буксируемые магнитометры и градиентометры



Рис. 4. Протонные магнитометры для аэростатных исследований



Рис. 5. Принадлежности для ПМ



Рис. 6. Протонные магнитометры, созданные в НПЛ ИЗМИРАН

В 1993 г. группой сотрудников ИЗМИРАН и Независимого морского исследовательского центра GEONT были начаты работы по проведению морских исследований на шельфе Вьетнама. Была проведена экспедиция с использованием изготовленного НПК «МИРФА» в ИЗМИРАН морского ПМ серии ГПМ. В 1994 г. эти работы были продолжены и в процессе этих работ был создан новый вариант ПМ, аналоговая часть которого была выполнена на базе ПМП1-02 [Любимов, 2014]. В отличие от всех ранее созданных в институте ПМ для морских исследований, магнитоизмерительный преобразователь (МИП) этого магнитометра, получившего наименование GEONT [Зверев и др., 1995], был сконструирован в виде двух буксируемых гондол (БГ). В одной из БГ находился МЧД погружного типа тороидальной конструкции, а в другой (ближней от борта судна) — электронные схемы усиления сигнала, питания и управления. В качестве кабеля-буксира используется кабель типа П296, длиной 150 м [Любимов, 2014]. Общий вид магнитометра показан на рис. 3.

Магнитометр GEONT прошёл (при участии сотрудников ИЗМИРАН) натурные испытания в Южно-Китайском море (на акватории в районе городков Винь, Куало, Самсунг) на научном судне ВД-123 и в дальнейшем продолжительное время использовался при проведении поисковых работ на юге Вьетнама. Всего было сделано и передано Морскому геофизическому центру (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам) два комплекта ПМ GEONT.

В 1995–1997 гг. сотрудниками ИЗМИРАН совместно с коллегами из других организаций были проведены работы по созданию комплекса из двух комплектов береговой вариационной станции (МР-03) и двух комплектов морского буксируемого ПМ (МР-02) по заказу Национального центра науки и технологий и Института океанологии Вьетнама [Зверев и др., 2000, 2005]. Эти приборы были предназначены для проведения экспедиционных работ и для оснащения одного из научно-исследовательских судов СРВ. Испытания созданных ПМ проводились сотрудниками ИЗМИРАН в конце 1995 г. в МО «Москва», а в феврале 1996 г. на территории Вьетнама в МО «Фу-Тый» (Ханой). Испытания магнитометров МР-02 в морских условиях были проведены под руководством директора Исследовательского центра Ханойского горного и геологического университета профессора Фам Нанг Ву в Южно-Китайском море на акватории в районе городка Вунг-Тау на юге Вьетнама в апреле 1997 г. Прибор позволял проводить работы на море при скорости буксировки до 10 узлов при максимальном погружении буксируемой (забортной) части до 20 м и использовать недорогие буксировочные кабели любого типа. При этом масса забортной части ПМ была не более 60 кг (включая кабель-буксир длиной 150 м) [Зверев и др., 2000, Любимов, 2014]. Общий вид магнитометра МР-02 показан на рис. 3.

Отличительной особенностью вариационной станции МР тала реализация оригинального алгоритма работы, позволяющего проводить измерения в высоко градиентных полях и в условиях с большим уровнем техногенных электромагнитных помех. В станции применено новое решение — автоматический поиск и настройка на необходимый диапазон работы МИП. Устройство измерительное также было построено на основе

микропроцессора и оснащено энергонезависимой памятью объёмом 4 МБ, что позволяло накапливать данные в течение 13...154 сут [Зверев и др., 2000]. Общий вид прибора представлен на рис. 2.

В начале 1990-х гг. произошёл переход сотрудников отдела морских электромагнитных исследований из ИЗМИРАН под юрисдикцию Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН). В результате этого в институте прекратились финансирование научно-исследовательских и экспедиционных работ связанных с проведением исследований в водной среде, в том числе перестали выделяться и средства для создания необходимого для проведения такого рода работ инструментария. Однако в ИЗМИРАН остались специалисты и энтузиасты из других отделов, которые на протяжении последующих лет продолжили в инициативном порядке работы в этом направлении, в частности по созданию морской магнитометрической аппаратуры для научных исследований. Эти работы проводились в кооперации с коллегами из различных заинтересованных организаций и институтов РАН [Беляев и др., 2000; Зверев и др., 2004, 2005; Кузнецов, 2009; Любимов, 2012а, б; Любимов, 2014].

В период с 1997 по 1998 г. сотрудниками ИЗМИРАН совместно с коллегами из Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) проводились работы по созданию регистратора данных (РД) «ГРАДИЕНТ». Первый вариант РД был разработан под наименованием IDL-06 [Беляев и др., 2000] и предназначен для фиксации, накопления и статистической обработки сигналов прецессии, поступающих от трёх буксируемых протонных МИП. Кроме того, РД выполнял функции многоканальной автоматизированной системы сбора информации путём одновременного комплексирования, регистрации, накопления и визуализации поступающих данных об измеряемом магнитном поле (значения по трём измерительным каналам и разность между ними), глубине погружения БГ с МЧД, текущем времени измерений и данных от навигационной системы GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). Основными отличительными особенностями РД являлись возможность программной установки времени циклов поляризации МЧД и измерения, оптимальный подбор количества импульсов сигнала прецессии, необходимых для их статистической обработки, возможность сдвига времени измерений по временной оси циклограммы работы прибора. Разработчиками этого прибора и программного обеспечения (ПО) была предусмотрена возможность получения надёжного результата измерений при малом соотношении сигнал/помеха (2...2,5) на входе аналоговых каналов МИП. Основные технические характеристики и общий вид РД «ГРАДИЕНТ» представлены в работах [Беляев и др., 2000; Зверев и др., 2000]. В течение нескольких последующих лет сотрудниками ИО РАН проводились натурные испытания РД «ГРАДИЕНТ» на различных судах и в различных районах Мирового океана [Городницкий и др., 2004], по результатам которых возникла необходимость в модернизации прибора. В 2003–2004 гг. в ИЗМИРАН по ТЗ ИО РАН проводились работы по модернизации РД, в процессе которых был разработан новый прибор под названием РД «ГРАДИЕНТ-2». Основным отличием РД от предыдущих разработок стало расширение измерительного диапазона МИП в пределах 20...70 мкТл,

уменьшен цикл измерения МИП и повышено разрешение по измерительным магнитометрическим каналам до 0,01 нТл. Прибор в 2004 г. был передан для эксплуатации в ИО РАН.

В 2003 г. по заказу Геологического института (ГИН) РАН специалисты ИЗМИРАН совместно с коллегами из ООО «Импеданс» приступили к созданию морского буксируемого градиентометра для оборудования научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Николай Страхов». Эти работы велись в течение двух лет и завершились созданием протонного магнитометра под названием МРМГ-02 [Зверев и др., 2005; Любимов, 2014]. Этот ПМ был предназначен для автоматического измерения модуля ВМИ поля Земли и его горизонтального градиента в условиях морской магнитной съёмки на акваториях морей и океанов и включал в себя две части: забортную и набортную, соединённые между собой кабелем-буксиром (см. рис. 3). Забортная часть состояла из двух МИП поле/код, выполненных на базе протонных МЧД и расположенных на расстоянии 100 м друг от друга. Две БГ с МЧД связаны между собой и с набортными блоками по интерфейсу RS-485. Набортная часть прибора включала в себя блок питания и УИ, предназначенное для статистической обработки сигналов прецессии, регистрации полученных данных с возможностью визуального наблюдения их на графическом дисплее и выдачи результатов измерений на ПК. Устройство измерительное, построенное на основе микропроцессора, было оснащено энергонезависимой памятью, объём которой позволял, в зависимости от установленного цикла измерений, накапливать данные в течение 10...100 сут. Основные технические характеристики МРМГ-02 можно узнать из публикаций [Зверев и др., 2004, 2005; Любимов, 2014], а общий вид градиентометра показан на рис. 3. Отличием МРМГ-02 от всех ранее созданных морских ПМ было то, что МИП, аналоговая и цифровая электроника были размещены в БГ, одна из которых была «проходного» типа. Работы были завершены в 2005 г. и в этом же году сотрудниками ГИН РАН и ИО РАН (С. В. Лукьяновым) были проведены его натурные испытания в одном из рейсов НИС «Академик Николай Страхов» в Атлантике.

В 2007 году сотрудниками ИЗМИРАН в кооперации с коллегами из Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ) были начаты работы по созданию морского магнитометра-градиентометра для Института геофизики им. С. И. Субботина Национальной академии наук Украины. Эти работы успешно были завершены в 2008 г., в результате был изготовлен ПМ под названием МРМГ-03 [Любимов, 2012б]. Все метрологические и эксплуатационные характеристики этого магнитометра были аналогичны магнитометру МРМГ-02, исключение составляло отсутствие УИ, вместо которого использовался ПК. Была сделана новая разработка БГ, которые заметно отличались по размерам и по весу от ранее созданной их конструкции, и создано новое ПО. Для соединений буксируемой части прибора между собой и с бортом судна использовался лёгкий, тонкий и прочный немагнитный кабель на основе кевлара. Общий вид магнитометра МРМГ-03 показан на рис. 3, его технические характеристики опубликованы в работе [Любимов, 2012б]. Испытания прибора и производственные работы с ним проводились сотрудниками ИГ НАНУ в морских экспедициях в западной части Чёрного моря [Чулков и др., 2011].

В 2010 г. по заказу Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) и ИО РАН были начаты работы по разработке и изготовлению двух комплектов морских магнитометров-градиентометров, которые успешно завершились в 2011 г. созданием прибора под названием МРМГ-04 [Любимов, 2012а, б]. Морской протонный магнитометр-градиентометр МРМГ-04 являлся модернизированным вариантом ранее созданных магнитометров серии МРМГ и отличался уменьшенными габаритами и массой БГ (не более 8 кг), а также способом измерения и конструкцией МИП. Малые габариты и масса прибора (см. рис. 3) позволяли проводить исследования с его помощью на реках и озёрах на маломерных судах и надувных плавсредствах. При этом предусмотрена возможность использования БГ на малой измерительной базе и питание прибора от аккумуляторной батареи. Оба комплекта МРМГ-04 прошли успешные лабораторные и метрологические испытания на территории ИЗМИРАН в МО «Москва» и в обсерватории МГУ в пос. Александровка, а также натурные испытания, проведённые сотрудниками ТОИ ДВНЦ РАН на акватории Охотского моря в 2012 г.

Уже более 20 лет в институте коллективом сотрудников под руководством Ю.П. Цветкова ведутся работы связанные с применением ПМ на дрейфующих аэростатах. Разработана методика измерений [Крапивный и др., 2007; Любимов 2014; Цветков, 2001, Цветков и др., 2006], в том числе и для измерения вертикального градиента поля. Первоначально для полётов на дрейфующем аэростате использовался только один ПМ, а в последние годы в проведении экспериментов используется градиентометрическая система, включающая в себя три ПМ (измерительных канала), МЧД которых разнесены по вертикали на расстояние 3 км друг от друга. Для реализации измерений использовались как созданные «НПК Рудгеофизика» ПМ серии ММП-203, так и созданные в ИЗМИРАН на их основе применительно к условиям измерений магнитометры с МЧД тороидальной конструкции от МПП-102 с различной (от 10 до 30 м) длиной кабеля. Общий вид магнитометра, контейнеров с ПМ и приборной подвески на раме стратосферного аэростата с датчиками показан на рис. 4. В качестве регистратора данных в первых вариантах прибора при первых запусках применялся лентопротяжный механизм с записью данных на фотобумаге в двоичном коде при цикле регистрации от 1 до 10 мин. Этот способ регистрации данных был выгодным, так как устройство регистрации было экономичным. Однако дешифровка полученных данных и их перевод в цифровую форму был достаточно неудобен и продолжителен во времени.

Начиная с 2006 г. к совместным с ИЗМИРАН работам по этому проекту была привлечена группа специалистов из МЭИ [Крапивный и др., 2007; Цветков и др., 2006], в результате чего комплекс с ПМ был дополнен системой сбора, пакетирования, кодирования и передачи данных через Интернет с использованием быстроредействующего модема и приёмопередающей системы «Глобалстар». Это позволяло осуществлять дистанционно передачу данных в полёте, координирование измерительной системы в пространстве и дистанционное управление аэростатом при завершении миссии. В этом же году сотрудником ИЗМИРАН В.Х. Кириаковым был

разработан блок накопления данных (НД) [Любимов, 2014] для использования совместно с ПМ реализованными на базе частотомера. Блок НД имел малое потребление энергии и габариты, что позволяло легко интегрироваться в корпус ММП-203. Блок НД (см. рис. 4, 5) устанавливался перед полётом в каждый из ПМ, что позволяло накапливать привязанные ко времени измеренные данные в течение 150 сут.

В 2007 г. сотрудниками научно-производственной лаборатории (НПЛ) геомагнитных приборов и измерений ИЗМИРАН по заданию Ю. П. Цветкова были начаты работы по созданию нового современного автоматического ПМ для аэростатного комплекса. В результате этой работы была проведена разработка и изготовлено шесть комплектов ПМ под наименованием МААП. В этом приборе была применена облегчённая конструкция УИ, корпус которого был изготовлен из ударопрочного пластика. МИП прибора был реализован на основе тороидальных погружных МЧД с различными длинами (от 15 до 30 м) подключаемых к УИ кабелей. ПМ мог успешно функционировать с применением различных «рабочих веществ», однако в условиях аэростата для экономии энергии источников питания в качестве «рабочего вещества» в МЧД был выбран керосин. Основные технические характеристики МААП указаны в публикациях [Кириаков и др., 2012; Любимов 2012а, б, 2014]. Общий вид конструкции МААП показан на рис. 4.

Положительные результаты разработок серии морских магнитометров создали предпосылки в институте к продолжению инициативных работ по созданию ПМ для проведения полевых и обсерваторских работ. В конце 2004 г. сотрудниками НПЛ ИЗМИРАН совместно с коллегами из ООО «Импеданс» были разработаны регистрирующие ПМ под названием МР-03 «ИМПЕДАНС» и МР-03М [Бурцев и др., 2006]. Общий вид этих приборов показан на рис. 2. Решения основных узлов у этих ПМ значительно отличались от построения аналогичных узлов магнитометров МПП-102, GEONT и МР-03. Разработанное ПО и применение управляющего процессора позволило изменять в процессе проведения измерений все режимы циклограммы работы прибора, сделать их переменными. Это делало схему ПМ гибкой и универсальной, дало возможность в темпе эксперимента настраивать прибор на оптимальный режим работы, использовать практически любое «рабочее вещество» в МЧД (и любые типы МЧД), а также применять соединительный кабель различной длины и типа. Созданные приборы прошли испытания в МО «Москва», использовались длительное время в проводимых экспериментальных работах в качестве вариационной станции. В рамках этих работ сотрудниками НПЛ были созданы и проверены с помощью МР-03М различные конструкции погружного типа секционных и тороидальных МЧД, а также созданы устройства, программно имитирующие работу МЧД при проведении настроечных и исследовательских работ с ПМ в помещении (см. рис. 5).

В 2005 г. по ТЗ и в рамках договора с Институтом геофизики имени Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), сотрудники НПЛ начали работы над проектом под названием «Цифровая магнитная обсерватория». В рамках этого проекта необходимо было разработать и изготовить ПМ, который мог бы проводить измерения

(в качестве цифровой вариационной станции) в системе синхронно с приёмником GPS и быстродействующей цифровой магнито-вариационной станцией (ЦМВС) «Кварц-4». В результате этих работ в 2006 г. был разработан новый вариант ПМ под названием МР-03МО «ИМПЕДАНС», который отличался от предыдущих моделей МР-03. Прибор позволял накапливать измеренные данные как во внутреннюю память, так и работать непосредственно с ПК. Общий вид магнитометра представлен на рис. 2, а основные технические характеристики его указаны в работах [Кириаков, Любимов, 2009; Любимов, 2014]. Прибор МР-03МО был установлен сотрудниками ИЗМИРАН для постоянной работы в абсолютном павильоне МО «Арти» в 2007 г.

В период с 2006 по 2008 г. сотрудниками НПЛ ИЗМИРАН было изготовлено ещё три комплекта МР-03МО для оснащения МО «Уссурийск» (пос. Горнотаёжный), для МО «Москва» и для Российского государственного университета имени Иммануила Канта (РГУ им. Иммануила Канта, Калининград), где ПМ используется в кооперации с сотрудниками и на территории МО «Калининград» и в настоящее время.

За прошедшие годы сотрудниками ИЗМИРАН в условиях института в протонном магнитном приборостроении проделана определённая работа, итогом которой явилось разработка и создание более пятнадцати различных типов, вариантов и разновидностей ПМ, предназначенных для проведения научно-исследовательских работ и экспедиций в различных условиях, средах и частях Земного шара. Разработанные в институте ПМ до сих пор продолжают использоваться при проведении работ в различных МО, используются для обучения молодых специалистов в учебных заведениях, принимают участие в поисковых работах, в том числе и на просторах морей и океанов. На рис. 6 показана только часть пунктов и городов, где используются ПМ разработанные в НПЛ ИЗМИРАН за последние 10 лет.

ЛИТЕРАТУРА

- [Беляев и др., 2000] *Беляев И. И., Зверев А. С., Кириаков В. Х., Любимов В. В., Филин А. М.* Регистратор данных «Градиент» морского буксируемого дифференциального магнитометра // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 2. С. 165.
- [Бурцев и др., 1989] *Бурцев Ю. А., Долгинов Ш. Ш., Жужгов Л. Н., Козлов А. Н.* Магнитное приборостроение // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С. 328.
- [Бурцев и др., 2006] *Бурцев Ю. А., Головкин В. П., Кузнецов В. Д., Любимов В. В.* История магнитного приборостроения в ИЗМИРАН: прошлое, настоящее, ... будущее??? // Материалы Международного семинара «170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние». Екатеринбург, 17–23 июля 2006. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С. 45.
- [Городницкий и др., 2004] *Городницкий А. М., Филин А. М., Малютин Ю. Д.* Морская магнитная градиентная съёмка. М.: ВНИИРО, 2004. 140 с.
- [Зверев и др., 1995] *Зверев А. С., Кириаков В. Х., Любимов В. В.* Магнитометр «ГЕОНТ» для геомагнитных измерений // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 5. С. 205.

- [Зверев и др., 2000] *Зверев А. С., Кириаков В. Х., Любимов В. В.* Протонные магнитометры для геомагнитных измерений // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 2. С. 163.
- [Зверев и др., 2004] *Зверев А. С., Кириаков В. Х., Любимов В. В.* Градиентометры для исследования магнитного поля в различных условиях и средах // Экономика и производство. Технологии, оборудование, материалы. Журн. организаторов производства. 2004. № 3. С. 59.
- [Зверев и др., 2005] *Зверев А. С., Кириаков В. Х., Любимов В. В.* Морской буксируемый магнитометр-градиентометр МРМГ-02 // Датчики и системы. Новые приборы. 2005. № 1. С. 56.
- [Кириаков, Любимов, 2009] *Кириаков В. Х., Любимов В. В.* Протонный регистрирующий магнитометр МР-03МО / Выставочный центр Российской академии наук. 2009. http://www.expo.ras.ru/base/prod_data.asp?prod_id=3832.
- [Кириаков и др., 2012] *Кириаков В. Х., Любимов В. В., Цветков Ю. П.* Протонный магнитометр для стратосферного аэростатного комплекса // Prední vedecke novinky-2012: Materialy VIII Mezinarodni vedecko-prakticka konference 27 srpna – 05 zari 2012. Fyzika. Dil 10, Praha, 2012. S. 46.
- [Крапивный и др., 2007] *Крапивный А. В., Николаев Н. С., Баранов Я. В., Брехов О. М., Цветков Ю. П., Кириаков В. Х.* Аэростатный магнитный градиентометр // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 159.
- [Кузнецов, 2009] *Кузнецов В. Д.* Электромагнитные и плазменные процессы в системе Солнце-Земля: к 70-летию ИЗМИРАН (Обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49. № 6. С. 723.
- [Любимов, 2012а] *Любимов В. В.* Магнитометры и градиентометры для научных исследований // Приборы. 2012. № 11. С. 8.
- [Любимов, 2012б] *Любимов В. В.* Новые магнитометры для градиентометрических исследований: Обзор разработок // Perspektywiczne opracowania sa nauka I technikami-2012: Materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji 07–15 listopada 2012, Fizyka. 2012. V. 17. S. 58.
- [Любимов, 2014] *Любимов В. В.* Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 1: Протонные магнитометры // Геофизич. вестн. / Евро-Азиатское геофизическое общество. 2014. № 2. С. 19.
- [Цветков, 2001] *Цветков Ю. П.* Аэростатная стратосферная градиентная магнитометрия и её использование для решения задач внутреннего строения земной коры: Автореф. дис.: д-ра физ.-мат. наук. М., 2001. 45 с.
- [Цветков и др., 2006] *Цветков Ю. П., Алексеев В. А., Филиппов С. В., Пчелкин А. В., Любимов В. В., Аскеров А. Э.* Подспутниковый метод повысотного магнитного зондирования земной коры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. С. 256.
- [Чулков и др., 2011] *Чулков С. С., Русаков О. М., Михайлюк С. Ф., Довбыш С. Н., Буртный П. А., Коболев В. П.* Опытные-методические комплексные геолого-геофизические исследования в 66-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2011. № 1.

DEVELOPMENT OF PROTON MAGNETOMETERS IN IZMIRAN

V. V. Lyubimov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

From the very beginning and to the present days IZMIRAN was engaged in development and production of devices for geomagnetic researches. In this article the main development stages of proton magnetometers for measurement of the module of a magnetic field are described and characteristics of the proton magnetometers made in IZMIRAN are provided.

Keywords: Proton magnetometer, magnetosensitive sensor.

Lyubimov Vladimir Valerievich — head of laboratory, lvv_store@mail.ru