

А.В. Баранов, М.С. Ефремкин

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МАГНИТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «ВЛАДИВОСТОК»

В работе приведены данные о вековом ходе составляющих и вектора магнитного поля Земли (МПЗ), полученные за период работы в МО «Владивосток» вариометров В.Н.Боброва, с 1960 по 2010 г.г.

Описаны основные характеристики установленной за последние годы в МО «Владивосток» измерительной аппаратуры: цифровая магнито-вариационная станция (ЦМВС) «Кварц-4» и процессорного оверхаузеровского датчика POS-1. Приведены примеры записей характеристик МПЗ, полученных после сравнительного анализа записей на магнитных вариометрах системы В.Н.Боброва и цифровой аппаратуры. Отмечено, что проводимые в МО «Владивосток» измерения соответствуют международным стандартам и могут быть представлены в базы данных сети ИНТЕРМАГ-НЕТ.

ВВЕДЕНИЕ

Стационарные наблюдения магнитного поля Земли (далее – МПЗ) начались в Приморском крае в 1952 году. До 1959 г. магнитная обсерватория (далее – МО) в административно-хозяйственном отношении была подчинена Уссурийской радиостанции №7 и находилась на территории Ярославского оловокомбината. В 1955 году Президиум ДВФ АН СССР дал согласие на размещение МО на территории Горнотаежной станции ДВФ АН СССР. Для увязки плана строительства МО была создана комиссия из представителей Гидрометслужбы и АН СССР. Обсерватория была принята ДВФ СО АН СССР от Министерства Связи РСФСР 24 ноября 1959 года во исполне-

ние распоряжения Совета Министров РСФСР от 30 сентября 1959 г. №6163-РС и приказа Министра связи РСФСР №022 от 6 октября 1959 г. «О передаче магнитных и ионосферных станций и бюро радиопрогнозов Министерства связи РСФСР Сибирскому отделению АН СССР».

В настоящее время МО входит в состав УАФО ДВО РАН. Географические координаты МО: 132°10' восточной долготы, 43°41' северной широты. Она входит в мировую сеть под именем «ВЛАДИВОСТОК», мнемонический код «VLA».

Для однозначного понимания дальнейшего текста введем некоторые термины, характеризующие МПЗ. Точки, где напряжённость МПЗ имеет вертикальное направление, называют магнитными полюсами. Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется магнитной осью Земли. Большая окружность в плоскости, перпендикулярной к магнитной оси, называется магнитным экватором [10].

Средняя напряжённость поля на поверхности Земли составляет ~0,5 э (Эрстед). Напряжённость МПЗ на магнитном экваторе ~0,34 э, у магнитных полюсов ~0,66 э.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЙ МПЗ. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАРЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Основной целью стационарных непрерывных наблюдений является определение векового хода МПЗ. По результатам наблюдений вычисляются среднегодовые значения полного вектора и трёх компонент поля, а именно: горизонтальной H , вертикальной Z и склонения D . Под склонением здесь понимается угол между H и плоскостью географического меридиана. Одновременно ведется запись теплового режима в наблюдательном павильоне для введения поправок за температурный ход измеряемых величин.

Современные данные о вековом ходе и многократных переполусовках (далее – инверсиях) МПЗ удовлетворительно объясняются в рамках гипотезы МГД-динамо.

Изучение остаточной намагниченности, приобретённой изверженными горными породами при остывании их ниже точки Кюри, указывает на неоднократные инверсии МПЗ.

Смещение магнитных полюсов в МО регистрируется с 1885 года. За последние 100 лет южный магнитный полюс переместился почти на 900 км. Новейшие данные по состоянию арктического магнитного полюса показали, что с 1973 по 1984 год его пробег составил 120 км, с 1984 по 1994 год — более 150 км. Эти данные подтверждены замерами северного магнитного полюса. По данным на начало 2007 года, скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 1970-х годах до 60 км/год в 2004 году. Ускорение движения полюсов (в среднем на 3 км/год) и движение их по коридорам инверсии магнитных полюсов (более 400 палеоинверсий [5]), позволяет предположить, что в данном перемещении полюсов можно усматривать очередную инверсию МПЗ. Это подтверждается и текущим возрастанием угла раствора каспов (полярных щелей в магнитосфере на севере и юге), который в 1990-х годах достиг 45°.

В прошлом инверсии магнитных полюсов происходили многократно.

Напряжённость МПЗ падает, причём неравномерно. За последние 22 года она уменьшилась на ~1,7 %, а в некоторых регионах, например, в южной части Атлантики — на 10 %. В некоторых местах напряжённость МПЗ, вопреки общей тенденции, даже возросла.

МПЗ играет важнейшую роль во многих земных процессах и измерение характеристик МПЗ и их вариаций имеет огромное значение для жизнедеятельности людей.

На рис.1 представлен график изменения среднегодовых значений полного вектора геомагнитного поля за последние 53 года (период с 1952 по 2005 г.г., своеобразный итог наблюдений МПЗ в МО «Владивосток»). Картина, с учетом региональных особенностей структуры МПЗ, находится в хорошем согласии с данными, полученными на МО ИСЗФ СО РАН (г. Иркутск) [7,12] и других МО России [1].

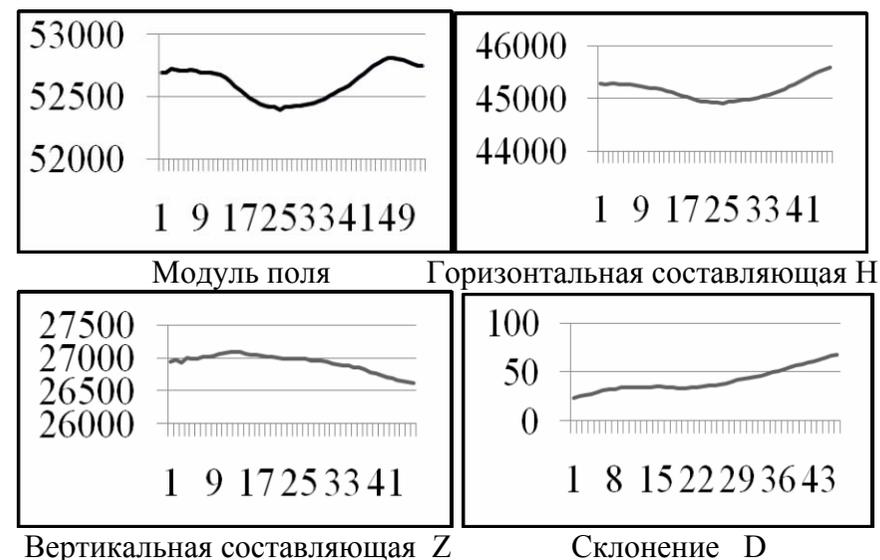


Рис.1. Шкала вертикальной оси графика склонения соответствует минутам угловой дуги. По абсолютному значению D это соответствует диапазону -9°00' - 10° 20'. По горизонтали отложено время в годах, начиная с 1952 г.

Видна вековая вариация геомагнитного поля с периодом приблизительно 50 лет и амплитудой 400нТ. Амплитуда составляет приблизительно 1% от величины полного поля.

ВАРИАЦИИ МПЗ

Магнитосфера Земли подвержена воздействию солнечного ветра: со стороны, обращенной к Солнцу, геомагнитное поле сжимается, а с ночной стороны оно вытягивается в длинный «хвост». Солнечный ветер – величина переменная, и эта картина претерпевает значительные изменения, что отражается на величинах вариаций МПЗ [8].

Заметное влияние на МПЗ на поверхности оказывают токи в ионосфере. Её состояние определяется взаимодействием МПЗ с солнечным ветром, чем и объясняется связь магнитных бурь на Земле с солнечными активными процессами.

Для МПЗ характерны и возмущения, называемые геомагнитными пульсациями вследствие возбуждения гидромагнитных волн в магнитосфере Земли.

Указанные изменения обязывают поставить МО задачу изучения вариаций геомагнитного поля, наблюдаемых, вследствие перечисленных выше процессов (и не только их).

Для решения подобных задач в МО необходима современная измерительная аппаратура. Поэтому в 2007-2010 г.г. нами была произведена замена устаревшего, хотя и вполне надежного, оборудования на цифровую технику. До 2009 года для непрерывных наблюдений за МПЗ использовались магнитные вариометры системы В.Н.Боброва, протонный магнитометр ПМ-001 с колечной системой Браунбека, QNM, магнитный теодолит.

С 2009 до 2011 года аналоговые измерители геомагнитного поля в параллельном режиме работали с цифровой магнитовариационной станцией «Кварц-4» и процессорным оверхаузеровским датчиком POS-1. С января 2011 г. МО полностью перешла на цифровую технику. С 1 марта данные ЦМВС выкладываются на сайт УАФО [11].

ЦМВС «Кварц-4» была выбрана потому, что ее датчики сделаны на основе магнитного вариометра В.Н.Боброва, который имеет приемлемую систематическую погрешность в процессе естественного старения (ориентировочно 2–3 нТ/год), что позволяет использовать такие датчики для измерений векового хода МПЗ.

Процессорный оверхаузеровский датчик POS-1 измеряет абсолютное значение полного вектора МПЗ. Стабильность метрологических параметров POS-1 позволяет использовать его результаты измерений для контроля за вековым ходом МПЗ.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИБОРОВ

Приведем результаты сравнения характеристик установленных в МО «Владивосток» приборов с характеристиками, декларированными в соответствующих инструкциях по эксплуатации.

Цифровая магнитовариационная станция (ЦМВС) «КВАРЦ-4» предназначена для непрерывного измерения и регистрации вариаций составляющих вектора МПЗ и температуры кварцевых магнитных измерительных преобразователей (МИП).

ЦМВС состоит из следующих основных узлов:

1. блока датчиков (БД);
1. юстировочной платформы (ЮП);
2. блока электроники (БЭ);
3. блока измерения и накопления информации (БИН).
4. блока питания (БП);
5. персонального компьютера (ПК) и приемника GPS.

Подробная информация имеется у разработчиков и конструкторов прибора [2-3].

Схема построения МИП включает в себя функциональные блоки БД, ЮП, БЭ и БП.

БД включает в себя три вариометра, состоящих из кварцевых магнитных датчиков (КМД) D, H, Z с градуировочными кольцами, катушками обратной связи, фотопреобразователями и элементами точной настройки на магнитное поле в точке измерений.

Базисные векторы на ЮП взаимно ортогональны с точностью до 1' и имеют жесткую фиксацию. Вариометры имеют приспособление для визуальной установки КМД по отношению к направлению горизонтальной составляющей МПЗ с погрешностью не более 5'.

Датчик температуры имеет тепловой контакт с корпусом БЭ. БЭ обеспечивает передачу данных и обмен информацией с БИН по последовательному каналу передачи, имеет максимально немагнитное исполнение и располагается вблизи БД. МИП и БИН установлены в одном измерительном рабочем павильоне.

Основные характеристики прибора, согласно технической документации и проведенным в процессе установки и юстировки измерениям.

- Динамический диапазон измерения вариаций составляющих МПЗ ± 2000 нТл.
- Частота оцифровки измеряемых вариаций от 0 до 10 Гц.
- Цена единицы счета младшего разряда цифрового отсчетного устройства по каждому из измерительных каналов вариометров – 0,1 нТл
- Цена единицы счета младшего разряда цифрового отсчетного устройства канала измерения температуры – 0,1 °С
- Цикл автоматических измерений 1, 60 с
- Диапазон рабочих температур в павильоне + 20° ± 5 ° С
- Емкость энергонезависимой памяти данных – 16 Мб

На графическом дисплее БИН предусмотрена возможность вывода графиков вариаций МПЗ в реальном времени, вывода значений измеренной температуры окружающей среды и построение трехчасового К-индекса магнитной активности. Предусмотрены возможности просмотра на дисплее графиков данных, ранее записанных в память прибора, масштабирования измеряемых данных по временной и амплитудной шкале, поканального вывода данных с максимальной разрешающей способностью МИП, визуализации процесса заполнения памяти прибора и контроль напряжения источника питания. Предусмотрено накопление данных в БИН или персональный компьютер в непрерывном режиме.

Программное обеспечение (ПО) позволяет обеспечить организацию базы данных ЦМВС, возможность их обработки для использования в формате, пригодном для участия в программе ИНТЕРМАГНЕТ [4].

Процессорный оверхаузеровский датчик POS-1 является бесклавиатурным, управляемым по порту, прецизионным измерительным прибором циклического типа, основанным на принципе поляризации атомных ядер рабочего вещества [6]. Датчик предназначен для измерения модуля индукции МПЗ в диапазоне 20000-100000 нТл.

Основой датчика служит оверхаузеровский ядерно-прецессионный преобразователь на стабильном рабочем веществе (время жизни ~5-10 лет). По сравнению с протонными преобразователями данный тип преобразователя обладает меньшим энергопотреблением, большей чувствительностью и градиентоустойчивостью. Использование в составе датчика микропроцессора и последовательного порта позволяет: обрабатывать и пересчитывать частоту свободной ядерной прецессии непосредственно в величину модуля измеряемого поля; адаптировать обработку сигнала ядерной прецессии в зависимости от условий измерения; контролировать качество и усло-

вия измерения; управлять датчиком по порту с внешнего блока управления; проводить автоматическую внутреннюю настройку датчика, а также «ручную» настройку с внешнего блока управления; выводить результаты измерений и дополнительную информацию в цифровом виде через порт.

Таблица 1

п.п.	Характеристика (параметр)	Значение
1	Коэффициент преобразования датчика	$1.0 \cdot 10^{12}$
2	Систематическая погрешность измерения, не более, нТл	1.0
3	Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения при длительности измерения не менее 3 секунд. Не более, нТл	0.1
4	Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения при длительности измерения не менее 3 секунд и градиенте модуля поля 10000 нТл/м. Не более, нТл	50.0
5	Дополнительная погрешность измерения в интервале температур от -10°C до $+30^{\circ}$	1.0
6	Дополнительная погрешность измерения при отклонении первичного преобразователя на угол 45° от оптимальной ориентации. Не более, нТл	1.0

Метрологические характеристики датчика приведены в таблице 1, а его технические характеристики – таблице 2.

Стабильность метрологических параметров POS-1 за длительный интервал времени позволяет использовать результаты его измерений для контроля за вековым ходом МПЗ. Таблицы 1 и 2 во многом совпадают с таблицами 1.2.1.-2. руководства по эксплуатации «Процессорный оверхаузеровский датчик POS-1» и подтверждает высокое качество проводимых на датчике измерений.

Высокие технические и эксплуатационные параметры датчика в комплекте с различными внешними блоками управле-

ния обеспечивают возможности его применения в качестве обсерваторского магнитометра или вариационной станции.

Таблица 2

п.п.	Характеристика (параметр)	Значение
1	Градиентоустойчивость. Не менее, нТл/м.	20000
2	Нестабильность за 8 часов работы. Не более, нТл.	0.3
3	Время вхождения в рабочий режим. С.	10
4	Длительность однократного измерения. Не более, с.	3
5	Цикличность автоматического запуска измерений. С.	1, 2, 3....
6	Начальная амплитуда сигнала прецессии аналогового выхода, В.	0.5-2.0
7	Угол оптимальной ориентации оси цилиндра первичного преобразователя относительно направления МПЗ, град.	$90^{\circ} - 10^{\circ}$

В стационарных условиях, а именно: закрытое помещение, постоянная температура, стабильный постамент, POS-1 может быть использован как мера магнитной индукции для метрологической поверки протонных и квантовых магнитометров.

В настоящее время POS-1 работает в режиме МВС, делая одно измерение за 10 сек.

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис.2 приведена запись на ЦМВС «Кварц-4» за одни сутки. В сети ИНТЕРНЕТ, на сайте УАФО: <http://www.uafo.ru/>. подобные картины приводятся вместе с трехчасовыми К-индексами с 1 марта 2011 г.

На рис.3 приведён график абсолютного значения полного вектора геомагнитного поля за март 2011 года. По вертикаль-

ной оси отложено среднее значение полного вектора геомагнитного поля в интервале от 0 до 4 часов местного времени, что соответствует периодам минимально возможных помех техногенного характера.

Видно, что после 11 марта 2011 года (землетрясения в Японии, магнитудой 9.0) имеет место скачок приблизительно в 9 нТ. Можно предполагать, что скачек поля является следствием подвижек земной коры в районе указанного землетрясения.

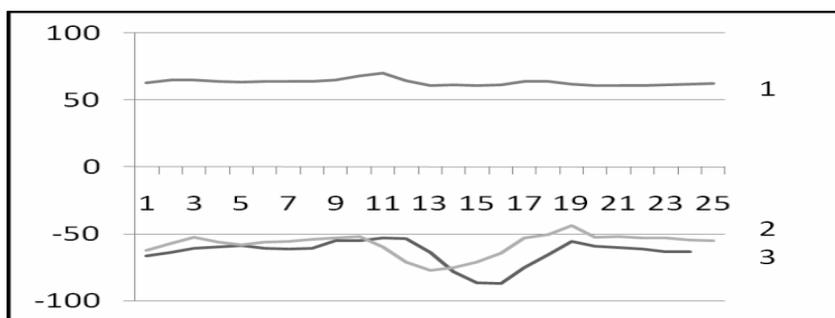


Рис.2. Кривая 1 – склонение D, кривая 2 – горизонтальная составляющая H, кривая 3 – вертикальная составляющая Z. По вертикальной оси даны значения величин в нТл, для D – в градусах, по горизонтальной – время (hh-mm) за 01.11.2010 г. Время мировое

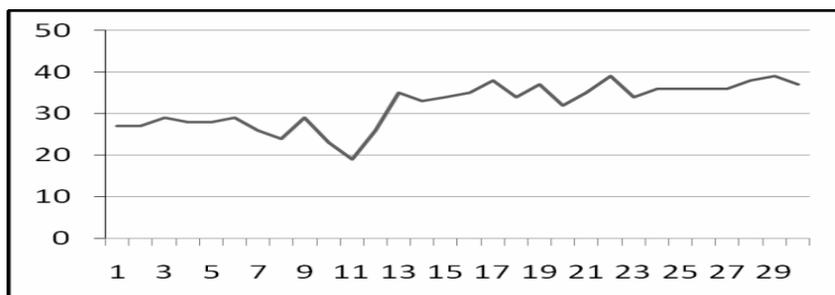


Рис.3. Абсолютные значения полного вектора геомагнитного поля за март 2011 года. Из величин модуля поля вычтено значение 52760 нТл

Анализ рис.2 и 3 показывает соответствие измерений современным стандартам.

Выполненные на территории Приморского края сотрудниками ТОИ ДВО РАН магнитовариационные исследования в широком диапазоне периодов позволяют проводить изучение берегового эффекта и геоэлектрического строения этого региона [9]. Наблюдения МПЗ на МО «Владивосток» могут быть базовыми для сравнения данных, полученных для шельфа Японского моря и ряда других районов Приморья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены данные о вековом ходе составляющих и полного вектора МПЗ, полученные за период работы в МО «Владивосток» вариометров В.Н.Боброва.

Описаны основные характеристики установленной за последние годы в МО «Владивосток» измерительной аппаратуры. Приведены примеры записей характеристик МПЗ, полученных после завершения юстировок и сравнительного анализа записей на вариометрах В.Н.Боброва и цифровой аппаратуры.

Отмечено, что проводимые в МО «Владивосток» измерения соответствуют мировым стандартам и могут быть представлены в базы данных сети ИНТЕРМАГНЕТ.

Работа поддержана грантами ДВО РАН 09–II–CO_02–002, 09–III–A–02–49.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. Вариации магнитного поля Земли. База цифровых данных магнитных обсерваторий России за 1984–2000 годы на СД-РОМ. –М.: ИЗМИРАН. 2001.
2. Бурцев Ю.А., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная станция «КВАРЦ-4» для магнитных обсерваторий // Материалы Международного семинара «170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное

состояние». Екатеринбург, 17-23 июля 2006 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С.38 – 41.

3. *Зверев А.С., Кириаков В.Х., Любимов В.В.* Протонные магнитометры // Экономика и производство. /Технологии, оборудование, материалы / Журнал организаторов производства. М., 2005. No.2. С.71-73.

4. «Искусственный интеллект в изучении магнитного поля Земли. Российский сегмент IN-TERMAGNET» Международная конф. 26-28.01 2011 г. Углич, Ярославская обл. Тезисы.

5. *Короновский Н.В.* Магнитное поле геологического прошлого Земли // Соросовский образовательный журнал. - 1996. - №5. – С.56-63.

6. Процессорный оверхаузерский датчик POS-1. Руководство по эксплуатации. УГТУ. Екатеринбург, 2001 г. 36 с.

7. *Рахматулин Р.А.* Частное сообщение. 2011.

8. *Ривин Ю.Р.* Понятие «геомагнитная активность» в современной солнечно-земной физике // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. – Т.48, No.1. С.134-142.

9. *Старжинский С.С.* Результаты магнитовариационных исследований в Приморье // Физика Земли. – 2004. - №8.- С.25-33.

10. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Ленинградский ун-т. 1978. 592 с.

11. <http://www.uafo.ru/>.

12. <http://www.iszf.irk.ru/>.

УДК 523.98

А.В.Баранов, Л.Ф.Лазарева, С.Г.Можаровский

ИНВЕРСИИ ПРОФИЛЕЙ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СПЕКТРАЛЬНЫХ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЛИНИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для 4 спектральных линий железа, двух линий кальция, одной линии титана и одной линии ванадия в диапазоне длин волн $\lambda\lambda$ 605.0–618.0 выполнены решения системы уравнений переноса излучения с учетом аномальной дисперсии. Использована модель солнечного пятна Книра.

Расчет велся для значения напряженности магнитного поля H от 2500 до 3500 Э, углы наклона силовых линий γ полагались равными 30, 40, 50, 60, 70, 80°.

Проведенные расчеты показали, что профили круговой поляризации триплетных и квазитриплетных линий со значительными эффективными факторами Ланде ($g \sim 2$) и компактными группами π - и σ -компонент имеют инверсии вблизи центров линий, независимо от того, какому элементу с каким атомным весом они принадлежат.

Не обнаружено инверсий g_V -профиля у линии со значительным расщеплением - FeI λ 608.27 нм. Нет явных признаков инверсий g_V -профиля у линий FeI $\lambda\lambda$ 621.3 и 633.7 нм. Все они имеют большой эффективный фактор Ланде ($g = 2$), но структура расщепления линий – $((2), 3,5)/2$ – такова, что их π -компоненты находятся далеко от центра линий и заметный эффект показывать не могут. Однако они дают заметные характерные искажения g_V -профиля в местах, близких к положению σ -компонентов.

Экспериментальный материал в основном подтверждает приведенные выше расчеты. Следует отметить, что указания на инверсию профилей круговой поляризации показывают наблюдения в линии CaI λ 612.22 нм, не имеющей центрального π -компонента.