

УДК 550.838.084 УДК 550.380.2:8
ББК Д214.22с441ю1+В214.221
Н59

Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006. – 140 с.

В книге дано общее описание магнитного поля Земли, приведены требования к выбору территории для магнитных обсерваторий и рекомендации по строительству немагнитных зданий, предназначенных для абсолютных и вариационных наблюдений. Изложены принципы работы основных типов современных магнитометров и вариометров, рекомендуемых для стационарных геомагнитных наблюдений. На основе опыта работы отечественных магнитологов особое внимание уделено анализу погрешностей наблюдений и методам их уменьшения. Рассмотрены методики абсолютных наблюдений, обработки их результатов и контроля качества данных цифровых вариационных станций. Предложена модель программного обеспечения стандартной обработки данных магнитных обсерваторий.

Руководство предназначено для работников магнитных обсерваторий в качестве справочного пособия, а также может быть полезно студентам геофизического профиля.

Табл. 17. Рис. 54. Прил. 2. Библиогр. 23.

Рецензенты

Доктор физико-математических наук А.Е. Левитин
Доктор физико-математических наук Е.А. Пономарев
Кандидат физико-математических наук С.Ю. Хомутов

S. Nechaev. Guide to stationary geomagnetic observations. – Irkutsk: Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 2006. – 140 p.

The book begins with a general description of the Earth's magnetic field. It next presents requirements on choosing a site for a magnetic observatory and useful recommendations for construction of nonmagnetic buildings for absolute and variational observations. Principles of operation of all basic types of present-day magnetometers and variometers advisable for stationary geomagnetic observations are given. On the basis of Russian magnetologists' experience, particular emphasis has been placed on analysis of observation errors and methods of their reduction. Some techniques of absolute observations, processing observation results, and control of data quality are considered. A model of software for routine data processing at magnetic observatories is proposed.

This manual is intended to use as a hand-book at magnetic observatories, and may be useful for geophysical students as well.

Tables 17. Figures 54. Appendixes 2. Bibl. Titles 23.

Reviewers:

A. Levitin, Dr. Sc.
E. Ponomarev, Dr. Sc.
S. Khomutov, Cand. Sc.

Утверждено к печати Ученым советом Института солнечно-земной физики СО РАН
Работа выполнена в рамках программы INTAS IA 01-01

ISBN 5-94797-093-7

© С.А. Нечаев, 2006
© Издательство Института географии
им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006

1. ВВЕДЕНИЕ

Планета Земля обладает собственным магнитным полем, и впервые идею о Земле как о большом магните высказал в 1600 г. Уильям Гильберт. В отличие от упрощенных представлений Гильберта геомагнитное поле не только имеет сложную структуру, но и непрерывно изменяется в пространстве и во времени. Эти факты стали известны благодаря созданию чувствительных стрелочных деклинометров и инклинометров, которые позволили провести многочисленные тщательные измерения направления вектора геомагнитного поля в различных районах нашей планеты. Магнитное поле Земли представляет собой векторную сумму нескольких полей, каждое из которых имеет свои источники, как внутри планеты, так и в верхней атмосфере.

В зависимости от поставленной задачи измерения геомагнитного поля (ГМП) можно разделить на несколько типов. Самым давним видом наблюдений можно считать региональные магнитные съемки с последующим составлением магнитных карт, которые представляют собой географические карты с нанесенными на них линиями одинакового склонения (изогнами) или наклонения (изоклинами). Изолинии остальных компонент ГМП имеют общее название изодинамы. Для проведения региональных магнитных съемок с давних пор привлекаются наземные экспедиционные отряды и морские суда, а со второй половины прошлого века, – авиация и спутники. Локальные магнитные съемки проводятся геологическими экспедициями на ограниченной территории при поисках полезных ископаемых методом обследования местных магнитных аномалий. При выполнении комплексных геофизических научных программ проводятся специальные измерения ГМП на сети временных наблюдательных пунктов. Специфическая область палеомагнитных измерений преследует цель воссоздания истории изменений нашей планеты, произошедших тысячи и миллионы лет назад.

Непрерывные и разнообразные изменения во времени магнитного поля Земли привели к необходимости организации постоянных пунктов по контролю и регистрации этих вариаций. Огромная заслуга в создании сети магнитных обсерваторий и проведении синхронных наблюдений в начале XIX в. принадлежит Александру фон Гумбольдту. Он смог привлечь к участию в геомагнитных исследованиях ведущих ученых того времени, в числе которых был профессор астрономии Карл Фридрих Гаусс, создавший метод абсолютных измерений напряженности магнитного поля. «Магнитный союз», организованный Гумбольдтом и Гауссом, стал первым крупным международным проектом в истории геомагнетизма. С 1836 по 1841 гг. проводились одновременные визуальные наблюдения поля в 50-ти обсерваториях, которые выявили глобальный характер магнитных возмущений. В настоящее время в мировую сеть входит более 150 магнитных обсерваторий.

Магнитная обсерватория – это научное учреждение, в котором длительное время осуществляется непрерывная регистрация вариаций геомагнитного поля, производятся регулярные абсолютные наблюдения, первичная обработка и анализ достоверности данных. Основным материалом обсерваторий более 100 лет были магнитограммы, – фотозаписи вариаций элементов геомагнитного поля. В последние десятилетия большинство обсерваторий перешло на цифровую систему получения и обра-

ботки данных, при которой основной продукцией являются ежесуточные файлы секундных и минутных значений вариаций ГМП с привязкой этих данных к абсолютным наблюдениям. Внедрение новых цифровых технологий позволило повысить точность измерений и автоматизировать часть процессов получения и обработки информации. Если несколько десятилетий назад считалась вполне удовлетворительной погрешность измерений ГМП в пределах 5-10 нТл (около 0,015%), то сейчас, в связи с развитием спутниковых измерений, перед магнитными обсерваториями ставится задача обеспечения погрешности наблюдений 0,1-0,5 нТл (около 0,001%).

Максимально возможная точность измерений геомагнитного поля является главной целью каждой магнитной обсерватории. Для ведущих обсерваторий, на которых обычно работают опытные наблюдатели и научные сотрудники, усилия в достижении этой цели всегда являлись традиционными.

Второй важной задачей обсерваторий является обеспечение непрерывности регистрации вариаций ГМП. Пропуски в данных являются безвозвратными и могут привести к потере особо важной информации при неожиданных геофизических явлениях или техногенных катастрофах. Обсерватории являются источником оперативной информации о состоянии магнитного поля Земли, которая необходима в различных областях науки, при проведении геологических изысканий, в хозяйственной деятельности ряда предприятий.

Третьей функцией магнитных обсерваторий является контроль вековых вариаций магнитного поля Земли с помощью абсолютных наблюдений. Анализ вековых вариаций поля позволяет разрабатывать теории внутреннего строения планеты. Одновременно каждая магнитная обсерватория является хранителем уровней элементов геомагнитного поля, по которым производится сравнение рабочих магнитометров и буссолей.

Для координации деятельности мировой сети обсерваторий существует Международная ассоциация геомагнетизма и аэрономии МАГА (IAGA), в которой есть секция «Обсерватории, индексы, приборы и данные». МАГА в свою очередь входит в состав Международного геодезического и геофизического союза МСГГ (IUGG), который был создан еще в 1919 г. Каждая страна, входящая в МСГГ, имеет свой национальный комитет. Наша страна представлена Межведомственным геофизическим комитетом при Президиуме Российской Академии наук.

В России по инициативе академика А.Я. Купфера в 1829 г. была организована первая магнитная обсерватория в Петербурге с ежечасными наблюдениями склонения. Через несколько лет для содействия поиску рудных месторождений были построены обсерватории при горных заводах в Нерчинске, Барнауле, Колывани, Екатеринбурге. Эти обсерватории функционировали почти двадцать лет. Планомерную магнитную съемку европейской части России осуществил в 1871-78 гг. доцент Казанского университета И.Н. Смирнов, который обнаружил тогда знаменитую Курскую аномалию. В это же время под руководством академика Г.И. Вильда была создана первоклассная обсерватория в Павловске, а через несколько лет были построены обсерватории в Тбилиси, Екатеринбурге, Иркутске.

Из архивных источников известно, что предложение Государственного Совета от 27 ноября 1884 г. об учреждении магнитно-метеорологических обсерваторий в Екатеринбурге и Иркутске было высочайше утверждено Александром III (Полное собрание Законов Российской империи, т.IV,

N2548). Первым директором Иркутской обсерватории был назначен 34-летний ученый секретарь Николаевской Главной Физической Обсерватории надворный советник Э.В. Штеллинг. Летом 1886 г. на окраине Иркутска он организовал строительство главных зданий обсерватории и с января 1887 г. положил начало «регулярным ежечасным наблюдениям склонения, горизонтальной и вертикальной составляющих, наклона и полной силы земного магнетизма» (Отчет Э. Штеллинга за 1885 и 1886 г.).

Российская Академия наук приняла активное участие в международной программе «Первый полярный год», организовав в 1882 г. ряд геофизических экспедиций в северные районы страны. По примеру европейских стран директор Главной геофизической обсерватории М.А. Рыкачев организовал в 1910 г. магнитную съемку всей России, которая прервалась в 1914 г. в связи с началом мировой войны. Генеральная магнитная съемка территории СССР возобновилась лишь в 1930 г. под руководством проф. Н.В. Розе, по инициативе которого в 1932 г. был создан Институт земного магнетизма (ИЗМИР АН СССР), – головное учреждение по организации и обеспечению магнитных измерений в стране.

Особо следует выделить участие СССР в составе 56 стран в комплексной программе «Международный геофизический год» (МГГ), который проводился с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. под руководством известного английского ученого С. Чепмена. В СССР в дополнение к 20-ти работающим обсерваториям были построены еще девять, из которых три организованы в Антарктике. По правительственному распоряжению Московский завод «Геофизприбор» взял заказ по выпуску кварцевых магнитометров QHM и протонных магнитометров ПМ-1, а мастерские ИЗМИРАН организовали серийный выпуск кварцевых вариометров конструкции Боброва для оснащения всех обсерваторий однотипными инструментами. С целью проведения магнитных съемок в океанах была построена уникальная немагнитная шхуна «Заря». Были разработаны первые ракетные и спутниковые феррозондовые магнитометры для измерений в верхних слоях атмосферы. Все обсерватории и экспедиции работали по единой программе с одинаковыми методами наблюдений и обработки данных. МГГ стал отличной школой для ученых и наблюдателей многих стран, которые приняли участие в этой программе.

В этот период в ИЗМИРАНе была предпринята попытка создать «Руководство по ведению работы в магнитных обсерваториях». В полном объеме эту работу не удалось выполнить, но были разработаны методические материалы Л.Г. Мансуровой и М.А. Белоусовой по обработке магнитограмм и контролю обсерваторских данных. С тех пор на обсерваториях сменилось поколение абсолютных и вариационных магнитометров, существенно изменились принципы получения и обработки данных.

Настоящее «Руководство» предназначено для наблюдателей обсерваторий, которые применяют современные магнитометры и переходят на цифровые системы сбора и обработки информации. Особое внимание уделено методам обеспечения максимальной точности измерений геомагнитного поля и способам контроля данных. Дополнительная информация о принципах работы магнитометров, включенная в настоящую работу, позволит сотрудникам обсерваторий самим искать пути повышения качества наблюдений и может оказать помощь в ремонте и настройке инструментов.

Учитывая специфическую особенность геомагнитных измерений, при которых территория, здания для наблюдений и приборные постаменты фактически являются составной частью магнитометров, в настоящем «Руководстве» рассмотрены некоторые вопросы по строительству, которые помогут избежать серьезных ошибок при переносе пунктов наблюдений или при организации новых магнитных обсерваторий.

В данном «Руководстве» не рассматривается специальное оборудование, предназначенное для метрологических испытаний и настройки магнитометров, которыми располагают некоторые ведущие обсерватории. К такому оборудованию можно отнести экранирующие камеры и компенсационные колечные системы нулевого магнитного поля, большие метрологические колечные установки, градиентометры, немагнитные термокамеры и т.д. Специализированные средства поверки магнитометров дают обсерватории определенную гарантию обеспечения повышенной точности наблюдений и регистрации вариаций ГМП, но для реализации этих достоинств нужны большие финансовые затраты.

В настоящее время в связи с внедрением цифровых технологий существует общая тенденция к превращению обсерватории в наблюдательную точку с минимальным комплектом инструментов и минимальным числом наблюдателей. Такие обсерватории не занимаются обработкой материалов, передавая всю первичную информацию по каналам связи в свои головные учреждения или международные центры сбора геофизической информации. Как правило, такой подход приводит к неизбежному снижению квалификации наблюдателей, вследствие чего падает точность измерений и достоверность данных. На практике сомнительные данные некоторых обсерваторий игнорируются и не используются в научных целях, а передача ошибочной информации сторонним потребителям может привести к непредсказуемым последствиям. Опыт показал, что необслуживаемые автоматические вариационные станции уступают по качеству данных традиционным магнитным обсерваториям. Кроме того, такие станции трудно защитить от помех индустриального характера и от вандализма местного населения. Учитывая широкий спектр источников систематических и случайных погрешностей при производстве геомагнитных наблюдений, только квалифицированный персонал оснащенной современными инструментами и вычислительной техникой обсерватории может обеспечить надежные и качественные данные по состоянию магнитного поля Земли. Этот вывод следует учитывать при выборе варианта организации геомагнитных измерений, — либо на временно действующей наблюдательной точке, или на постоянно действующей магнитной обсерватории.

2. ОПИСАНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1. Элементы геомагнитного поля

Свойство магнитной стрелки, имеющей возможность вращения в горизонтальной плоскости, указывать направление «север-юг» было известно в Китае в I веке н.э., а по некоторым древнекитайским летописям, намного раньше. В Европе первое достоверное сообщение о магнитном компасе, который вошел в практику мореплавания, появилось в сочинении английского монаха Александра Нехэма в 1190 г. В отличие от Китая, в Европе долгое время предполагали, что стрелка компаса точно направлена на север. Отклонение стрелки компаса от линии географического меридиана (склонение) впервые обнаружил Колумб в 1492 г. во время первого плавания в Америку, но эти сведения, как и другие подробности географических открытий, на многие годы оставались в Испании под строгим секретом. Первое письменное сообщение о разных значениях склонения в Риме и Нюрнберге было сделано в 1510 г. Хартманом. В течение XVI столетия в связи с развитием дальнего мореплавания наблюдался повышенный интерес к измерениям склонения и нанесению его значений на географические карты. В 1581 г. английский гидрограф Роберт Норман впервые опубликовал результаты своих наблюдений наклона, — угла отклонения магнита от горизонтальной плоскости. До конца XVII века все наблюдения земного магнетизма ограничивались измерениями углов магнитной оси стрелки, — склонения и наклона. Лишь после опытов Кулона в 1785 г. по определению вращающего момента путем измерения периода качаний тела на нити, Гумбольдт провел в 1804 г. первые относительные измерения напряженности горизонтальной составляющей геомагнитного поля. В 1838 г. профессор астрономии Гаусс опубликовал большую книгу, посвященную общей теории геомагнетизма. Он произвел сферический гармонический анализ магнитного поля Земли. Кроме того, Гаусс дал теоретические основания для измерения горизонтальной компоненты в абсолютных единицах и разработал методику наблюдений горизонтальной компоненты ГМП, которая повсеместно применялась более 120-ти лет.

Исторически сложились привычные для магнитологов обозначения компонент геомагнитного поля в декартовой системе координат, которые обычно называют элементами поля (рис. 2.1). Одна ось системы координат направлена по географическому меридиану на север, вторая по направлению параллели на восток и третья вертикально вниз. Им соответствуют северная компонента X , восточная компонента Y и вертикальная компонента Z геомагнитного поля. Вертикальная плоскость, в которой лежит вектор H называется плоскостью магнитного меридиана. Угол между вектором поля F и горизонтальной плоскостью называется наклоном I , который считается положительным в северном полушарии и равен нулю на геомагнитном экваторе. Угол между плоскостями магнитного и географического меридианов называется магнитным склонением D , которое принято считать положительным в восточном направлении.

Например, в Иркутске в 1887 г. склонение было восточным $+2^\circ 24'$. В результате вековой вариации склонение в 1934 г. прошло через нулевое значение. Тогда магнитный меридиан совпадал с географическим меридианом и компас в Иркутске показывал точно на истинный север. Постепенно вектор горизонтальной компоненты H продолжал смещаться в западном направлении и в 2001 г. склонение достигло значения $-2^\circ 24'$.

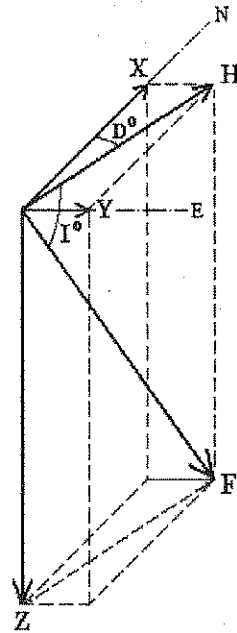


Рис. 2.1. Элементы магнитного поля Земли.

Элементы D и I обычно измеряются в угловых градусах, минутах и десятых долях минуты. Вариации склонения можно измерять в нанотеслах, если рассматривать dD как векторную компоненту, которая действует по нормали к вектору H . Окончательная информация о вариациях склонения дается в угловых минутах, в десятых или в сотых долях минут. Остальные элементы и полный вектор F выражаются в нТл или в десятых долях нТл.

Для справки:

единица измерения магнитной индукции B :

$$1 \text{ Тл} = 10^6 \text{ мкТл} = 10^9 \text{ нТл} \approx 10^9 \gamma = 10^4 \text{ Гс},$$

единица измерения напряженности поля H : $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \approx 1257 \gamma$,

в среде окружающего воздуха: $1 \text{ нТл} \approx 1 \gamma$

Как отмечалось выше, более века в практике магнитных наблюдений измерялись углы склонения D , наклонения I , а также горизонтальная компонента H . Остальные элементы геомагнитного поля вычислялись согласно рис. 2.1 по формулам:

$$X = H \cdot \cos D, Y = H \cdot \sin D, Z = H \cdot \text{tg } I, F = H / \cos I$$

После появления в парке обсерваторских инструментов протонных прецессионных магнитометров, измеряющих полный вектор поля F , применяются следующие формулы для компонентных расчетов:

$$H = F \cdot \cos I, X = H \cdot \cos D, Y = H \cdot \sin D, Z = F \cdot \sin I,$$

$$\text{или: } X = H \cdot \cos D, Y = H \cdot \sin D, Z = (F^2 - H^2)^{1/2}$$

С помощью колечной установки протонным магнитометром можно измерять компоненты Z или H (см. раздел 4) и тогда применяются следующие формулы:

$$H = (F^2 - Z^2)^{1/2}, \text{ или } Z = (F^2 - H^2)^{1/2}, X = H \cdot \cos D, Y = H \cdot \sin D$$

Данные трехкомпонентных вариационных станций, установленных по геомагнитному меридиану или по географическому меридиану, контроли-

руются с помощью регистрирующего протонного магнитометра по следующим формулам:

$$F = (H^2 + Z^2)^{1/2}, \text{ или } F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2},$$

где F – данные протонного магнитометра,

H, Z, X, Y – данные вариационных станций с принятыми базисными значениями.

Непрерывная регистрация ГМП показывает, что ни один из элементов поля не остается постоянным во времени. По характеру вариаций их можно классифицировать на два основных типа – относительно быстротечные, хорошо видимые на магнитограммах, и чрезвычайно медленные, которые можно выявить только с помощью длинного ряда абсолютных наблюдений в течение нескольких лет. Первые вариации имеют источники в верхней атмосфере, вторые – внутри земного шара.

2.2. Главное поле Земли

Главное поле Земли определяют как среднее значение его компонент за год или более длительный промежуток времени и по площади не менее 10^6 км^2 . При таком усреднении это поле практически свободно от влияния суточных вариаций и локальных полей. Источником данных о главном геомагнитном поле (ГМП) являются магнитные обсерватории, службы контроля векового хода, региональные магнитные съемки, аэромагнитные съемки и спутниковые измерения. Эти данные наносятся на географическую карту в виде изолиний, – кривых, соединяющих точки с одинаковым значением элементов геомагнитного поля. Магнитные карты с погрешностью $\pm 100 \text{ нТл}$ дают общую картину магнитного поля земного шара и отдельных регионов на определенную эпоху, т.е. на середину года. Первую крупномасштабную магнитную съемку Атлантического океана произвел в 1698-1700 годах Э. Галлей, который результаты измерений склонения опубликовал в виде магнитной карты изогон. На большей части земной поверхности склонение изменяется примерно на 1° через несколько сотен километров. Однако существуют районы, в которых склонение может измениться на десятки градусов в пределах нескольких километров. Такие районы носят общее название магнитных аномалий. Наиболее сильные и в то же время наиболее ограниченные в пространстве аномалии вызваны выходом железных руд к земной поверхности.

В самом первом приближении намагниченность Земли можно представить в виде однородно намагниченного тела, т.е. в виде диполя B_0 в центре земного шара, имеющего наклон около 11° к оси вращения земного шара. Более точно реальное магнитное поле на поверхности Земли приближается к модели эксцентричного диполя, который смещен на 490 км от центра Земли. Две противоположные точки, в которых ось диполя пересекает поверхность Земли, называются геомагнитными полюсами. Плоскость, перпендикулярная оси диполя и проходящая через его центр, образует на поверхности Земли большой круг, который называется геомагнитным экватором (рис. 2.2). Отсюда по аналогии с географическими координатами каждой точке земной поверхности можно присвоить геомагнитные координаты. Геомагнитная широта φ_m отсчитывается в угловых градусах от геомагнитного экватора к северному и южному геомагнитным полюсам. (Часто в формулах применяется коширота θ_m , которая отсчитывается от полюса: $\theta_m = 90^\circ - \varphi_m$).

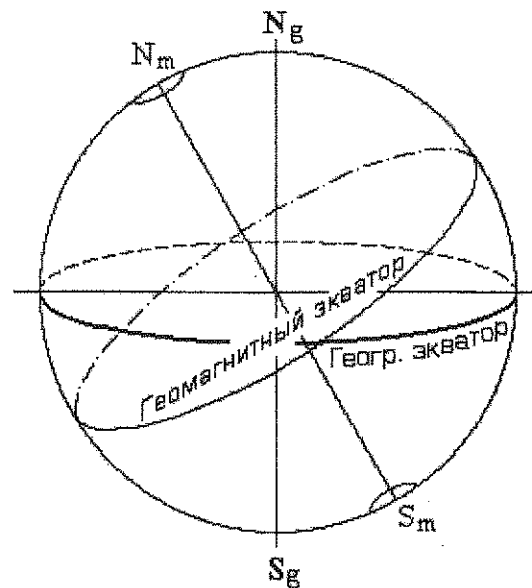


Рис. 2.2. Географические и геомагнитные координаты.

За нулевой магнитный меридиан (в отличие от географического гринвического меридиана) принят большой круг, проходящий через геомагнитные полюса и южный географический полюс. По формулам сферической геометрии можно ориентировочно вычислить геомагнитные координаты любой точки планеты по географической широте φ и долготе λ :

$$\sin \varphi_m = \sin \varphi \cdot \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos(\lambda - \lambda_0)$$

$$\sin \lambda_m = \cos \varphi \cdot \sin(\lambda - \lambda_0) / \cos \varphi_m,$$

где: $\varphi_0 = (90^\circ - 11.5^\circ) = 78.8^\circ$ и $\lambda_0 = -71^\circ$, φ_0, λ_0 – принятые координаты полюса диполя.

На каждую эпоху публикуются расчеты уточняющих коэффициентов сферических гармонических членов для создания таблиц исправленных геомагнитных координат.

При анализе магнитосферных процессов в ряде случаев удобно применять геомагнитное время. Геомагнитный меридиан, проходящий через подсолнечную точку, принимается за геомагнитный полдень. Тогда противоположная точка на этом меридиане будет означать геомагнитную полночь. Угол между меридианом геомагнитной полночи и меридианом некоторой точки на земной поверхности определяет геомагнитное время в этой точке. Геомагнитное время в высоких широтах может значительно отличаться от среднемирового времени в течение большей части суток.

Реальные магнитные полюса, найденные на земной поверхности путем измерений наклонения ($I = \pm 90^\circ$), не совпадают с расчетными координатами геомагнитных полюсов. Геомагнитный экватор лишь приблизительно отражает реальную нулевую изоклину, вдоль которой наклонение $I = 0^\circ$. Таким образом, дипольная модель геомагнитного поля имеет существенные расхождения с реальной картиной распределения поля во многих районах поверхности Земли. Для лучшей аппроксимации расчетного поля необходимо ввести высшие члены сферических гармоник, которые описывают дополнительное недипольное поле B_m . Сумма этих полей образует главное поле Земли: $B = B_0 + B_m$. Наиболее интенсивной является Восточ-

но-Азиатская материковая аномалия, в которой значения вертикальной компоненты достигают 30% от дипольного поля. В Западной Африке аномалия имеет обратный знак и захватывает часть Атлантики. Если считать, что источниками недипольного поля являются токовые системы около ядра Земли, то для создания на земной поверхности реального поля необходимо иметь до 14 радиальных диполей. Стандартное приближение главного магнитного поля называется Международным эталонным геомагнитным полем МЭГП (IGRF), которое уточняется через каждые пять лет.

На главное поле накладываются локальные поля, которые в некоторых районах земной поверхности могут достигать значений, соизмеримых с главным полем. На суше магнитные аномалии обычно имеют сложную форму. Океанические аномалии выглядят в виде параллельных полос, которые могут протягиваться на тысячи километров.

С удалением от поверхности Земли главное магнитное поле уменьшается пропорционально кубу расстояния. Зато на больших высотах заметно увеличиваются поля от внешних ионосферных источников.

2.3. Вековые вариации

Первыми были обнаружены вековые вариации геомагнитного поля в Лондоне, когда Геллибрант в 1634 г. решил сравнить свои наблюдения склонения с наблюдениями предыдущих лет. Сейчас каждая обсерватория строит графики среднегодовых значений элементов поля, которые наглядно демонстрируют плавные вековые вариации геомагнитного поля в данном пункте. Разности между соседними среднегодовыми значениями элемента принято называть вековым ходом этого элемента, а линии одинакового векового хода на магнитной карте называют изопорами. Измерения за 125 лет работы Иркутской магнитной обсерватории выявили почти непрерывное изменение склонения от $+2,4^\circ$ до $-2,6^\circ$ с переменной скоростью до 10 угловых минут в год. За это время горизонтальная компонента неоднократно изменялась с вековым ходом до ± 30 нТл/год и периодом около 80 лет. Вековой ход вертикальной компоненты достигал ± 60 нТл/год с общим периодом 50 лет (рис. 2.3).

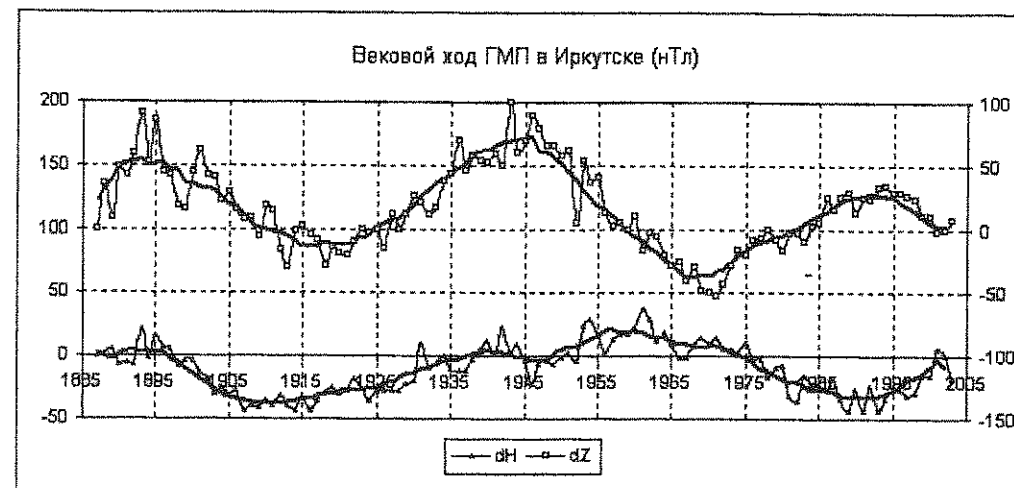


Рис. 2.3. Многолетние циклы векового хода горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля по наблюдениям в Иркутске.

Было проведено много исследований, посвященных периодичности вековых вариаций, но существующая длина регулярных наблюдений в 150-300 лет еще недостаточна для получения надежных выводов. По результатам измерений выявлены колебания индукции ГМП с периодом 58 лет, а по археомагнитным данным можно предполагать периоды в 450, 600, 1800 и 8000 лет.

Отмечено различие между дипольной и недипольной вековой вариацией. Длительность первой составляет тысячи лет, а второй — десятки и сотни лет. Направление дипольной оси мало изменилось за последние 150 лет. За это время магнитный момент систематически уменьшался, но археомагнитные данные показывают, что в течение последних 9000 лет магнитный момент испытывал квазипериодические изменения. Недипольные вековые вариации могут быть связаны с изменениями параметров вихревых токовых систем недипольного поля. Мировые карты изопор выявляют несколько фокусов векового хода, в которых ежегодные изменения поля достигают максимального значения. Фокусы изопор не сохраняют постоянства своего положения, а перемещаются сложным образом по земной поверхности, имея тенденцию к западному дрейфу. В конце XVI в. Э. Галлей после повторной магнитной съемки Атлантического океана и построения магнитной карты векового хода сделал предположение, что западный дрейф фокусов максимальных годовых изменений геомагнитного поля вызван тем обстоятельством, что внутри земного шара имеется ядро, которое вращается с другой скоростью относительно внешней оболочки планеты.

Причины вековых вариаций геомагнитного поля тесно связаны с происхождением главного поля. Магнитное поле может создаваться намагниченным телом или системой замкнутых электрических токов. Чтобы создать поле в 60000 нТл, планета Земля на 50% должна состоять из магнетита и иметь температуру не выше 600°C для сохранения намагниченного состояния породы. В действительности уже на глубине 30 км температура достигает этого значения. Сведения о строении земного шара глубже нескольких десятков километров получены на основании данных сейсмических наблюдений. Эти исследования позволили установить, что планета Земля состоит из твердой оболочки толщиной до 2900 км и жидкого ядра радиусом около 3000 км. Оболочка имеет слоистую структуру: земная кора толщиной от 5 км на дне океанов до 35 км на суше, верхняя мантия толщиной около 400 км, переходная зона в 600 км, нижняя мантия. Внешняя часть ядра Земли состоит из расплавленных слоев железа и никеля, а в центре его вероятно имеется твердое внутреннее ядро. Температура жидкой части ядра составляет 3000 – 4000 °C при огромном внутреннем давлении $3,5 \cdot 10^{12}$ дин/см². Сведения о жидком состоянии вещества в ядре Земли привели разных исследователей к различным вариантам применения динамоэффекта в решении проблемы возникновения геомагнитного поля. В жидком ядре вследствие температурных градиентов возникает вихревое движение металлических масс, которое при наличии слабого первичного магнитного поля создает эффект динамо-машины. Впервые гипотезу гидромагнитного динамо для генерации магнитного поля на Солнце высказал в 1919 г. Д. Лармор. Модель земного динамо Э. Булларда основана на предположении более медленного вращения вокруг общей оси жидкой части ядра с токовыми вихревыми системами по сравнению с его твердой частью и с оболочкой Земли. Такая модель дает достаточно

убедительное объяснение образования дипольной части геомагнитного поля, причин вековых вариаций недипольной части геомагнитного поля и западного дрейфа его фокусов. Математическое обоснование этой модели, основанной на динамоэффекте, заключается в применении уравнений магнитной гидродинамики.

Палеомагнитные данные указывают на периодическую инверсию полярности геомагнитного поля в последние 10 млн. лет с минимальным периодом около 50 тыс. лет, что теоретически возможно, если предположить, что на внешней поверхности ядра Земли действуют не менее двух взаимосвязанных динамо-механизма.

2.4. Переменное магнитное поле Земли

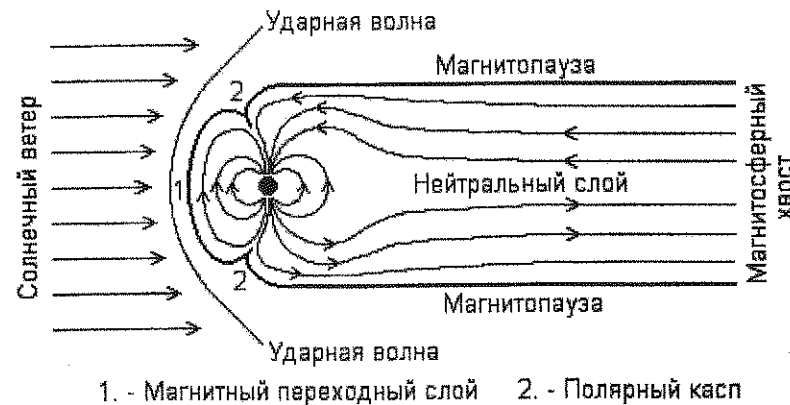
По некоторым сведениям суточные вариации склонения впервые были обнаружены в 1682 г. Гуи Ташаром, который в течение трех дней снимал показания стрелки компаса и нашел, что они меняются день ото дня. Через 50 лет лондонский часовых дел мастер Грэхэм сделал более чувствительный компас и точно установил наличие малых суточных вариаций склонения, а также случаи больших хаотических отклонений стрелки, которые получили название магнитных бурь. В 1747 г. Цельсий обнаружил, что колебания стрелки компаса резко увеличиваются во время полярных сияний. По договоренности с Грэхемом, они провели одновременные наблюдения в Англии и Швеции, которые выявили глобальный характер суточных вариаций склонения. Позднее были обнаружены вариации и других элементов геомагнитного поля.

На главное магнитное поле Земли накладывается сумма переменных полей, амплитуда которых мала по сравнению с постоянным полем. В середине XVIII в. М.В. Ломоносов предположил, что полярные сияния относятся к электрическим явлениям, а лорд Кельвин выдвинул гипотезу о существовании проводящего слоя на большой высоте над поверхностью Земли. В 1858 г. Броун впервые заметил 27-дневную повторяемость магнитной активности, которая соответствовала периоду оборота Солнца вокруг своей оси. В 1889 г. Шустер исследовал суточные вариации поля и доказал, что причиной их может быть большая проводимость верхней атмосферы. После того как Маундер в 1904 г. впервые установила тесную связь между магнитными и солнечными возмущениями, идея о заряженных частицах, летящих от Солнца к Земле, стала основной в представлениях об источнике магнитных вариаций.

Записи вариаций геомагнитного поля показывают, что в одни дни вариации имеют плавный характер и ежесуточную повторяемость, а в другие выглядят в виде беспорядочных колебаний с резкими изменениями амплитуд и периодов. Первые вариации называются спокойными, а вторые — возмущенными. К спокойным вариациям относятся солнечносуточные с периодами 24 и 12 часов, лунносуточные с периодом 12,4 часа и годовые вариации. Последние два типа вариаций имеют малую амплитуду в единицы нТл, но их можно выделить статистическими методами. Нерегулярные вариации относят к возмущенному полю. Часто возмущения имеют небольшую амплитуду, которые накладываются на спокойную солнечносуточную вариацию. Но иногда нерегулярные вариации столь велики, что суточную вариацию на их фоне практически не удается обнаружить. Периоды очень сильных иррегулярных вариаций принято называть магнитными бурями. Разнообразная структура вариаций геомагнитного поля говорит о

сложных процессах, происходящих в околоземном космическом пространстве на высотах от ионосферы до внешней границы магнитосферы.

Магнитные силовые линии диполя имеют симметричную квазиколецевую форму, замыкаясь в магнитных полюсах. При взаимодействии солнечного ионизированного газа (плазмы) с магнитным полем Земли происходит существенное изменение картины магнитных силовых линий. Поток плазмы от Солнца, называемый солнечным ветром, достигает земной орбиты со сверхзвуковой скоростью. Набегающий на геомагнитное поле солнечный ветер сметает его дальнюю более слабую часть, уплотняет оставшееся поле и обтекает его. При торможении потока плазмы у препятствия в виде геомагнитного поля создается ударная волна с образованием переходного конвективного магнитного слоя потерявших скорость частиц плазмы. Геомагнитное поле заключено в пределах обтекаемой солнечным ветром полости, которую называют магнитосферой. На расстоянии около 11 земных радиусов плазма и магнитное поле солнечного ветра переходного слоя отделена от собственно геомагнитного поля тонкой оболочкой, называемой магнитопаузой (рис. 2.4).



1. - Магнитный переходный слой 2. - Полярный касп

Рис. 2.4. Структура магнитосферы Земли.

С дневной стороны ее можно представить в виде полусферы, а с ночной – в виде вытянутого в пространство цилиндра диаметром около 30 земных радиусов, который называют хвостом магнитосферы.

Силовые линии на геомагнитной широте $72,5^\circ$ оказываются в области магнитопаузы. В зависимости от изменяющихся параметров солнечного ветра силовые линии геомагнитного поля в районе этой широты могут либо замыкаться на подсолнечной стороне земного шара, либо перебраться в хвост магнитосферы. Две области магнитосферы, напоминающие воронки над полярными шапками называются полярными каспами. Предполагается, что частицы солнечного ветра имеют свободный доступ в эти области и высыпаются вдоль дневной стороны овала полярных сияний. На ночной стороне плазма воронок сливается с плазменным слоем магнитосферы.

Вдоль магнитосферного хвоста существует узкая область нулевого поля. Эта область, называемая нейтральным токовым слоем, имеет важное значение для электродинамики магнитосферы.

С точки зрения концентрации плазмы магнитосферу делят на две области: внутреннюю плазмосферу с холодной плазмой и внешнюю очень изменчивую из-за воздействия солнечного ветра плазмапаузу. Внутренней

границей плазмосферы является ионосфера, в которой концентрация заряженных частиц резко возрастает.

Значительная доля энергии Солнца излучается его фотосферой в межпланетное пространство. Спектр излучения необычайно широк – от рентгеновского и ультрафиолетового на частотах $10^{18} - 10^{15}$ Гц до радиочастотного $10^{11} - 10^8$ Гц. Высокочастотная часть электромагнитного излучения Солнца ионизирует молекулы воздуха верхней атмосферы Земли. Наличие проводящего слоя на высоте около 100 км предполагали еще в 1902 г. Хевисайд и Кеннели после осуществления сверхдальней радиосвязи через Атлантический океан. Ионосферные слои имеют нижнюю границу на высоте около 65 км и максимальную концентрацию ионов на высоте около 300 км. Параметры ионосферы очень изменчивы и зависят от времени суток, сезона года, активности Солнца, состояния магнитосферной плазмы. Ионосферу можно рассматривать как основание области, занимаемой магнитосферой. Выброс Солнцем потока высокоэнергичных частиц резко увеличивает ионизацию ионосферы в высоких широтах. Электроны с энергиями в несколько килоэлектронвольт во время магнитных возмущений в больших количествах возбуждают и ионизируют молекулы воздуха на высотах от 95 до 115 км, вызывая появление полярных сияний. Лучи полярного сияния вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля, создавая иллюзию колеблющегося занавеса с преобладанием красного и зеленого света. Кольцевая зона на геомагнитной широте около 65° , в которой наиболее часто появляются полярные сияния, получила название авроральной зоны.

Из всех геомагнитных вариаций наиболее изученными являются спокойные суточные вариации. Эти вариации имеют четкую зависимость от местного времени. Магнитограмма за 17.03.02 г. Иркутской обсерватории (рис. 2.5) дает представление о спокойной солнечно-суточной вариации.

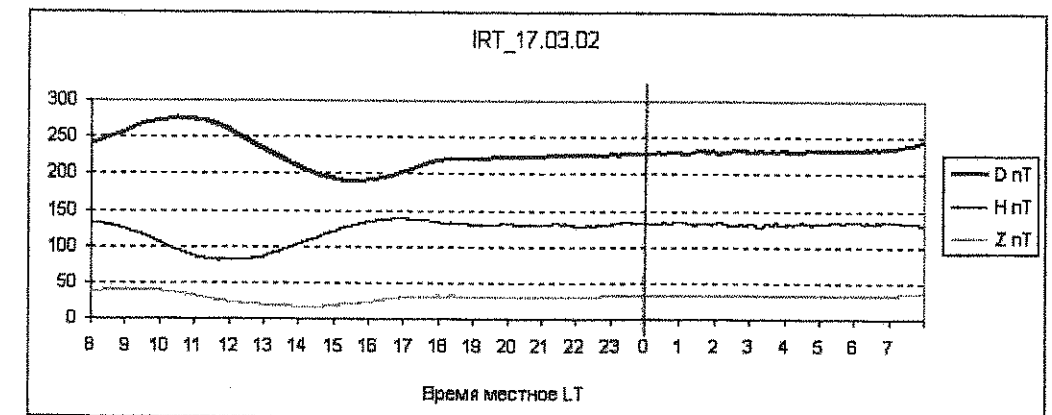


Рис. 2.5. Спокойная солнечно-суточная вариация ГМИ.

Основную часть этой вариации составляет спокойная солнечно-суточная вариация S_q , которая зависит от местного времени. Если в ночное время все элементы поля почти не испытывают изменений, то в дневное время форма вариации и амплитуда зависят от магнитной широты, сезона года и солнечной активности. В зимние месяцы амплитуда спокойных суточных вариаций в средних широтах составляет 10-20 нТл, в летние месяцы увеличивается до 50-100 нТл.

Особенностью S_q -вариации является резкое возрастание ее амплитуды в области магнитного экватора. Поскольку ионосфера представляет собой проводящий слой, ее ветровые и приливные движения индуцируют электродвижущую силу ($v \times B$). Первые расчеты токовых систем, ответственных за S_q -вариации, произвел в 1887 г. Шустер. Впоследствии к этому вопросу возвращались многие геофизики. Установлено, что кольцевые токи, достигающие сотни тысяч ампер, возникают вследствие динамо-эффекта в ионосферном E-слое на солнечной стороне Земли и имеют противоположное направление в северном и южном полушариях. Обсерватории, расположенные около магнитного экватора регистрируют аномально большие амплитуды S_q -вариации горизонтальной компоненты. Объяснение этого явления было найдено после того, как был понят анизотропный характер проводимости ионосферы. В районе магнитного экватора действует узкий проводящий ионосферный канал, по которому на дневной стороне Земли течет ток в восточном направлении. Этот токовый пояс Чепмен назвал экваториальной электроструей (электроджет). Изучение ионосферы с помощью ракет подтвердило существование этого тока. Полагают, что экваториальный электроджет возникает вследствие повышения электропроводности ионосферы в поперечном направлении к силовым линиям геомагнитного поля. Обратный ток электроструи распределен на магнитных широтах $\pm 20^\circ$ и там снижает амплитуду S_q -вариации. В северном полушарии S_q -вариация склонения D имеет восточное направление в утренние часы и западное в послеполуденное время. К югу от экватора эта вариация меняет свой знак на обратный. При анализе токовых систем суточной вариации нет единого мнения относительно величины геомагнитного поля, при котором отсутствует ионосферный S_q -ток. За такое значение часто принимают поле в геомагнитную полночь. Высокоширотные суточные вариации имеют более сложную структуру и условия возникновения спокойного поля более похожи на механизм, связанный с магнитными возмущениями.

Лунносуточные L-вариации обычно анализируются по всем магнитоспокойным дням и в широтном отношении они мало отличаются от S_q -вариации, но имеют на порядок меньшую амплитуду. Лунносуточные вариации также имеют годичный ход. Во время летнего солнцестояния амплитуды L-вариаций достигают максимальных значений в северном полушарии. Источником этих вариаций служат приливные ветры на высоте E-слоя, но теория атмосферных приливных движений недостаточно проработана.

2.5. Магнитные возмущения

Независимо от регулярных суточных вариаций существует огромное разнообразие нерегулярных вариаций, которые появляются не каждый день. Если амплитуды иррегулярных возмущений геомагнитного поля превышают некоторую заданную величину, то такие возмущения классифицируют как магнитные бури. По характеру возмущений можно выделить три зоны земной поверхности: низкие широты, авроральные области и области полярных шапок.

Повторяемость возмущений через 27 дней была выявлена еще в начале прошлого века. Это синодический период вращения Солнца, при котором возмущенная солнечная область делает полный оборот, и если она сохранила свою активность, то может снова воздействовать на магнито-

сферу Земли. Бартельс ввел нумерацию солнечных оборотов, начиная с 8 февраля 1832 г., но существует другая нумерация, которую ввел астроном Каррингтон, используя синодический период оборотов Солнца в 27,2753 дня. Счет оборотов по Каррингтону ведется с 9 ноября 1853 г.

Наблюдаемая полугодовая периодичность уровня возмущенности геомагнитного поля имеет подъемы в периоды весеннего и осеннего равноденствия, когда плоскости земного и солнечного экваторов совпадают. Эффективность взаимодействия геомагнитного и межпланетного полей максимальна в эти месяцы.

Периодичность в 11 лет увеличения магнитной активности (особенно числа магнитных бурь в году) связана с 11-летней цикличностью солнечной активности. Однако максимум магнитной активности отстает примерно на год от максимума солнечной активности и не наблюдается полноценной корреляции между появлением пятен на Солнце и возникновением магнитных бурь на Земле.

Основным признаком магнитной бури можно считать всемирный характер магнитного возмущения, большие амплитуды колебаний поля и продолжительность возмущений от одних до трех суток. Четких критериев, какие возмущения следует относить к магнитной буре, пока не существует. Ни одна буря не повторяет другую, но некоторые общие черты таких возмущений можно выделить. Классического вида бури бывают в среднем один-два раза в месяц. Намного чаще на среднеширотных обсерваториях фиксируют периоды повышенной возмущенности, а сильные возмущения в это время ограничены широтами вблизи авроральной зоны. Детально механизмы этих явлений еще не познаны, но основные принципы достаточно изучены.

Внезапное начало SSC (storm sudden commencement) бури начинается внезапным изменением горизонтальной компоненты геомагнитного поля, обычно в сторону увеличения на десятки нанотесл. Оно фиксируется одновременно на всей планете с точностью до минуты (рис. 2.6). После SSC возмущенный и повышенный уровень H может сохраняться от нескольких минут до нескольких часов. Этот период называется начальной фазой бури. Иногда отмечается резкий отрицательный импульс (SSC^*) перед внезапным повышением уровня H . Такое возмущение может быть связано с двумя овальными эквивалентными токовыми системами в полярной области, которые возникают за несколько минут до основного положительного импульса.

Причину появления внезапных импульсов SI связывают с ударной волной плазменного выброса из активной области Солнца, т.е. с резким возрастанием плотности или скорости плазмы, которая сжимает всю магнитосферу, увеличивая горизонтальную компоненту. Если условия развития процесса благоприятны, то начнется период начальной фазы с последующим развитием бури и тогда можно говорить о ее внезапном начале SSC.

Нередко бывают бури с постепенным началом, когда амплитуды и периоды колебаний всех элементов постепенно увеличиваются в течение нескольких часов и определить точное время начала бури не представляется возможным.

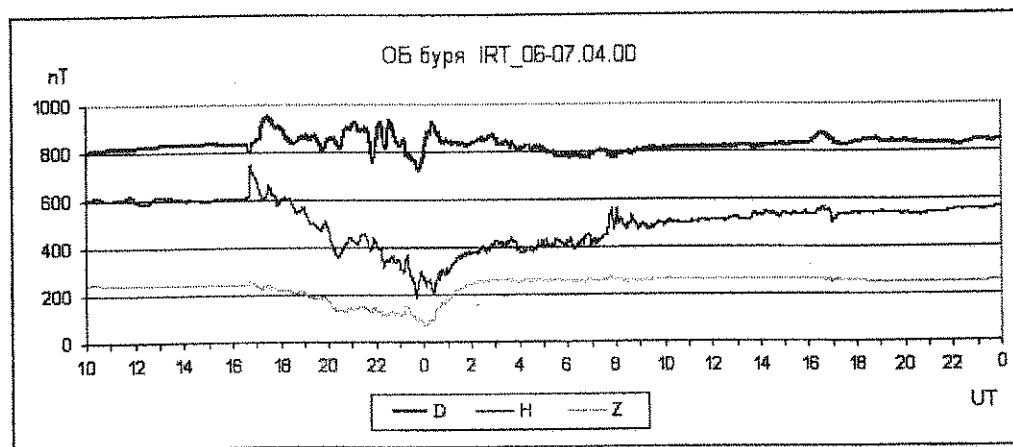


Рис. 2.6. Магнитная буря с внезапным началом.

Главная фаза бури характеризуется непрерывным уменьшением горизонтальной компоненты и возрастанием вертикальной компоненты с последующим медленным восстановлением среднего уровня поля. Вариация спада и восстановления горизонтальной компоненты во время бури получила название аperiодической возмущенной вариации D_{st} . Обычно амплитуда этой вариации максимальна на экваторе. На фоне D_{st} -вариации во время бури развиваются быстрые нерегулярные D_1 -вариации.

По амплитуде бури принято условно делить на малые (М), умеренные (У), большие (Б) и очень большие (ОБ). Пока не приняты единые правила, устанавливающие шкалу амплитуд для градации бурь. Малые бури многие авторы не выделяют и относят к категории возмущенного поля. Обычно бурями называют возмущения с величиной K -индекса >5 . В соответствии с принятой на обсерватории амплитудной шкалой или величиной K -индекса присваивается соответствующая характеристика бури.

Несмотря на многолетнее изучение магнитных и ионосферных возмущений до сих пор сохраняется значительное расхождение точек зрения ученых относительно механизмов возникновения и процессов развития магнитных бурь.

В 1953 г. Данжи сделал предположение, что силовые линии межпланетного магнитного поля, направленные к югу по отношению к Земле, могут соединяться с силовыми линиями геомагнитного поля. Поэтому модель Данжи называют моделью открытой магнитосферы, а прежнюю модель Чепмена-Ферраро стали называть замкнутой. С помощью открытой модели можно объяснить многие свойства магнитосферы. Учет направленности магнитного поля солнечной плазмы имеет принципиальное значение для понимания взаимодействия между солнечным ветром и геомагнитным полем.

Когда на Солнце происходит мощная солнечная буря с интенсивным испусканием рентгеновского и ультрафиолетового излучений и выбросом частиц широкого диапазона энергий, то уже через 10 минут излучение может воздействовать на ионосферу, а через 40-50 часов ударная волна с плазмой пересекает земную орбиту. Если Земля оказывается в зоне действия потока, то от его ударной волны происходит внезапное сжатие магнитосферы. Магнитосфера становится неустойчивой, растут и затухают системы интенсивных электрических токов, вызывая магнитосферные возмущения в виде иррегулярных колебаний. Горячая плазма переносится вдоль силовых линий из области плазменного слоя в ионосферу авро-

ральных зон, что вызывает ионизацию и необычно высокую проводимость вдоль аврорального овала, возбуждение молекул воздуха верхней атмосферы и возникновение полярных сияний. В ионосфере происходит перераспределение токовых систем. На более низких широтах совокупность токов вызывает возрастание H на большей части ночной стороны планеты. Главная фаза магнитосферной бури начинается с приходом плазменного облака, породившего ударную волну. Эта фаза характеризуется последовательностью взрывоподобных процессов, называемых магнитосферными суббурями. Акасофу определяет суббурю как единый физический процесс, который инициируется в высоких широтах на ночной стороне и охватывает всю верхнюю атмосферу и околоземное космическое пространство. Суббури обычно сопровождаются изменениями в магнитосфере и ионосфере, аномальным увеличением жесткого солнечного излучения, появлением полярных сияний. Общая продолжительность нерегулярных изменений тока с образованием гидромагнитных волн составляет от одного до нескольких часов, что соответствует обычной продолжительности суббури с нерегулярными колебаниями элементов поля. Иногда перемещение горячей плазмы настолько велико, что большое ее количество вспыскивается из магнитосферного хвоста во внутреннюю магнитосферу, в которой возникает западный ток, охватывающий планету поясом шириной в два земных радиуса. Этот кольцевой ток является основной причиной главной фазы бури с общим уменьшением горизонтальной компоненты. Не исключено, что на разном удалении от Земли возникают два кольцевых тока. Появление ближнего кольцевого тока приводит к особо большой амплитуде D_{st} -вариации с глубоким провалом H в главной фазе бури.

Фаза восстановления горизонтальной компоненты может продолжаться несколько дней. Часто такое затягивание восстановления среднего уровня H связано с воздействием последовательных суббурь. Распад кольцевого тока происходит по экспоненциальному закону в связи с охлаждением инжектированной плазмы.

Нерегулярные флуктуации по всем элементам поля являются неотъемлемой частью любой магнитной бури. Они обладают широким спектром периодов от долей минуты до нескольких часов. В средних широтах амплитуды горизонтальных компонент нерегулярных флуктуаций сравнимы между собой и в авроральных зонах достигают нескольких тысяч нанотесл. В полярной шапке амплитуды элементов снова уменьшаются.

Геомагнитные возмущения могут возникать не только по причине солнечных бурь. Рост активных областей на уровне фотосферы Солнца может привести к перераспределению межпланетных магнитных полей и картины солнечного ветра. Межпланетная секторная структура излучения Солнца с магнитным полем, направленным по архимедовой спирали к Солнцу или от Солнца, создает предпосылки в развитии тангенциальных разрывов плазмы, которые могут формировать ударные волны. Вероятно, ведущие границы секторов можно отождествить с M -потоками Бартельса, которые ответственны за появление геомагнитных возмущений при отсутствии заметных явлений на Солнце.

Особо выделяют быстрые почти синусоидальные вариации, которые называются геомагнитными пульсациями. Они хорошо регистрируются высокочастотными и чувствительными вариометрами. Встречаются пульсации с почти постоянной или плавно изменяющейся амплитудой от деся-

тых долей до нескольких десятков нТл, которые относят к классу от Pc1 до Pc6 в зависимости от периода колебаний (рис. 2.7).

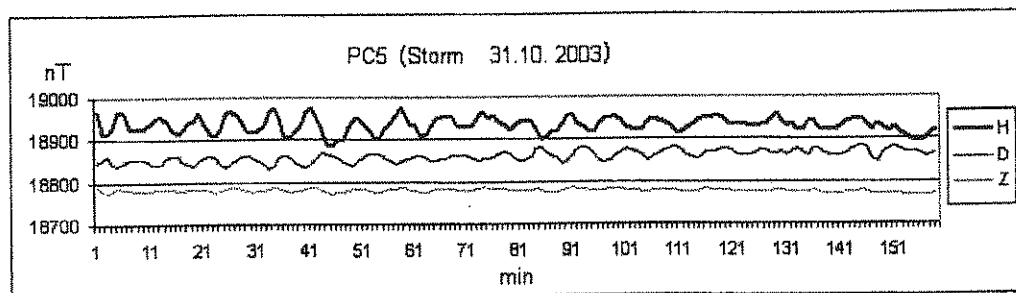


Рис. 2.7. Короткопериодные колебания (пульсации) ГМП.

Геомагнитные пульсации порождаются гидромагнитными волнами в магнитосфере, а синусоидальный характер пульсаций предполагает наличие условий резонансов или фильтрации в плазмосфере и в ионосферном слое. Стандартные обсерваторские магнитные цифровые станции регистрируют длиннопериодные вариации с использованием низкочастотных фильтров, имеющих частоту среза 0,08 Гц и подавляющих большую часть короткопериодных колебаний. Для регистрации пульсаций обычно применяют индукционные и феррозондовые датчики с быстродействующими АЦП, которые устанавливаются в тех пунктах, где имеется малый уровень электромагнитных помех в частотном диапазоне от 0,001 до 10 Гц.

Изучение магнитных возмущений и в частности, магнитосферных суббурь, может способствовать пониманию основных процессов, связанных с солнечными бурями. В последние десятилетия резко увеличился объем исследований плазмы, магнитных и электрических полей в периоды геомагнитных возмущений, использующих наземные и спутниковые наблюдения. Сейчас надежно установлены основные особенности структуры магнитосферы: ударная волна, переходная область, магнитопауза, хвост магнитосферы, крупномасштабная конвекция магнитосферной плазмы. Стали понятны некоторые основные процессы, протекающие в магнитосфере. Но еще много остается нерешенных вопросов в понимании солнечно-земных явлений.

2.6. Прикладные аспекты геомагнитных возмущений

До середины прошлого века геомагнитное поле и его вариации представляли интерес для средств навигации и решения проблем нарушения радиосвязи. Сейчас с появлением спутниковых навигационных систем акцент в исследованиях геомагнитного поля сместился в область изучения околоземного космического пространства. Сохранили свои позиции магнитометрические методы поиска полезных ископаемых. Теория интерпретации локальных магнитных аномалий позволяет осуществлять геологическое картирование и обнаруживать залежи различных руд, минералов, нефти и газа. При проведении точной магнитной разведки учитываются данные по вариациям геомагнитного поля, которые регистрируются магнитными обсерваториями и временными наблюдательными пунктами. Космические войска уже давно используют геомагнитную информацию при расчетах траекторий своих спутников и ракет.

Сведения о магнитных бурях в последние десятилетия стали пользоваться повышенным интересом у общества. Это связано с тем, что эффекты магнитных бурь имеют разнообразные проявления. В периоды магнитных бурь происходит повышенное воздействие радиации на космонавтов и пассажиров высотных авиаполетов, прерывается КВ радиосвязь, возникают поверхностные заряды на спутниках, которые приводят к сбоям в аппаратуре и ошибкам в навигационных системах. Магнитные бури приводят к появлению экстраток в линиях электропередач и трубопроводах, которые могут приводить к техногенным авариям. По мере освоения северных территорий и создания разветвленных технологических систем большой протяженности было обнаружено, что часть аварийных ситуаций была определено связана с индукционными эффектами во время геомагнитных бурь не только в силовых линиях электропередач, но и в кабельных сигнальных линиях и в системах газопроводов.

Существует воздействие и на биосферу, в том числе на людей, находящихся в экстремальной ситуации, или имеющих отклонения в здоровье. Не исключено, что в медицине могут появиться методы магнитотерапии.

Ввиду широкого спроса на оперативную информацию о состоянии геомагнитного поля, в сети Интернет реализуются системы представления геофизических данных в реальном времени. В последние годы практически все магнитные обсерватории перешли (или стремятся перейти) на цифровые системы регистрации вариаций геомагнитного поля с активным освоением современных информационных технологий. Часть таких обсерваторий, имеющих цифровые вариационные станции, вошла в мировую сеть ИНТЕРМАГНЕТ, одной из основных функций которой является сбор и обмен геомагнитной информацией в квазиреальном времени.

3. ТЕРРИТОРИЯ И ЗДАНИЯ МАГНИТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Измерения геомагнитного поля принципиально отличаются от большинства технических измерений тем, что здания с магнитометрами (павильоны) и территория обсерватории фактически являются частью измерительных инструментов.

Для правильного выбора места под строительство магнитной обсерватории необходимо учитывать характер геомагнитной обстановки в данном районе. Близкое соседство обсерватории с промышленными предприятиями, электрифицированной железной дорогой или жилым массивом часто приводит к измерениям не столько естественных вариаций геомагнитного поля, сколько к регистрации промышленных воздействий на это поле. Здания, построенные из магнитных материалов, (напр., из красного кирпича или с применением железобетонных конструкций) не только искажают магнитное поле внутри его помещений, но могут являться источником непредсказуемых температурных и других климатических воздействий на показания магнитометров. Нестабильные приборные постаменты приводят к большим ошибкам в компонентных наблюдениях.

Таким образом, неудачный выбор места наблюдений и нарушения в правилах строительства павильонов обсерватории могут существенно исказить результаты измерений любых высокоточных магнитометров.

3.1. Выбор места для магнитной обсерватории

Практика показывает, что для многих действующих магнитных обсерваторий наступает момент, когда в связи с увеличением воздействия промышленных помех выше предельных норм возникает вопрос о переносе места наблюдений. Создание обсерватории на новом месте, — это дорогостоящее и трудоемкое дело, требующее обязательного выполнения ряда специфических условий.

Магнитная обсерватория предназначена для длительной непрерывной работы в течение многих десятков лет. Это означает, что на обозримый период в районе обсерватории не предполагается строительство промышленных или жилых объектов, прокладка транспортных магистралей, трубопроводов и высоковольтных линий электропередачи. Для магнитных измерений особенно большие помехи создают электрифицированные железные дороги и трамвайные линии, которые в зависимости от проводимости грунтов должны быть на расстоянии не менее 10 км от обсерватории. И все же, несмотря на стремление удалить магнитную обсерваторию от современной цивилизации, следует учитывать необходимость обеспечения ее электроэнергией и системой связи. Также должны быть учтены жилищно-бытовые условия сотрудников обсерватории.

Отвод земли под территорию магнитной обсерватории, утверждение охранной зоны особого режима, строительство подъездных путей и коммуникаций необходимо согласовать с местной администрацией и принять соответствующие решения на максимально высоком административном уровне.

В районах предполагаемого строительства по инженерно-геологическим картам следует проверить надежность грунтов для устройства стабильных приборных постаментов и произвести предварительную магнитную съемку в радиусе 1-2 км через каждые 100-200 метров. Для исключения вариаций геомагнитного поля во время съемки измерения производят

одновременно двумя протонными магнитометрами, один из которых устанавливается стационарно в центре предполагаемой строительной площадки. На территории строительства обсерватории производят детальную магнитную съемку через каждые 10 м на высоте 1-1,5 м от поверхности земли. Градиенты магнитного поля не должны превышать 5 нТл/м, а непосредственно на площадке строительства абсолютного и вариационного павильонов — не более 2 нТл/м как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали. Площадку с малыми градиентами геомагнитного поля не просто найти в горных районах, где поверхностные породы часто обладают остаточной намагниченностью. Напр., на территории Норильской КМИС только после высоты 4 м от поверхности земли вертикальные градиенты геомагнитного поля уменьшаются до 5-6 нТл/м. По этой причине, а также для сохранения вечной мерзлоты в грунте, павильоны для магнитных измерений в Норильске подняты опорами на уровень второго этажа.

Дополнительно рекомендуется проверить влияние индуктивной намагниченности коренных пород на амплитуду вариаций геомагнитного поля. Для этого в радиусе около 10 км нужно провести контрольную регистрацию вариаций геомагнитного поля (ГМП). Разность в амплитудах вариаций не должна превышать единиц нТл.

К сожалению, в большинстве известных случаев при выборе места для строительства магнитной обсерватории руководствуются самыми разнообразными критериями, среди которых магнитная обстановка и состояние грунтов территории занимает одно из последних мест, либо вовсе не учитывается.

3.2. Территория магнитной обсерватории

Выбранную территорию магнитной обсерватории условно (или физически) нужно разделить на две части: производственно-бытовую и измерительную. Первая часть предназначена для главного технического здания и строений хозяйственно-бытового назначения. В этой части территории при строительстве зданий и коммуникаций можно применять в ограниченном количестве магнитные материалы. В главном техническом здании обычно предусматриваются следующие помещения: аппаратная и лаборантская комнаты, архив, мастерская, кабинет. Еще недавно обязательное специальное помещение для фотообработки магнитограмм в связи с переходом на цифровые методы сбора и обработки данных уже не является необходимым на обсерватории.

Вторая часть территории предназначена для немагнитных зданий, в которых размещаются магнитометры, вариометры и необходимое для измерений геомагнитного поля оборудование. Здесь строятся немагнитные абсолютные и вариационные павильоны, будка для электрооборудования и кабельных соединений, выделяется особая «чистая» зона с приборными постаментами для контрольных абсолютных наблюдений. В этой части территории действуют жесткие ограничения на любые строительные и хозяйственные работы, на въезд транспорта и на размещение магнитных материалов.

Чтобы исключить магнитные помехи производственного характера расстояние от павильонов до технического здания и подъездных дорог должно быть не менее 100 м, т.к. грузовая машина на расстоянии 80 м дает магнитную помеху около 1 нТл.

При строительстве магнитной обсерватории можно ограничиться минимальным числом павильонов, — одним для абсолютных наблюдений и одним для регистрации вариаций геомагнитного поля. Но практика долговременной работы обсерваторий показывает, что для обеспечения круглосуточного бесперебойного режима регистрации геомагнитного поля, необходимо иметь два комплекта магнитометров, размещенных в разных павильонах. Тогда обсерватория не будет прерывать наблюдения на время проведения ремонтно-строительных работ в зданиях, а также появляется возможность надежного обнаружения изменения магнитной обстановки на территории обсерватории (рис. 3.1).

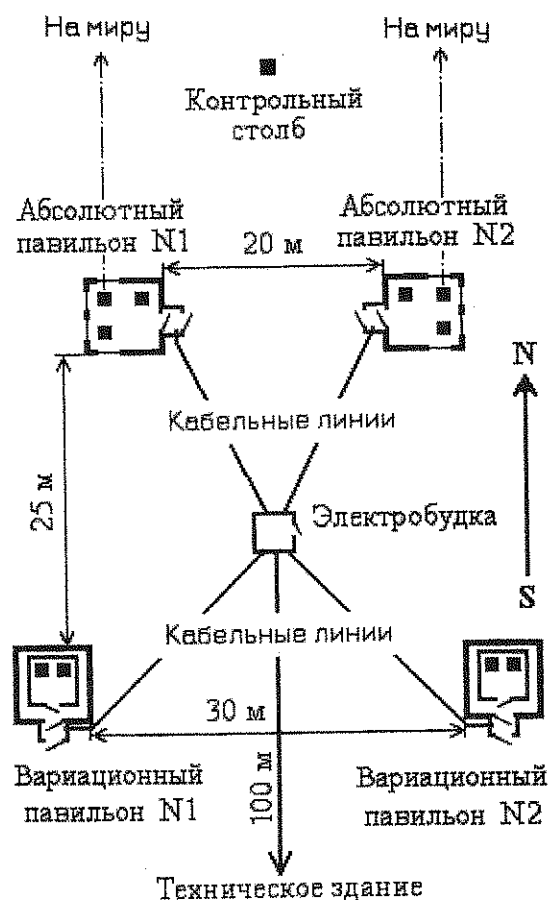


Рис. 3.1. Схема расположения павильонов магнитной обсерватории (МО).

Современные магнитометры достаточно малогабаритны и вместе с электронными блоками могут размещаться на малой площади размером около 2 м^2 . И все же работать наблюдателям удобней в большом помещении, в котором можно на достаточном удалении от рабочих магнитометров установить дополнительную аппаратуру, в которой могут быть магнитные детали, хранить запасные магнитометры, размещать приборы или инструменты, необходимые для настройки. Рекомендуется строить павильоны площадью не менее 25 м^2 на расстоянии 20–30 м друг от друга и на расстоянии около 100 м от технического здания. Если павильоны будут иметь минимальные размеры, то между ними нужно построить специальную утепленную будку размером $3 \times 3 \text{ м}^2$, предназначенную для уста-

новки распределительного силового электрошита и для размещения аккумуляторов с зарядным устройством. К электробудке от технического здания должны подходить трехфазный силовой кабель и однофазный приборный кабель. Первый предназначен для электрообогрева павильонов и рассчитан на общую мощность около 10 кВт, а второй — для питания измерительных приборов и освещения павильонов с нагрузкой не более 2 кВт. Сигнальные 10-парные кабели от технического здания к павильонам целесообразно подключить к промежуточным разделочным колодкам, установленным в электробудке. Если применяются оптоволоконные кабели передачи цифровой информации, то их необходимо проложить от вариационных павильонов непосредственно в аппаратную технического здания.

На расстоянии 30–50 м от павильонов выделяется площадка для устройства двух внешних контрольных постаментов, предназначенных для эпизодической проверки градиентов магнитного поля на территории обсерватории и в павильонах.

Разметку территории под фундаменты павильонов производят с помощью теодолита по направлению географического или магнитного меридиана. Как указывалось выше, до начала строительных работ необходимо произвести детальную компонентную магнитную съемку строительных площадок (кварцевым магнитометром QHM, феррозондовым инклинометром и протонным магнитометром) с привязкой данных к выносному наблюдательному столбу. Все измерения градиентов геомагнитного поля должны быть оформлены в виде комплекта магнитных карт, который является первичным архивным документом обсерватории.

3.3. Устройство фундаментов и приборных постаментов

При строительстве павильонов самой ответственной частью работ является устройство приборных постаментов, которые должны обладать высокой стабильностью и немагнитностью. Эти два требования не очень хорошо согласуются между собой, а любые последующие переделки трудновыполнимы и связаны с большими затратами. Поэтому все образцы материалов, предназначенных для строительства павильонов, необходимо проверить на немагнитность, например, путем определения их воздействия на феррозонд деклинометра или на датчик протонного магнитометра с расстояния 0,3–0,5 метра. Как правило, подходящими материалами для устройства фундаментов являются: песчаник, белый мрамор, кислотоупорный кирпич, стеклоблоки, карьерный песок, известь. Слабомагнитными материалами являются асбоцементные трубы, белый силикатный кирпич, пенобетон. К магнитным материалам, запрещенным для применения в конструкции павильонов, относятся: красный кирпич, железобетонные изделия, отходы металлургической и топливной промышленности. Гравий может оказаться в любой группе по намагниченности в зависимости от содержания ферромагнитных фракций. Цемент до замеса почти не проявляет магнитных свойств, но после его застывания из-за наличия примеси тонкодисперсионных частиц металла от шаровых мельниц нередко в геомагнитном поле приобретает остаточную намагниченность. Поэтому цемент нужно применять в ограниченных количествах и не выше уровня пола павильонов.

Строительство абсолютного и вариационного павильонов начинают с устройства приборных постаментов, под которые готовят котлованы глубиной ниже уровня промерзания почвы (около 2 м). На дне котлованов ук-

ладывается подушка толщиной 0,5 м из бутового камня (песчаник или известняк) с добавлением гравийно-песчаной смеси на известково-цементном растворе. Приборные постаменты из бутового камня, мраморных блоков или стеклоблоков сечением в основании не менее $1 \times 1 \text{ м}^2$ возводятся на известковом растворе или с применением строительных клеев. Они выводятся на высоту 1,1–1,2 м над проектным уровнем пола в абсолютном павильоне и высоту 0,8 м – в вариационном павильоне. В качестве приборных немагнитных постаментов абсолютного павильона можно применять столбы из лиственницы или дуба диаметром не менее 300 мм, но следует учитывать, что деревянные столбы имеют склонность к эффекту сезонного вращения вдоль своей оси от воздействия влажности окружающей среды, а замена сгнивших столбов связана с большим объемом ремонтно-строительных работ. Пространство между приборными постаментами заполняется песком, слои которого обильно смачиваются и трамбуются. Если постаменты изготовлены из теплопроводящего материала (мрамор, бутовый камень), то их надо утеплить в подпольной части, напр., пенопластом (рис. 3.2).

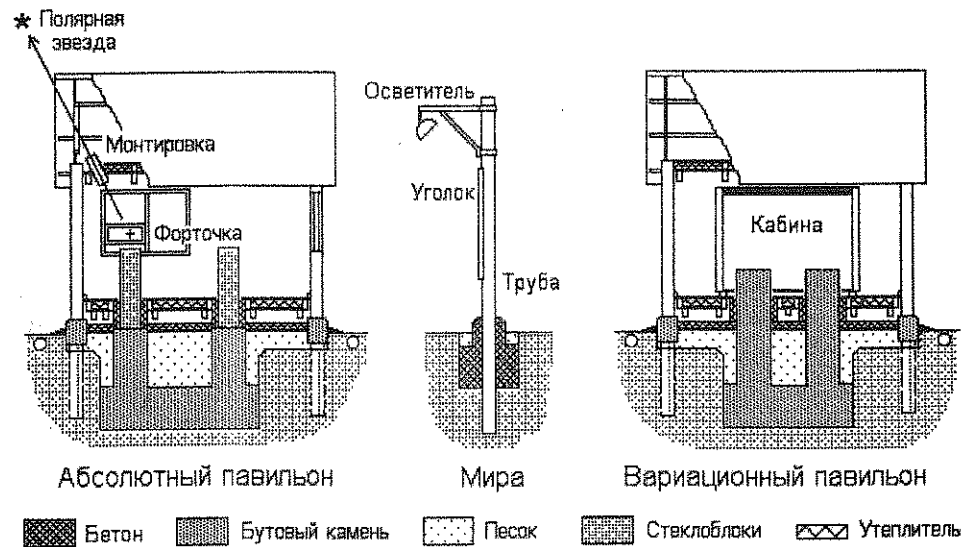


Рис. 3.2. Конструкция павильонов для геомагнитных наблюдений.

Долговременная устойчивость положения постаментов вариационных павильонов в значительной степени определяет стабильность базисных уровней вариометров, а стабильность постаментов (столбов) абсолютных павильонов обеспечивают высокую точность компонентных наблюдений.

При строительстве приборного постамента для деклинометра нужно предусмотреть возможность видимости астрономической миры через оконные форточки абсолютного павильона.

Если приборные постаменты решено оформить столешницами для установки магнитометров, то следует обратить особое внимание на повышенную надежность крепления (напр., с помощью строительного клея) немагнитной керамической или мраморной плиты к поверхности постамента.

На постаментах вариационного павильона рекомендуется провести по Полярной звезде линии географического меридиана, которые помогут обеспечить правильную ориентацию блока XY-вариометров.

После строительства приборных постаментов необходимо произвести повторные определения градиентов магнитного поля, чтобы убедиться в немагнитности примененных материалов. При отрицательных результатах наблюдений необходимо переделать верхнюю часть постаментов с повторной проверкой градиентов геомагнитного поля.

Фундаменты под стенами павильонов могут быть столбчатыми, ленточными или комбинированными. В качестве опорных столбов допустимо применять асбоцементные трубы с заливкой их гравийно-известковым раствором. Ленточный фундамент из бутового камня на песчаной подушке выводят на высоту 300 мм над уровнем земли, оставляя продухи на каждой стороне размером $250 \times 150 \text{ мм}$. Подполье засыпают теплоизоляционным материалом (перлит, стекловата) по гидроизоляционному слою из глины и рубероида. С наружной стороны цоколя укладывают глиногравийную отмостку шириной до 1 м. По периметру отмостки для отвода дождевой воды прорывают канавку или закапывают дренажную полиэтиленовую трубу. Для гидроизоляции стен выровненную верхнюю поверхность цоколя покрывают битумной мастикой, на которую приклеивают 2 слоя рубероида.

3.4. Немагнитные здания

С точки зрения гарантированной немагнитности и хорошей теплоизоляции стены абсолютного и вариационного павильонов лучше всего построить из брусьев или бревен, которые собираются без применения дорогих и дефицитных медных или латунных крепежных элементов. Сруб, изготовленный из качественной древесины при хорошей гидроизоляции нижнего венца, обычно исправно служит более сотни лет. Можно применить вариант каркасной конструкции с утеплением стен, но такие постройки менее долговечны и требуют применения большого количества медных гвоздей. Возведение стен павильонов из силикатного кирпича, известняка, ракушечника, пенобетона или современных строительных материалов сопряжено с тщательным контролем на немагнитность этих материалов.

Между прочим, даже среди специалистов существует ошибочное мнение, что вариационный павильон допускает применение магнитных материалов. При этом не учитывается тот факт, что воздействие на вариометры дополнительных полей от магнитных изделий и материалов не остается постоянным. Изменения температуры и влажности окружающего воздуха, коробление конструкций, ветровые нагрузки неминуемо приводят к изменению этого воздействия, что проявляется в нестабильности базисных уровней вариометров, а значит, к снижению точности измерения вариаций ГМП.

Балки пола павильонов устанавливаются с таким расчетом, чтобы они проходили в 100 мм от боковых поверхностей приборных постаментов. Это позволит настлать доски черного и чистого пола без соприкосновения с постаментами. Зазоры между полом и постаментами закрываются мягким утеплителем (напр., войлоком). Для экономии медных гвоздей доски пола и потолка можно крепить по балкам деревянными шкантами. Кровля (предпочтительно двухскатная) изготавливается из волнистых листов шифера, алюминия, стеклопластика, андулина или из рулонных

материалов типа рубероида. Для пожарной безопасности стены павильона изнутри рекомендуется обшить негорючим материалом (напр., плитами гипсокартона). Медные гвозди нужны для крепления панелей, установки плинтусов и наличников, прокладки кабелей, изготовления крыши здания. Латунные шурупы требуются для установки дверных и оконных навесов, ручек, розеток и осветительных приборов. Практика показала, что многие привычные в обычном строительстве материалы нельзя применять при строительстве павильонов. Например, коричневый линолеум является магнитным материалом. «Медные» гвозди, шурупы, дверные ручки могут в действительности оказаться стальными с гальваническим покрытием под медь или латунь. Поэтому все материалы и изделия до их применения в строительстве необходимо проверять на немагнитность с помощью магнитометров или действующей вариационной станции.

В абсолютном павильоне необходимо иметь хорошее освещение теодолитов феррозондовых деклинометров/инклинометров и кварцевых магнитометров QHM. Поэтому в этом здании предусматриваются широкие окна и немагнитные светильники непосредственно над приборными постами. В окнах на линии оптической оси «теодолит – мира» предусматриваются форточки для наведения оптической трубы теодолита на астрономическую миру при измерениях магнитного склонения (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Абсолютный павильон Иркутской МО (фото С. Нечаева).

Определение азимута миры непосредственно с приборного поста всегда точнее, чем косвенные измерения с наружного столба. Для производства таких астрономических наблюдений Полярной звезды необходимо предусмотреть специальные отверстия в потолке и крыше абсолютного павильона для установки оптической монтировки. При строительстве абсолютного павильона на постамент, предназначенный для деклинометра, нужно временно поставить астрономический теодолит и произвести на-

водку на Полярную звезду. С помощью нитей, натянутых между балками потолка, обозначить центр отверстия в потолке. Оптическая монтировка может быть изготовлена из полиэтиленовой трубы диаметром не менее 300 мм с подвижными крышками для теплоизоляции и защиты от атмосферных осадков.

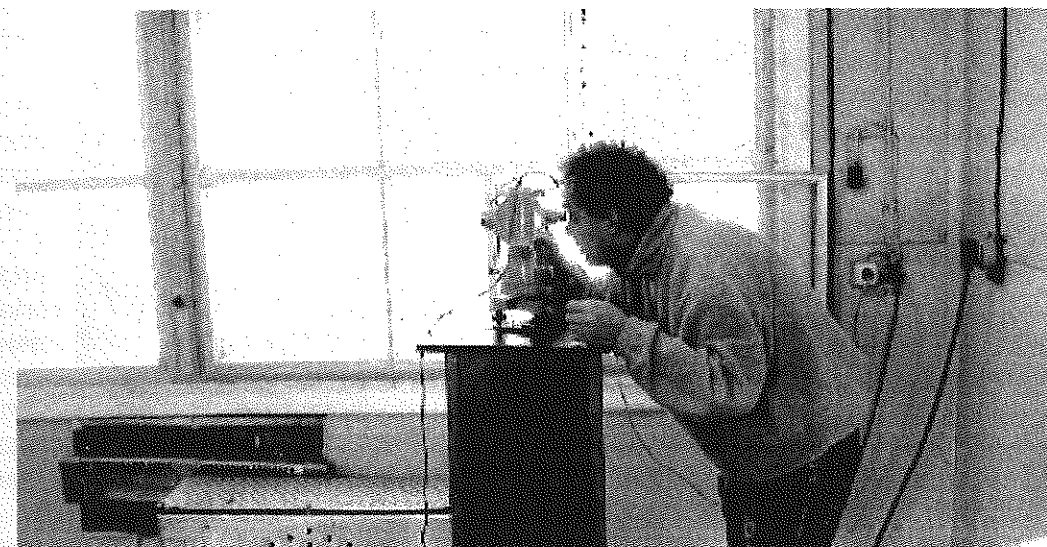


Рис. 3.4. Наблюдения в абсолютном павильоне (фото С. Нечаева).

Если изготовление оптической монтировки для Полярной звезды вызывает затруднения из-за конструкции здания, то следует предусмотреть специальное открывающееся окно для наблюдений вечернего или утреннего Солнца с постаментов.

Вариационный павильон (рис. 3.5) обычно не имеет окон для естественного освещения, т.к. конструкция здания должна обеспечивать стабильный температурный режим вариометров. С этой целью внутри основного здания вокруг приборных постаментов монтируется теплоизоляционная кабина, которая изготавливается из бруса или теплоизоляционных панелей с зазором 200 мм над полом павильона для обеспечения кругового обогрева кабины нагретым воздухом здания. В такой кабине можно обеспечить малые температурные градиенты и плавное изменение температуры при аварийном отключении электрообогрева павильона. Если малые размеры существующего вариационного павильона не позволяют иметь кабину для вариометров, то допустимо применять термостатный корпус, который устанавливается непосредственно на приборном постаменте. Внутренний кожух (рис. 3.6) из теплопроводящего материала (лист АМГ – 82 мм) снижает градиенты температуры в объеме расположения магнитовариационной станции МВС. Верхнюю или боковую часть корпуса нужно сделать съемной для обеспечения доступа к элементам юстировки станции.

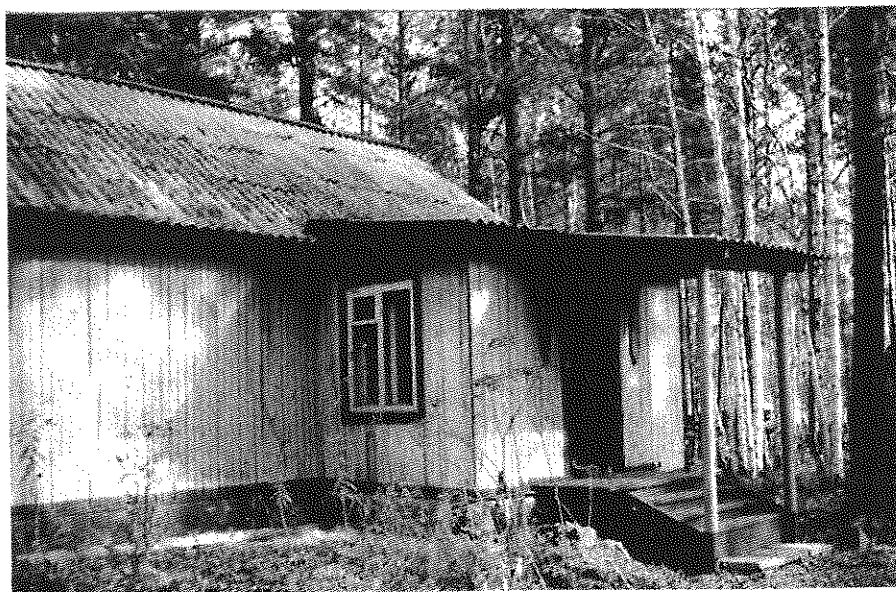


Рис. 3.5. Вариационный павильон Иркутской МО (фото С. Нечаева).

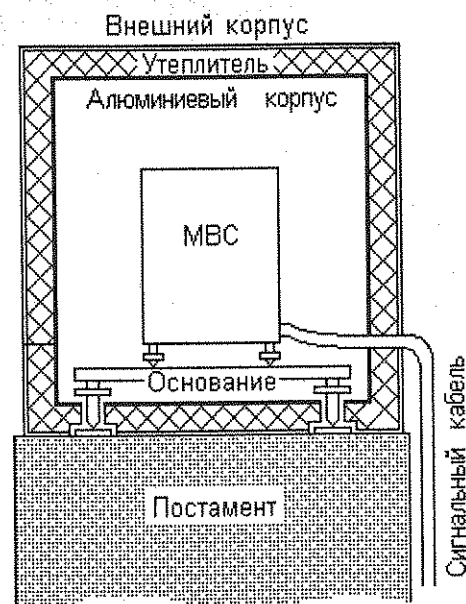


Рис. 3.6. Термостатный корпус блока вариометров.

Некоторые магнитные обсерватории (Душети, Одесса) построили специальные подземные помещения для вариометров. Таким способом достигалась очень высокая стабильность температуры независимо от сезона года, но при этом всегда были проблемы с воздействием на приборы избыточной влажности внутри таких сооружений. Возможен вариант размещения вариационной станции в специальном колодце, но защита блока датчиков от влаги и обрастания плесенью становится еще более актуальной. Подобное строительное решение можно рекомендовать только в районах с сухим и жарким климатом.

3.5. Электрообеспечение павильонов

Как правило, обогрев павильонов осуществляется с помощью немагнитных электронагревателей, имеющих систему термостабилизации воздуха в помещениях. С этой целью павильоны обеспечиваются отдельной силовой линией электрообогрева. Поддержание стабильной температуры в павильонах является важным фактором для надежной работы измерительной аппаратуры. После резких изменений температуры вариационного павильона, которые бывают зимой при отключении электроэнергии, нередко наблюдается смещение базисных уровней вариометров, вызванное остаточными деформациями в юстировочных элементах датчиков или в положении приборного постаментов. Магнитометры в абсолютном павильоне в таких случаях могут изменить свои константы.

Радиаторные электронагреватели, изготовленные из алюминиевых пластин с трубчатыми элементами из кварцевого стекла или прессованной слюды, размещаются по внутреннему периметру помещения. Если применяется немагнитный нагревательный электрокабель (напр., КНРПВ-М), то его прокладывают по плинтусу помещения. Датчики температуры системы термостабилизации рекомендуется устанавливать около пола, окна или у специального продуха для автоматической компенсации обычного понижения температуры воздуха в здании при сильном холодном ветре.

В кабине вариационного павильона электропечи лучше не устанавливать, чтобы не создавать больших градиентов температуры около вариометров и исключить возможность появления электромагнитной помехи. Силовые щитки и аккумуляторы питания вариационных станций рекомендуется выносить в электрическую будку, построенную из силикатного кирпича или пенобетона. Если применяются промышленные типы электрических терморегуляторов с управляемыми полупроводниковыми ключами, то следует проверить не только их немагнитность, но и отсутствие постоянной составляющей тока в силовых цепях электропечей. Силовые электронные элементы системы автоматического управления обогревом не должны нарушать синусоидальную симметрию переменного тока сети.

Температура приведения вариометров выбирается в зависимости от климатических условий магнитной обсерватории. В Иркутске температуру в кабинах вариационного павильона можно круглый год поддерживать на уровне 17–18 °С.

Электрические осветительные лампочки не только имеют стальные детали, но они являются источником тепла. Поэтому их следует устанавливать не ближе 2-х метров от магнитометров. В абсолютном павильоне в непосредственной близости от астрономической монтировки располагают дополнительный осветитель, предназначенный для подсветки окулярной сетки теодолита при ночных наблюдениях Полярной звезды.

3.6. Астрономическая мира

Если в качестве астрономической миры невозможно использовать капитальное сооружение, находящееся на расстоянии в 1–2 км от абсолютного павильона, то необходимо построить специальную миру для привязки в пространстве измеренных деклинометром положений магнитного меридиана. Требования к стабильности положения миры зависят от расстояния до нее от приборного постаментов абсолютного павильона. Допустимые отклонения миры ΔA от воздействия внешней среды определяются по формуле:

$$\Delta A = L \cdot \tan \Delta D.$$

На магнитных обсерваториях производятся измерения склонения с допустимой погрешностью $\delta D = 0,1'$ при разрешающей способности теодолитов до $1''$. Следовательно, если миру построить на расстоянии 100 м, то смещение ее положения не должно превышать 3 мм. С такой же точностью необходимо устанавливать деklinометр на приборном постаменте абсолютного павильона. Это достаточно жесткие требования к устройству миры и положению прибора на постаменте. Если расстояние до миры составляет 350 м, то допустимая ошибка смещения миры или деklinометра увеличивается до 1 см. Можно принять это расстояние минимально допустимым для обсерваторий.

Место строительства миры и ее необходимая высота уточняется наведением зрительной трубы теодолита с приборного постамена в открытую форточку павильона. На выбранном месте следует вырыть котлован размером 2 x 2 м до плотного грунта и пробурить скважину на глубину около 2 м. В скважину по отвесу устанавливается стальная или чугунная труба диаметром не менее 120 мм, которая бетонируется с применением арматуры. На трубе наведением теодолита фиксируют точку крепления маски. Простейший вариант маски выполняется в виде алюминиевого уголка, который привинчивается вдоль образующей столба. Светлая линия на фоне черного столба хорошо видна даже в пасмурную погоду. Более сложный вариант маски представляет собой экран из стального листа с накладным равносторонним треугольником из алюминиевой полосы. Экран приваривается к трубе на необходимой высоте. Для наблюдений в ночное время или зимой в условиях полярной ночи нужна прожекторная подсветка миры, которую удобно включать непосредственно из абсолютного павильона. Нестабильное положение миры или неточное наведение деklinометра на миру из-за плохой видимости объекта наблюдения приводят к дополнительным погрешностям определений магнитного склонения.

3.7. Определение азимута миры

Азимут миры называется углом между вертикальной плоскостью, проходящей по направлению на миру M и плоскостью географического (астрономического) меридиана. Т.к. географический меридиан на местности ничем не зафиксирован, то определения азимута проводятся путем наблюдения небесного светила с фиксацией времени моментов отсчетов его положения. Астрономический азимут отсчитывается по часовой стрелке от точки юга. Но в практике геомагнитных измерений принято использовать геодезический азимут, который отсчитывается от точки севера. Обычно азимут земного предмета определяется из наблюдений Полярной звезды (α Ursae minoris) или наблюдений Солнца. Первый метод дает более точные результаты и поэтому его рекомендуется применять в практике обсерваторских наблюдений.

В средних и южных широтах наблюдения азимута миры можно производить непосредственно теодолитом феррозондового деklinометра/инклинометра с применением призматической окулярной насадки. Для исключения коллимационных ошибок теодолита наведения на миру и Полярную звезду производят по стандартной симметричной схеме с поворотом зрительной трубы через зенит. Если мира не имеет освещения, то допускается наблюдения миры производить вечером и повторять их утром для контроля отсутствия смещений теодолита или горизонтального лимба в процессе ночных наблюдений. Т.к. за сутки Полярная звезда описывает

круг радиусом около 2° , то сначала необходимо вычислить ее азимут в моменты наблюдений, который обычно отсчитывают от точки севера с положительными значениями к западу.

Расчет азимута Полярной звезды можно производить по следующей формуле:

$$A_s = \arctg [\sin t_s / (\sin \varphi \cdot \cos t_s - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)],$$

где: A_s – азимут Полярной в градусах, t_s – часовой угол положения Полярной в моменты наведения, φ – широта места наблюдения в градусах, δ – азимутальный угол Полярной звезды (α Ursae minoris).

Далее определяется место географического меридиана на горизонтальном круге теодолита: $\theta_{gm} = \theta_s - A_s$,

где θ_s – отсчет наведения на Полярную звезду.

Зная место миры и место географического меридиана на круге, можно определить азимут миры: $A = \theta_M - \theta_{gm}$,

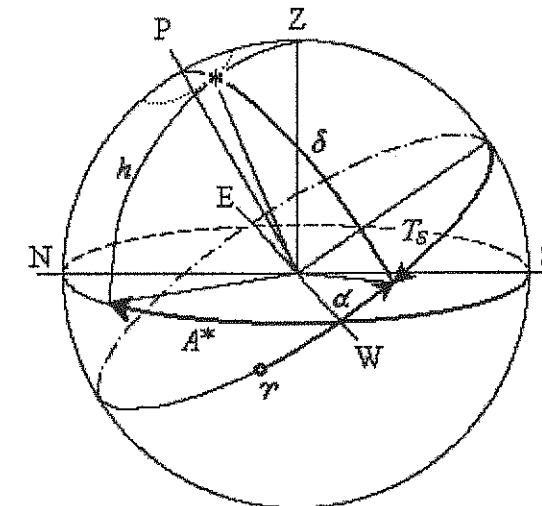
где θ_M – отсчет наведения на миру.

Служба магнитной обсерватории ведется по среднему мировому времени UT , но в расчетах астрономических наблюдений используется местное звездное время T_s :

$$T_s = UT \cdot (1 + \mu) + L + S_0,$$

где: μ – переводной коэффициент ($\mu = 1/365,2422 = 0,00273791$), L – долгота места наблюдения в часах, S_0 – звездное время в полночь на гринвичском меридиане.

Часовой угол Полярной звезды (рис. 3.7): $t_s = T_s - \alpha$, где α – прямое восхождение Полярной звезды в часах.



- δ - склонение звезды
- α - прямое восхождение звезды
- γ - точка весеннего равноденствия
- T_s - часовой угол звезды
- h - высота звезды
- A^* - астрономический азимут звезды

Рис. 3.7. Экваториальная система сферических координат.

Перед наблюдениями азимута миры необходимо определить поправку к показаниям часов наблюдателя с точностью до 1 с и произвести тщательную нивелировку теодолита. Высота полюса над горизонтом h равна

широте места наблюдения φ . Зная приближенно широту места, находим зенитное расстояние полюса: $z = 90^\circ - \varphi$. Достаточно зрительную трубу теодолита установить по вертикальному кругу на этот угол, чтобы найти Полярную звезду в северном направлении. С изменением часового угла азимут Полярной звезды меняется достаточно медленно и в самом неблагоприятном случае допустима неточность фиксации времени до 10 секунд. Проблемы с наведением на звезду могут возникнуть в холодное время года, когда выходящий через трубу монтировки теплый воздух помещения создает сильный турбулентный поток, приводящий к хаотическим перемещениям изображения звезды в зрительной трубе.

Если после поворота зрительной трубы при наведении на Полярную звезду или на Солнце смещается пузырек уровня горизонтального круга, то необходимо вводить поправку за наклонность горизонтальной оси трубы теодолита:

$$b = \alpha \cdot (n_1 + n_2) / 2$$

где α – цена деления уровня, n_1, n_2 – отсчеты середины воздушного пузырька уровня.

Обработку астрономических наблюдений удобно производить в электронной таблице. Пример одного наблюдения приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Азимут мира. Магнитная обсерватория «Иркутск» (п. Патроны)								
Широта $\varphi = 52^\circ 10' = 52,16667^\circ$		Долгота $\lambda = 104^\circ 27' = 104,45^\circ \rightarrow 6.96333^h$						
Наблюдатель Нечаев		Дата 29.09.00		Мира N1 Столб N6		Теодолит 2T2		
Данные астрономического ежегодника:								
Звездное время в 0^h UT $S_0 = 00:32:14 = 0.53722^h$								
Восхождение Полярной звезды (U Mi) $\alpha = 02:33:51 = 2.56417^h$								
Азимутальный угол Полярной (U Mi) $\delta = 89^\circ 15' 46''.2 = 89.26283^\circ$								
UT	Положение	Град.	мин.	сек.	В град.	Час. угол t	A_s	θ_{gm}
	Мира R	0	1	4	0.01778			
	Мира L	180	0	36	0.01			
18:53	U mi L	184	6	50	4.11389	23.87142	0.04111	4.07276
18:55	U mi L	184	5	56	4.09889	23.90485	0.03044	4.06845
19:01	U mi R	4	7	9	4.11917	24.00512	-0.00164	4.12081
19:04	U mi R	4	6	10	4.10278	24.05526	-0.01768	4.12046
19:10	U mi R	4	4	10	4.06944	24.15553	-0.04975	4.11919
19:13	U mi R	4	3	53	4.06472	24.20567	-0.06577	4.13049
19:16	U mi L	183	59	16	3.98778	24.25581	-0.08178	4.06956
19:19	U mi L	183	58	5	3.96806	24.30594	-0.09778	4.06584
	Мира L	180	0	10	0.00278			
	Мира R	0	0	51	0.01417			
Средние значения:					$\theta_M = 0.01118$	$\theta_{gm} = 4.095944$		
Азимут мира					$A = -4^\circ.08476 = -4^\circ 5' 5''$			

При наблюдениях Солнца наводки теодолита через съемный окулярный светофильтр осуществляют попеременно по левому и правому краям светила с отсчетами времени с точностью до секунды. Расчеты производят по приведенным формулам, применяя Астрономический ежегодник для определения параметров положения Солнца.

4. АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Абсолютные измерения геомагнитного поля необходимы для определения вековых вариаций элементов геомагнитного поля и контроля параметров вариационных станций обсерватории. Абсолютные приборы и методы измерения геомагнитного поля за два века наблюдений менялись и совершенствовались. Пройден большой путь от компаса и метода Гаусса счета качаний магнита до электронных способов измерения геомагнитного поля.

В настоящее время на большинстве магнитных обсерваторий применяются протонные магнитометры, феррозондовые деклинометры/инклинометры и устаревшие кварцевые магнитометры QNM. Значительно реже применяются квантовые магнитометры, а некоторые обсерватории сохраняют в рабочем состоянии старые магнитные теодолиты. Ниже будет рассмотрен принцип действия наиболее распространенных магнитометров, источники возможных ошибок и методы обсерваторских наблюдений.

4.1. Протонный прецессионный магнитометр

Начиная с 60-х годов прошлого века, протонный магнитометр занял ведущее место в приборном парке магнитных обсерваторий. Само явление прецессии ядер атомов вокруг силовых линий внешнего магнитного поля было обнаружено в 1937 г. Лазаревым и Шубниковым и впервые применено для измерения слабых магнитных полей в 1946 г. Паккардом и Варианом. Новый метод измерения модуля вектора геомагнитного поля привлек особое внимание магнитологов в связи с высокой точностью и стабильностью параметров протонных магнитометров. Кроме того, процесс измерения необычайно прост и сводится к измерению частоты сигнала датчика.

В СССР первый протонный магнитометр для магнитных обсерваторий был создан в 1957 г. инженерной группой В.И. Наливайко (ИЗМИРАН). Заводом «Физприбор» была выпущена партия магнитометров ПМ-1, которые обеспечили привязку к единому уровню магнитные наблюдения сети обсерваторий СССР. Этот прибор с усилителем на радиолампах записывал сигнал прецессии на киноплёнку шлейфного осциллографа. Результаты наблюдений можно было получить только после проявления пленки и ручного подсчета числа биений сигнала датчика и сигнала кварцевого генератора магнитометра.

С 1967 г. завод «Геологоразведка» для поиска полезных ископаемых освоил серийный выпуск портативных ядерно-прецессионных магнитометров ПМ-5 и М-20 с электронным счетом частоты прецессии. Новые приборы по точности в 1–2 нТл вполне удовлетворяли требованиям магнитных обсерваторий и поэтому получили самое широкое распространение в практике стационарных наблюдений нашей страны.

4.1.1. Принцип действия протонного магнитометра

В основе принципа измерений магнитного поля методом свободной ядерной прецессии лежит возбуждение синфазного сигнала прецессии в катушке датчика с протонсодержащей жидкостью после воздействия на нее сильного магнитного поля. Частота прецессии протонов определяется равенством Лармона:

$$\omega = \gamma F, \quad (4.1)$$

где: γ_p – гиромагнитное отношение протонов (отношение магнитного момента протона μ_p к его механическому моменту P_p), F – модуль индукции геомагнитного поля.

Сначала в практике магнитных измерений принималось значение гиромагнитного отношения протонов $\gamma_p = 2,67513 \cdot 10^8$ 1/Тл·с. С 1992 г. IAGA рекомендовал применять уточненное значение постоянной $\gamma_p = 2,6751525 \cdot 10^8 \pm 40$ 1/Тл·с. Следовательно, немного изменился коэффициент преобразования G протонных магнитометров, значение которого сейчас принимается равным 23,48720 нТл/Гц вместо прежних 23,4874 нТл/Гц. (Эту поправку следует учитывать при точных наблюдениях на протонных магнитометрах, выпущенных ранее 1992 г.).

Как следует из формулы (4.1), погрешность измерений модуля вектора магнитного поля методом ядерной прецессии обеспечена точностью определения постоянной γ и составляет около 0,2 нТл. Реальная систематическая погрешность может оказаться большей из-за влияния ферромагнитных примесей в деталях датчика или из-за нестабильности элементов электронных узлов, измеряющих частоту сигнала прецессии.

Обычно датчик (первичный измерительный преобразователь) свободной ядерной прецессии представляет собой сосуд емкостью 200–500 мл с протонсодержащей жидкостью (вода, спирт, керосин) и цилиндрическую катушку с числом витков около 1000. Катушка выполняет две функции, — создания сильного кратковременного магнитного поля (около 1–3 мТл) в объеме сосуда и последующего приема слабого сигнала прецессии протонов жидкости. Для снижения воздействия внешней электромагнитной помехи в конструкцию датчика вводят незамкнутый экран и дополнительную обмотку, подключенную встречно к измерительной катушке.

Сначала в катушку датчика, ориентированного поперек вектора геомагнитного поля, подается постоянный ток поляризации амплитудой 0,5–1 А длительностью около 2 с. За это время происходит переориентация магнитных моментов протонов жидкости по направлению вектора поляризуемого магнитного поля. После отключения тока поляризации векторы магнитного момента протонов начинают синхронно прецессировать вокруг силовых линий ГМП, наводя в обмотке катушки ЭДС, частота которой зависит от величины индукции этого поля. С задержкой на время переходного процесса (около 0,2 с) катушка подключается к усилителю с узкой полосой пропускания для выделения синусоидального сигнала амплитудой 5–10 мкВ, который в течение 2–3 сек. затухает из-за потери синфазности прецессии ядерных магнитных моментов. Амплитуда сигнала и время его затухания зависят не только от конструкции датчика, но и от величины градиентов магнитного поля в объеме датчика, направленности магнитной оси катушки поляризации по отношению к вектору ГМП, а также от уровня внешних электромагнитных помех.

Если градиенты геомагнитного поля превышают 4–5 нТл/см, то сигнал прецессии будет искажен гармониками и станет настолько быстро затухающим, что магнитометр окажется неработоспособным. Этот факт часто не учитывают при попытках произвести измерения протонным магнитометром в обычном здании или вблизи от ферромагнитных масс.

Длительность и амплитуда сигнала прецессии может также существенно уменьшиться из-за ухудшения добротности катушки при размещении датчика в непосредственной близости от электропроводящих изделий (например, датчик не рекомендуется ставить на подставку из медных или

алюминиевых сплавов). Кроме того, следует помнить, что внутри датчика находится жидкость, подтекание которой в катушку приводит к постепенному уменьшению амплитуды и длительности сигнала прецессии.

Для измерения частоты прецессии применяется метод дискретного частотомера, обеспечивающий прямой отсчет измеряемого магнитного поля в единицах индукции. Реализуется этот метод путем создания «ворот» определенной длительности для прохождения импульсов сигнала прецессии на счетчик. Время действия «открытых ворот» для сигнала прецессии определяется по формуле: $\tau = G/K$, где K – коэффициент умножения сигнала прецессии. Такой метод преобразования сигнала прецессии достаточно просто реализуется, но при этом возникает возможность генерации ложного сигнала в схеме умножителя от любой помехи на его входе. Сбойные отсчеты не редкость в протонных магнитометрах и они обычно отбрасываются наблюдателем. В современных магнитометрах обычно измеряется длительность каждого периода сигнала прецессии, а функцию отбраковки сбоев выполняет встроенный микропроцессор.

Для повышения эффекта прецессии ядерных магнитных моментов уже давно применяется динамическая поляризация ядер высокочастотным полем (известный в физике эффект Оверхаузера). Объем датчика в этом случае можно значительно уменьшить и поэтому он требует меньшей энергии для создания поля поляризации, допускает увеличенные градиенты измеряемого геомагнитного поля и менее чувствителен к радиопомехам. В такой датчик встраивается обмотка резонансного ВЧ-возбуждения, а сосуд заполняется раствором свободного радикала для дипольного взаимодействия между спином протонов растворителя и спином свободных электронов радикала. В качестве рабочего вещества сначала использовался водный раствор нитрозодисульфата калия (соль Ферми), но срок жизни этого раствора составлял менее часа. Добавление в раствор стабилизатора позволяет сохранять раствор несколько месяцев. Сейчас для протонных магнитометров созданы новые вещества из группы аминоксидов, рабочий срок которых увеличен до нескольких лет. Для каждого рабочего вещества требуется своя резонансная радиочастота в диапазоне от 65 до 80 МГц. Замена типа наполнителя в датчике требует соответствующей перестройки частоты и амплитуды ВЧ-сигнала возбуждения.

Датчики с динамической поляризацией обеспечивают сигнал прецессии в десятки раз большей амплитуды, что обеспечивает достаточно высокое отношение «сигнал/шум», меньшую зависимость от градиентов геомагнитного поля и поэтому имеют повышенную точность измерений. Но такие магнитометры пока имеют существенный для обсерватории недостаток в ограниченном сроке службы рабочего вещества датчика, состав которого обычно является секретом производителя. Более сложная схема прибора затрудняет ремонт и настройку магнитометра в обсерваторских условиях.

Современные протонные магнитометры (напр., типа SM90R или POS-1) обладают сравнительно высоким быстродействием (до 20 измерений в минуту), а микропроцессор обеспечивает цифровую фильтрацию и предварительную обработку сигнала прецессии, хранит в памяти результаты измерений, обеспечивает удаленную связь с персональным компьютером или с другими устройствами автоматики. Такие модели протонных магнитометров обладают разрешающей способностью до 0,01 нТл, что позволяет применять их в качестве однокомпонентных вариационных станций с

регистрацией цифровой информации при скважности измерений в несколько секунд.

Протонный магнитометр, как и любой измерительный прибор, нуждается в периодической сверке его показаний с образцовым магнитометром или поверке с помощью образцового кварцевого генератора низкой частоты. Если поверка магнитометра выявит постоянную инструментальную ошибку, то ее нужно вводить в результаты наблюдений или устранить путем подстройки частоты задающего генератора блока электроники.

4.1.2. Методика измерений модуля F геомагнитного поля

Измерения модуля F геомагнитного поля с помощью протонного магнитометра не требует квалификации наблюдателя и выполняется в течение одной минуты.

- Установите датчик протонного магнитометра на немагнитной подставке так, чтобы ось катушки датчика была примерно под прямым углом к вектору F .
- Проверьте отсутствие магнитных изделий вблизи датчика или у наблюдателя.
- Зафиксируйте время начала измерений.
- Произведите 5–10 отсчетов магнитометра в ручном или автоматическом режиме.
- Повторно запишите время окончания наблюдения.

Разброс показаний магнитометра более 1 нТл в измерительном цикле может быть связан с магнитной бурей или с воздействием на датчик дестабилизирующих факторов, перечисленных в разделе 4.1.1.

При обработке наблюдения на момент измерений берутся расчетные данные F цифровых магнитовариационных станций и ординаты вариаций F -датчиков с магнитограмм аналоговых станций. Вычисляют разность ΔF для цифровых станций с целью контроля правильности принятых базисных уровней элементов H_0 , Z_0 (X_0 , Y_0 , Z_0) и определяют базисные значения F_0 для аналоговых станций. Все вычисления можно производить с помощью специализированной программы обработки абсолютных наблюдений или в электронных таблицах. Обработка с помощью электронных таблиц удобна тем, что позволяет в случае нестабильных результатов наблюдений возвращаться к прошедшим измерениям и проводить пошаговый анализ с целью выяснения возможных причин некачественных данных, которые могут быть связаны с отклонением параметров магнитометров, изменением магнитной обстановки в павильоне, с ошибками наблюдателя.

Ниже приведен пример оформления наблюдения на протонном магнитометре в виде электронной таблицы.

В бланке электронной таблицы подготовлены необходимые для заполнения наблюдателем разделы, введены постоянные приборов и расчетные формулы. На Иркутской магнитной обсерватории электронными таблицами QPRO обрабатываются две цифровые магнитовариационные станции («Кварц» и «НВС») и контрольная аналоговая станция «А» с фотозаписью, имеющая в своем комплекте F -вариометр. Наблюдатель заполняет бланк информацией наблюдателя и данными вариаций (выделено курсивом), получая расчетные значения базисных уровней вариометров (выделено жирным шрифтом).

Таблица 4.1

ММП-201 N 501013 Столб N 4		Поправки ΔF нТл, на прибор: 0 на столб: -2						
Дата 7.02.03		Время 00:19 00:20						
		Наблюдатель <i>Вертипрахова</i>						
N 60000+	Постоянные вариометра F_A : ε_F (нТл/мм) = 1.8 $\mu(t)_F$ (нТл/°C) = 0							
1 313	Данные вариометров: F_{kv} (10 нТл) F_{nvs} (10 нТл) F_A (мм) t °C							
2 313	603114	603108	20.3 16.3					
3 314								
4 313								
5 312								
Итог:	Дата	День	Время	Поле	ΔF_{kv}	ΔF_{nvs}	F_{0A}	Прибор
	7.02.03	38	00:20	60311.0	-0.4	0.2	60274.4	501013
Макрос закрытия файла.								

После запуска макроса закрытия файла итоговая строка копируется в файлы квартальных и годовых абсолютных наблюдений, а исходный файл данного наблюдения сохраняется под именем даты наблюдения.

4.2. Векторные измерения протонным магнитометром

4.2.1. Колечная установка

Протонный магнитометр может выполнять функцию компонентного магнитометра, если его датчик поместить в компенсатор горизонтальной или вертикальной компоненты геомагнитного поля (метод Нельсона). В качестве такого компенсатора обычно применяется колечная установка (КУ), состоящая из колечной системы Гельмгольца или Браунбека, горизонтального теодолитного круга с уровнем и источника стабильного тока. КУ предназначена для создания равномерного магнитного поля в объеме датчика протонного магнитометра. Для датчиков размером $\varnothing 50 \times 80$ мм, следует применять кольца Гельмгольца диаметром не менее 800 мм, или кольца Браунбека диаметром 400 мм. Для нивелировки и установки магнитной оси колец по магнитному меридиану служит горизонтальный теодолитный круг с чувствительным уровнем. Стабилизатор тока необходим для создания в центре колец дополнительного знакопеременного магнитного поля индукцией до 50000 нТл. При компонентных измерениях методом Нельсона компенсации подвергается меньшая компонента геомагнитного поля, а большая измеряется. Поэтому, в зависимости от широты расположения магнитной обсерватории колечная система устанавливается на поворотном круге в горизонтальном, либо вертикальном положении.

Колечная установка Иркутской магнитной обсерватории (рис. 4.1) изготовлена на основе колец Браунбека диаметром 380 мм с постоянной $C = 1800$ нТл/мА и большого круга от старинного теодолита с ценой деления 20 угловых секунд. Магнитная ось системы колец расположена горизонтально и с помощью юстировочных крепежных элементов может настраиваться строго перпендикулярно к вертикальной оси вращения теодолитного круга. На теодолитном круге дополнительно закреплены два поворотных ограничителя для фиксации положения магнитной оси колец по направлению магнитного меридиана на «Север» или на «Юг». Уровень с ценой деления 6 угловых секунд закреплен на опорной стойке параллельно магнитной оси колец.

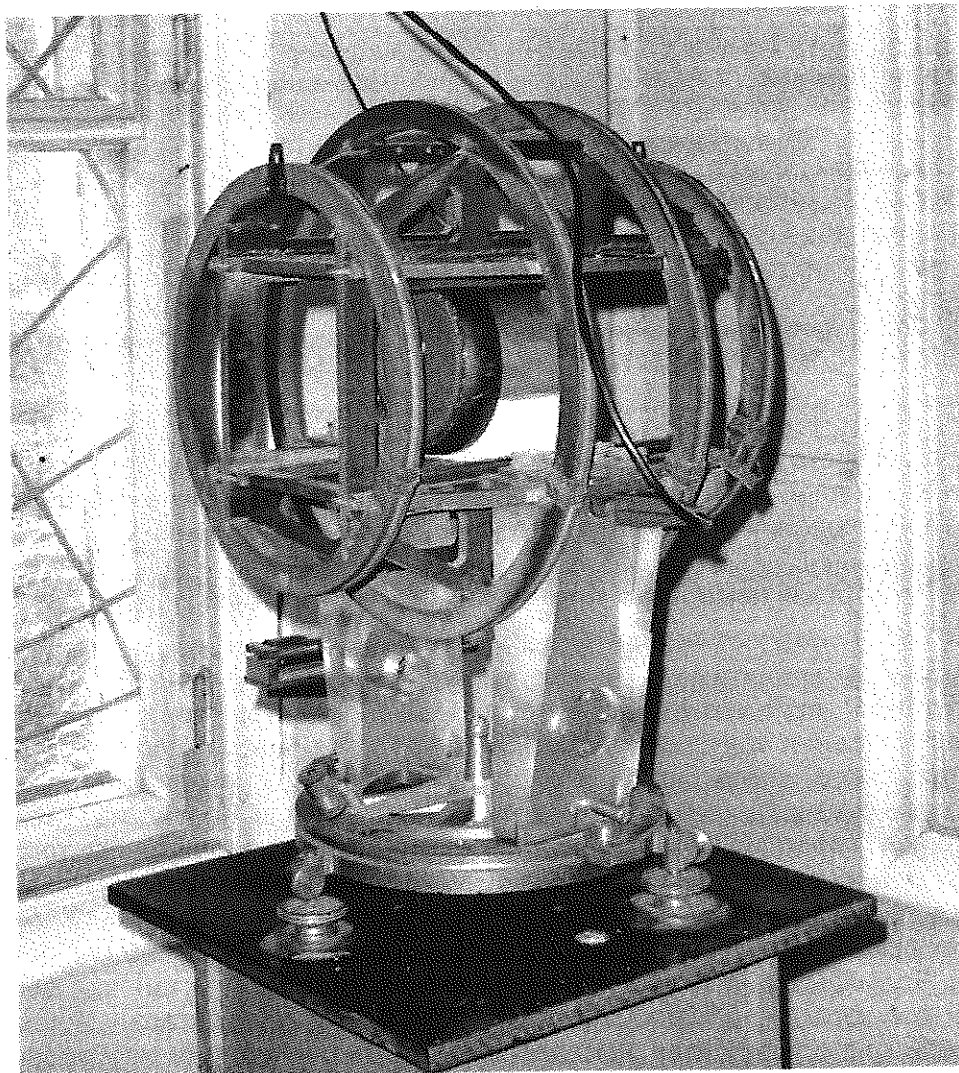


Рис. 4.1. Коле́чная установка с магнитометром ММП-203 (фото С. Хомутова).

Источник стабильного тока коле́чной системы имеет следующие элементы управления:

- переключатель нагрузки тока стабилизатора « $R_k \leftrightarrow KУ$ », где R_k – эквивалент активного сопротивления обмоток коле́чной системы ($R_k = R_{kУ}$);
- переключатель полярности тока в кольцах « $+ \leftrightarrow -$ »;
- переключатель величины тока « $I \leftrightarrow 2I$ мА»;
- ручка (с ограниченным доступом) для регулировки величины тока коле́ц, (используется только при настройке коле́чной установки);
- индикатор подключения электрической цепи коле́чной системы;
- клеммы для подключения цифрового миллиамперметра при настройке КУ.

В немагнитном исполнении этот источник тока можно располагать в непосредственной близости от коле́чной установки, что улучшает выходные параметры стабилизатора тока и повышает производительность наблюдателя.

4.2.2. Погрешности компонентных измерений методом компенсации

При компонентных измерениях геомагнитного поля к инструментальной погрешности протонного магнитометра (ПМ) добавляются погрешности коле́чной установки, которые вызваны следующими причинами:

- неточной компенсацией горизонтальной компоненты геомагнитного поля,
- отклонением магнитной оси коле́чной системы от магнитного меридиана,
- отклонением магнитной оси коле́чной системы от горизонтали.

Неточная компенсация горизонтальной компоненты H всегда приводит к завышенным показаниям протонного магнитометра (рис. 4.2):

$$F_x = (Z^2 + \Delta H_c^2)^{1/2}$$

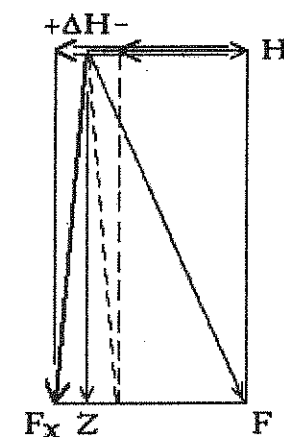


Рис. 4.2. Векторная диаграмма при неточной компенсации H в коле́чной установке (КУ).

Допустимую при наблюдениях неточность компенсации ΔH_c можно определить, исходя из инструментальной погрешности применяемого протонного магнитометра ΔZ по формуле:

$$\Delta H_c \approx (2Z \cdot \Delta Z)^{1/2}$$

Если погрешность протонного магнитометра составляет 1 нТл, то для Иркутска при $Z=57200$ нТл допускается ошибка компенсации $\Delta H_c \leq 340$ нТл. Для магнитометра с погрешностью измерений 0,1 нТл требования к точности компенсации несколько повышаются: $\Delta H_c < 110$ нТл.

Отсюда можно оценить необходимые параметры источника тока компенсации и средств его измерения (в Иркутске $H=19000$ нТл):

$$\Delta III = \Delta H_c / H = 110 / 19000 = 0,006 = 0,6\%$$

Современные стабилизаторы тока и цифровые миллиамперметры легко обеспечивают необходимые требования к точности и стабильности тока компенсации горизонтальной компоненты H геомагнитного поля в коле́чной установке.

Оценим допустимую неточность совмещения магнитной оси коле́чной системы с направлением магнитного меридиана (рис. 4.3).

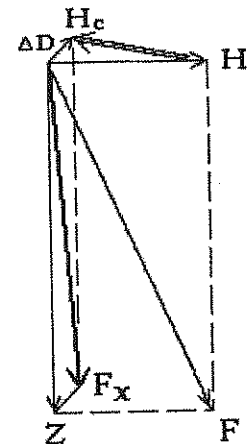


Рис. 4.3. Векторная диаграмма при отклонении магнитной оси КУ от магнитного меридиана.

При отклонении магнитной оси от магнитного меридиана на угол β магнитометр произведет измерение вектора F_x :

$$F_x = (Z^2 + \Delta D^2)^{1/2} = (Z^2 + H_c^2 \cdot \sin^2 \beta)^{1/2}.$$

Из этого выражения можно определить величину ошибки ΔZ_β в зависимости от угла β :

$$\Delta Z_\beta = (H^2/2Z) \cdot \sin^2 \beta.$$

В иркутском магнитном поле ($H=19000$ нТл, $Z=57200$ нТл) допуск угла β не должен превышать $0,3^\circ$ ($20'$). Следовательно, юстировка колечной системы по магнитному меридиану не представляет проблем, а лимб горизонтального круга может иметь цену деления $10'$.

Можно считать, что после настройки КУ при измерениях в магнитоспокойные дни фактически полностью исключается вероятность появления заметных погрешностей из-за влияния первых двух причин.

Отклонение магнитной оси колечной системы от горизонтальной плоскости на угол α может внести существенную ошибку в компонентные измерения (рис. 4.4). В этом случае магнитометр произведет измерение вектора F_x :

$$F_x = Z \pm \Delta Z_\alpha = Z \pm H_c \sin \alpha.$$

Из этой формулы можно определить допустимые ошибки в нивелировке колечной системы (предполагая, что произведена настройка $H_c \cong -H$):

$$\alpha = \arcsin(\Delta Z_\alpha/H) \approx \Delta Z_\alpha/H.$$

Если производить измерения протонным магнитометром с погрешностью 1 нТл, то угол α для Иркутска не должен превышать $11''$. При проведении наблюдений с погрешностью $0,1$ нТл угол $\alpha \leq 1''$.

Требуемая точность нивелировки колечной системы представляет очень серьезную проблему. Неточность нивелировки устраняется поворотом колечной системы на 180° и усреднением результатов двух измерений, т.к. ошибка этих измерений входит в показания магнитометра с противоположными знаками. Но для выполнения этого условия теодолитный круг не должен иметь люфтов в подвижных соединениях, а система колец должна быть изготовлена в виде жесткой конструкции, стабильной к внеш-

ним воздействием, и иметь достаточно точный уровень или наклономер с ценой деления в единицы угловых секунд.

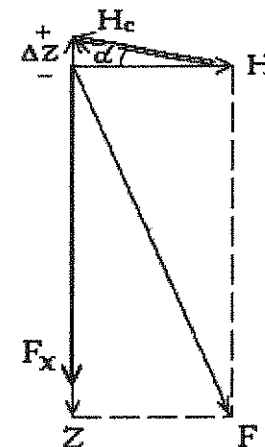


Рис. 4.4. Векторная диаграмма при неточной нивелировке КУ.

Таким образом, основной вклад в разброс наблюдений на колечной установке методом компенсации может вносить нестабильность сохранения нивелировки магнитной оси колец после поворотов колечной системы.

Совокупность перечисленных факторов, воздействующих на показания протонного магнитометра в КУ можно выразить единой формулой:

$$F_x = [(Z + H_c \sin \alpha)^2 + (H - H_c \cos \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (H_c \sin \beta \cdot \cos \alpha)^2]^{1/2} \quad (4.2)$$

Данная формула является теоретическим обоснованием методов настройки колечной установки с помощью показаний протонного магнитометра.

После поворота колечной системы на 180° углы $\alpha = \alpha_N = -\alpha_S$ и $\beta = \beta_N = -\beta_S$, а поле компенсации $H_c = H_N = -H_S$. Тогда ошибка в измерении Z составит:

$$\Delta Z \approx 0,5 \cdot [\Delta H^2/Z + (H^2/Z) \cdot (\alpha^2 + \beta^2)]$$

Оценку ожидаемой среднеквадратичной погрешности σ_Z измерений вертикальной компоненты Z методом компенсации на конкретной обсерватории можно определить по формуле:

$$\sigma_Z = (\Delta F^2 + \Delta Z_\alpha^2 + \Delta Z_\beta^2 + \Delta Z_{\Delta H}^2)^{1/2},$$

где ΔF – инструментальная погрешность протонного магнитометра, ΔZ_α – дополнительные погрешности из-за воздействия рассмотренных факторов.

Во время магнитных возмущений трудно измерить Z с погрешностью менее 1 нТл, т.к. вариация dH геомагнитного поля может значительно превышать допустимую неточность компенсации ΔH_c , а вариация dD – допустимое отклонение β магнитной оси колечной системы от магнитного меридиана. Как правило, в периоды возмущенного геомагнитного поля проводить абсолютные наблюдения не рекомендуется из-за высокой вероятности получения ошибочных результатов.

Горизонтальная компонента H вычисляется на основе измерения поля F и компоненты Z в колечной установке по известной формуле:

$$H^2 = F^2 - Z^2 \quad (4.3)$$

В связи с тем, что в средних широтах H в 2-3 раза меньше F и Z , абсолютная погрешность расчета H может значительно превысить погрешности отдельных измерений полного вектора F и его вертикальной компоненты Z , что можно увидеть после дифференцирования формулы (4.3):

$$\Delta H = |(F/H) \cdot \Delta F| + |(Z/H) \cdot \Delta Z|.$$

Если погрешность измерений ΔF и ΔZ составляет ± 1 нТл, то в Иркутском поле максимальная ошибка при расчете H может достигнуть ± 6 нТл, что заведомо хуже обсерваторских требований. Более точный протонный магнитометр с разрешающей способностью 0,1 нТл позволит определять горизонтальную компоненту H с погрешностью менее 1 нТл. Так как эта погрешность имеет случайный характер, то ее можно уменьшить статистикой достаточно большого числа наблюдений.

4.2.3. Подготовка колечной установки к наблюдениям

Для колечной установки желательно иметь в абсолютном павильоне достаточно устойчивый немагнитный постамент, на котором по буссоли проводится линия магнитного меридиана. Горизонтальный круг КУ размещается таким образом, чтобы центр его и один из нивелировочных винтов находились на линии меридиана. Этот винт будет основным элементом точной нивелировки магнитной оси колечной системы в плоскости магнитного меридиана. К обмоткам колец подключается регулируемый источник стабильного тока с переключателем полярности тока в цепи, а в центре колечной системы устанавливается датчик протонного магнитометра.

Для настройки колечной установки произведите следующие операции:

- Включите источник тока компенсации и протонный магнитометр на прогрев.

- Проверьте по уровню нивелировку колечной системы.

- Подайте ток в обмотку колечной системы.

• Определите место магнитного меридиана на круге методом отклонений колечной системы в горизонтальной плоскости, используя одинаковые показания протонного магнитометра в разных положениях колец по отношению к магнитному меридиану, т.к. измеряемый вектор из формулы (4.2): $F_{\beta} = [F^2 + H_c \cdot (H_c + 2H \cdot \cos \beta)]^{1/2}$ зависит от величины угла β между магнитной осью колец и направлением магнитного меридиана на круге.

- Зафиксируйте специальными ограничителями вращения колечной системы положения магнитной оси колечной системы на север (N) и юг (S).

• Потенциометром источника двойного тока компенсации «2I_c» добейтесь показаний протонного магнитометра $F_x = F$. Переключите тумблер источника тока в положение «I_c» для компенсации горизонтальной компоненты поля H при измерениях Z .

- Проверьте нивелировку магнитной оси колечной системы пробными измерениями вертикальной компоненты Z в двух направлениях оси N и S. С помощью юстировочных винтов наклона магнитной оси колец добейтесь одинаковых показаний магнитометра в пределах единиц нТл при поворотах колечной системы на 180°.

Настройка колечной установки является ответственным этапом при проведении компонентных измерений протонным магнитометром и выполняется опытным наблюдателем. При стабильном приборном постаменте повторную юстировку можно производить ежеквартально, а в пе-

риоды промерзания/размерзания почвы, когда возможны подвижки постаментов, настройку КУ рекомендуется производить ежемесячно.

4.2.4. Методика проведения наблюдений методом компенсации

Измерения в колечной установке методом компенсации проводите в следующей последовательности:

- Включите источник питания тока компенсации и протонный магнитометр для прогрева электронных узлов.
- Произведите стандартную процедуру нивелировки колечной установки по уровню.
- Установите колечную систему по магнитному меридиану, используя ограничители поворота на горизонтальном круге.
- Запишите время начала наблюдений.
- Произведите измерение F_1 .
- Включите ток компенсации нужной полярности в кольца (проверка по ожидаемым показаниям величины вертикальной компоненты геомагнитного поля).
- Произведите измерение Z_N .
- Разверните колечную систему на 180° до упора в ограничитель поворота.
- Смените направление тока в кольцах.
- Произведите измерение Z_S .
- Отключите ток поляризации в цепи колечной системы.
- Произведите повторное измерение F_2 .
- Запишите время окончания цикла измерений.

Все данные наблюдений внесите в бланк электронной таблицы:

Таблица 4.2

Колечная установка N 1 ММП-201 N501013							Поправка ΔF на прибор -1		
							Поправки на столб: $\Delta F=0$ $\Delta H=0$ $\Delta Z=0$		
Дата	7.02.2003						Вариометры t°C 16.3		
Время	00:09		00:10		00:11		00:12		
	$F_1=60000+$		$Z_N=57000+$		$Z_S=57000+$		$F_2=60000+$		
1	314		247		242		314		
2	315		246		241		314		
3	314		246		243		314		
4	315		247		242		314		
5	315		247		243		313		
Вычисления (нТл):							$F=60314.3$	$H=18997.3$	$Z=57244.3$
Цена делений вариометров							ε нТл/мм: $F_A 1.8$	$H_A 3.0$	$Z_A 3.0$
Температурный коэффициент $\mu(t)$ нТл/°C:							$F_A 0$	$H_A 0.18$	$Z_A 0$
Время	F_{kv}	Z_{kv}	H_{kv}	F_{nvs}	Z_{nvs}	H_{nvs}	F_A мм	Z_A мм	H_A мм
00:09	603141		3.5	603135		11.3	22.2		18.4
00:10		-0.4	3.1		20.6	10.9		39.0	18.4
00:11		-0.5	3.3		20.4	11.0		39.0	18.4
00:12	603140		3.9	603134		11.6	22.0		18.4
Итого:	Дата	Поле		K_v	NVS		A		
H_0	07.02.03	18997.3		18993.9	18986.1		18940.1		
Z_0	07.02.03	57244.3		57244.8	57223.8		57150.7		
$F_0, \Delta F$	07.02.03	60314.3		0.2	0.8		60274.5		
							Прибор		
							КУ-1		
							КУ-1		
							КУ-1		

Макрос закрытия файла

Значения вариаций H и Z цифровых станций вводятся в таблицу без их базисных уровней, а значения вариаций с магнитограмм (ординаты) записываются в мм. Можно традиционный способ определения базисных значений вариометров заменить вариантом определения поправок ранее принятых базисных уровней по разностям значений абсолютных наблюдений с окончательными данными вариационных станций.

4.2.5. Погрешности измерений методом дополнительного поля

Другим способом компонентных измерений геомагнитного поля протонным магнитометром с колечной установкой является метод дополнительного поля (метод Серсона). Вектор дополнительного поля H_c колечной системы совмещается с вектором меньшей компоненты геомагнитного поля. Переключателем полярности тока в кольцах суммарный горизонтальный вектор принимает два значения: $H_N = H_c + H$ и $H_S = H_c - H$.

Протонный магнитометр произведет измерения двух векторов F_N и F_S , которые можно представить в виде системы трех уравнений (с учетом измерения вектора F):

$$F_N^2 = Z^2 + (H_c + H)^2 \quad (4.4)$$

$$F_S^2 = Z^2 + (H_c - H)^2 \quad (4.5)$$

$$F^2 = Z^2 + H^2 \quad (4.6)$$

Совместно решая уравнения (4.4), (4.5) и (4.6), можно определить величину дополнительного поля, созданного протеканием тока в обмотках колечной системы:

$$H_c = [0.5 \cdot (F_N^2 + F_S^2) - F^2]^{1/2}$$

и вычислить горизонтальную компоненту геомагнитного поля H :

$$H = 0.25 \cdot (F_N^2 - F_S^2) / H_c = 0.25 \cdot (F_N^2 - F_S^2) / [0.5 \cdot (F_N^2 + F_S^2) - F^2]^{1/2} \quad (4.7)$$

(При $H_c = -H$ мы вернемся к рассмотренному методу Нельсона компенсации H).

Анализ формулы (4.7) показывает, что погрешность наблюдений методом дополнительного поля минимальна при $H_c \approx (2-4) \cdot H$.

Как и в методе компенсации метод дополнительного поля имеет дополнительные погрешности измерений из-за влияния следующих факторов:

- нестабильности тока в цепи колечной системы,
- несовпадения магнитной оси колечной системы с магнитным меридианом,
- погрешности нивелировки магнитной оси колечной системы.

При выводе формулы (4.7) предполагалось, что в течение цикла измерений дополнительное поле остается неизменным ($H_c = -H_c$). Это поле создается в колечной системе с постоянной C от источника тока $C \cdot I = H_c$. Из формул измерения F_N и F_S (4.4) и (4.5) можно определить допустимую нестабильность дополнительного поля:

$$\Delta H_c = [F_N / (H_c + H)] \cdot \Delta F_N$$

Отсюда определяем необходимые требования к источнику тока колец:

$$\Delta I = [F_N / (H_c + H)] \cdot \Delta F_N / C \quad (4.8)$$

Измерения в колечной установке Иркутской МО имеют следующие исходные параметры: $C = 1727$ нТл/мА, $H_c \approx 38000$ нТл, $F_N \approx 80700$ нТл, $F_S \approx 60300$ нТл при инструментальной погрешности протонного магнитометра 1 нТл. Из формулы (4.8), нестабильность тока колец должна быть в пределах $\Delta I \leq 0,0008$ мА, а стабилизатор тока должен иметь класс 0,0001

(0,001%). Такие источники тока относятся к прецизионным устройствам. Однако, учитывая короткое время, необходимое для проведения цикла измерений (около 5 минут), можно более чем на порядок снизить эти требования к источнику тока.

Произведем оценку допустимого угла отклонения β магнитной оси колечной системы от магнитного меридиана в горизонтальной плоскости (рис. 4.5). Измерения F , F_N и F_S дадут расчетную величину H_x , которая будет отличаться от горизонтальной компоненты H геомагнитного поля:

$$H_x = H / \cos \beta.$$

Отсюда, допустимый угол отклонения магнитной оси колец от магнитного меридиана:

$$\beta \leq \arccos [1 / (1 \pm \Delta H / H)].$$

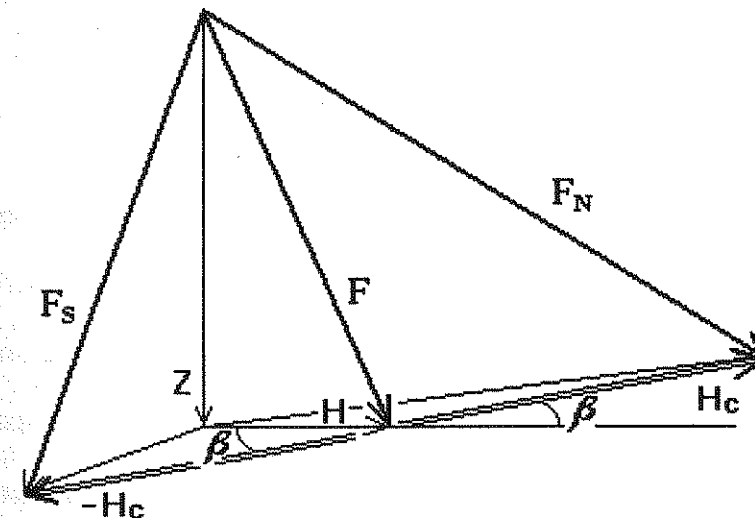


Рис. 4.5. К оценке погрешности при отклонении магнитной оси КУ от магнитного меридиана при измерениях методом дополнительного поля.

В Иркутске при погрешности измерений 1 нТл отклонение магнитной оси колечной системы не должно превышать 35', а при погрешности 0,1 нТл – не более 11'. Требования к юстировке магнитной оси колечной системы по магнитному меридиану хоть и стали примерно в два раза выше по сравнению с методом компенсации, но остались в доступных пределах для настройки КУ.

Из-за неточной нивелировки магнитная ось колечной системы составит угол α к горизонту и в результате измерения H войдет ошибка ΔH_α :

$$\Delta H_\alpha = Z \cdot \sin \alpha + H \cdot (\cos \alpha - 1) \approx Z \cdot \sin \alpha.$$

Отсюда можно оценить требования к нивелировке:

$$\alpha = \arcsin(\Delta H / Z) \approx \Delta H / Z.$$

Для Иркутского поля при точности измерений 1 нТл допускается угол $\alpha < 4''$, а при точности измерений 0,1 нТл – угол $\alpha < 0,4''$. Осуществить на практике нивелировку с такой точностью невозможно, но дополнительные измерения после поворота колечной системы на 180° компенсируют эту ошибку.

Можно оценить итоговую среднеквадратичную погрешность рассмотренного метода компонентных измерений геомагнитного поля. Из формулы (4.7) определяем полный дифференциал:

$$dH = [(H_c - H)/2H^2] \cdot F_N \cdot dF_N - [(H_c + H)/2H^2] \cdot F_S \cdot dF_S + (H/H_c) \cdot F \cdot dF$$

Отсюда с учетом рассмотренных дополнительных погрешностей оцениваем среднеквадратичную погрешность σH определения горизонтальной компоненты:

$$\sigma H = \{ \{ [(H_c - H)/2H^2] \cdot F_N \cdot \Delta F_N \}^2 + \{ [(H_c + H)/2H^2] \cdot F_S \cdot \Delta F_S \}^2 + [(H/H_c) \cdot F \cdot \Delta F]^2 + \Delta H_\alpha^2 + \Delta H_\beta^2 + \Delta H_\gamma^2 \}^{1/2}$$

Для Иркутской обсерватории среднеквадратичная погрешность измерений горизонтальной компоненты H методом дополнительного поля $\sigma H \approx 1,5$ нТл (при $H \approx 19000$ нТл, $F \approx 60300$ нТл, $H_c \approx 2H \approx 38000$ нТл, погрешностей угловых и компенсационных $\Delta H_\beta \approx 0$, $\Delta H_\gamma \approx 1$ нТл, $\Delta H_\alpha \approx 1$ нТл).

Итоговая погрешность измерений H в средних широтах с помощью колечной установки методом дополнительного поля близка к погрешности вычисления H по результатам измерений Z методом компенсации. Поэтому оба метода измерений дополняют друг друга.

4.2.6. Методика проведения наблюдений методом дополнительного поля

Измерения в колечной установке методом дополнительного поля проводите в следующей последовательности:

- Включите источник тока компенсации и протонный магнитометр для прогрева электронных узлов.
- Произведите стандартную процедуру нивелировки по уровню колечной установки.
- Используя ограничители поворота колечной системы, установите колечную систему по магнитному меридиану.
- Зафиксируйте время начала наблюдений.
- Произведите измерение F_1 .
- Включите ток двойной амплитуды «2I_c» в цепи колечной системы.
- Произведите измерение F_{N1} (При необходимости переключите диапазон измерений магнитометра).
- Смените полярность тока в кольцах и произведите измерение F_{S1} .
- Запишите время половины цикла измерений.
- Поверните колечную систему на 180° до упора в ограничитель.
- Произведите повторные измерения F_{N2} и F_{S2} .
- Отключите ток в кольцах и произведите измерение F_2 .
- Зафиксируйте время конца цикла наблюдений.

Желательно производить все операции достаточно быстро, чтобы за время цикла измерений произошли бы минимальные изменения величины тока в колечной системе и в вариациях геомагнитного поля.

Данные наблюдения введите в бланк электронной таблицы 4.3.

Файлы квартальных и годовых данных абсолютных наблюдений с графическим представлением результатов будут подробно рассмотрены в главе 6.

Таблица 4.3

Колечная установка N 1 ММП-201 N 501013 Поправка на прибор -1						
Поправки на столб: F=0 H=0 Z=0						
Дата	Наблюдатель Бычкова			Вариометры t°C 15.3		
Время	00:14	00:15	00:16	00:17	00:18	00:19
	F ₁ =60000+	F _N =80000+	F _S =60000+	F _S =60000+	F _N =80000+	F ₂ =60000+
1	313	700	281	278	710	312
2	313	700	282	278	708	312
3	313	701	282	278	709	311
4	312	701	282	277	708	311
5	312	702	281	278	709	311
Вычисления (нТл): F _N =80703.8 F _S =60278.7 F=60311.0 H=18998.0 Z=57240.7						
Цена делений вариометров ε нТл/мм: F _A 1.8 H _A 3.0 Z _A 3.0						
Температурный коэффициент μ(t) нТл/°C: F _A 0 H _A 0.18 Z _A 0						
Время	F _{kv}	Z _{kv}	H _{kv}	F _{nvs}	Z _{nvs}	H _{nvs}
00:14	603111	-3.6	10.4	603110	12.7	5.5
00:15		-3.6	10.1		12.7	5.3
00:16		-3.6	10.1		12.7	5.3
00:17		-3.6	10.0		12.8	5.3
00:18		-3.6	9.9		12.9	5.0
00:19	603109	-3.6	9.4	603108	12.8	4.8
Итог:	Дата	Поле	Kv	NVS	A	
H _c	16.09.02	18988.0	18998.8	18993.0	18932.1	
Z _c	16.09.02	57240.0	57244.3	57227.9	57160.5	
F _c ΔF	16.09.02	60311.0	0.0	0.1	60253.4	

Макрос закрытия файла

4.3. Феррозондовый деклинометр / инклинометр

Феррозондовый деклинометр/инклинометр состоит из двух основных частей: немагнитного астрономического теодолита и феррозондового магнитометра с креплением его датчика (феррозонда) на оптической трубе теодолита (рис. 4.6).

Феррозонд (за рубежом принят термин flux-gate) представляет собой устройство на базе ферромагнитного сердечника с обмоткой возбуждения и приемной катушкой, конструкция которого обеспечивает чувствительность к внешнему магнитному полю. Взаимодействие в сердечнике переменного магнитного поля возбуждения и постоянного внешнего магнитного поля приводит к появлению в приемной катушке электрического сигнала, амплитуда которого пропорциональна величине индукции внешнего поля.

Первый феррозондовый магнитометр на кольцевом сердечнике, предназначенный для измерения короткопериодных возмущений геомагнитного поля, создали немецкие ученые Ашенбреннер и Губо в 1936 г. Они применили принцип измерения второй гармоники частоты возбуждения, который сохранился во всех современных феррозондовых магнитометрах. Во время второй мировой войны в США и Англии стали усиленно заниматься разработками феррозондовых магнитометров, используя их для поиска мин и подводных лодок. В 50-х годах прошлого века в США и в нашей стране интенсивно разрабатывалась теория феррозондов. В связи с серьезными проблемами обеспечения стабильных метрологических характеристик феррозондов в настоящее время создано более сотни различных модификаций магнитометров этого типа.

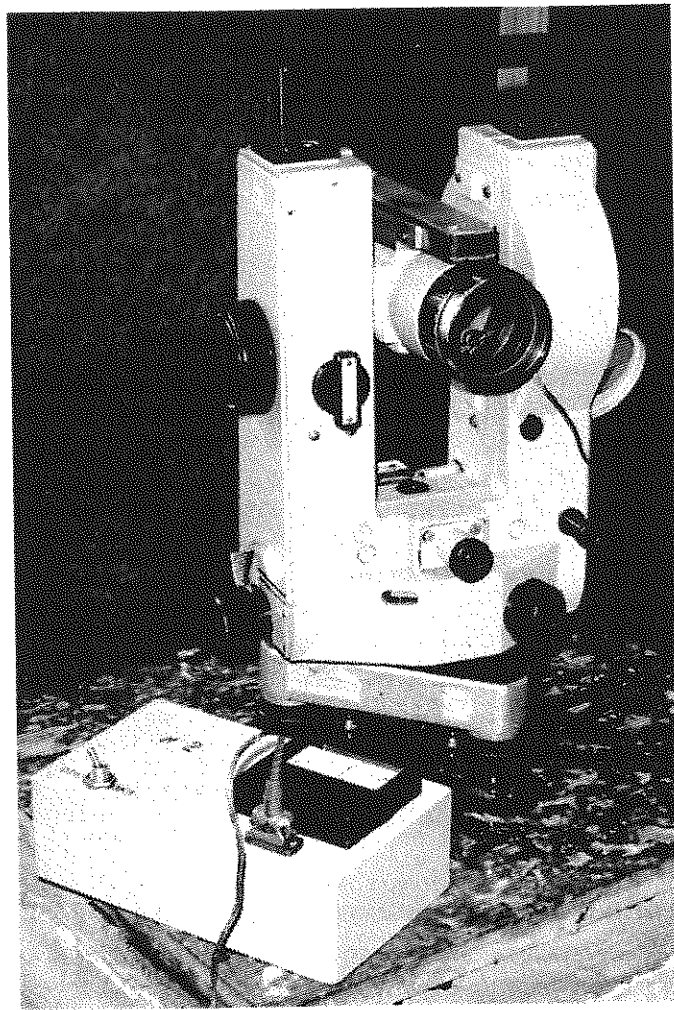


Рис. 4.6. Феррозондовый деklinометр/инклинометр (фото С. Хомутова).

4.3.1. Принцип действия феррозонда

Рассмотрим устройство наиболее распространенного дифференциального феррозонда, который состоит из двух параллельно расположенных стержней, изготовленных из материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя), имеющего обмотки возбуждения на каждом стержне и общую сигнальную катушку (рис. 4.7).

Если в обмотку возбуждения подать переменный ток частоты f , то при отсутствии внешнего магнитного поля и при полной симметрии конструкции датчика, на выводах измерительной катушки будет отсутствовать какой-либо сигнал. При воздействии на датчик внешнего магнитного поля H симметрия магнитной проницаемости сердечников нарушится и в сигнальной катушке будет наводиться ЭДС:

$$e = -S \cdot N_s \cdot d(B_1 + B_2)/dt,$$

где S – сечение стержня, N_s – количество витков сигнальной обмотки, t – время, B_1 и B_2 – магнитные индукции в сердечниках ($B_1 + B_2 = 2\mu_0 \cdot \mu' \cdot H$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ' – относительная магнитная проницаемость сердечника).

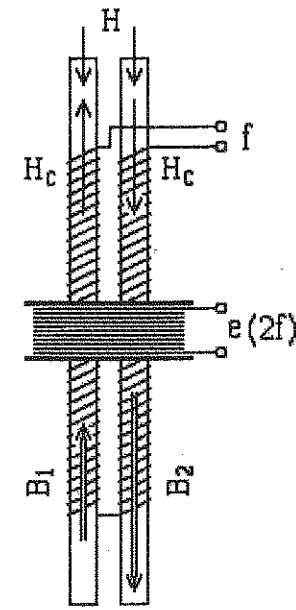


Рис. 4.7. Конструкция стержневого дифференциального феррозонда.

Появление сигнала от взаимодействия магнитных полей в сердечнике принципиально возможно по причине нелинейности характеристики $B = f(H)$, которая связана с изменением относительной магнитной проницаемости сердечников μ' (от максимального значения при нулевом поле до нуля при насыщении сердечника).

Среднее значение ЭДС сигнала можно выразить формулой:

$$E = (4/\pi) \cdot \eta \cdot \omega \cdot S \cdot N \cdot H \cdot \mu_0 \cdot (\mu'_{\max} - \mu'_{\min}) = GH,$$

где: $\eta < 1$ – коэффициент, зависящий от конструкции феррозонда; G – коэффициент преобразования феррозонда, зависящий от параметров его элементов, частоты возбуждения и максимального значения дифференциальной проницаемости сердечника.

Так как за каждый период тока возбуждения индукция в сердечнике будет дважды проходить через нулевое значение, то это приведет к появлению импульсных сигналов на частоте второй и последующих четных гармоник частоты возбуждения:

$$e(\omega t) = 4\omega \cdot S \cdot N \cdot H \cdot \mu_0 \cdot \sum n \cdot \mu'_{2n} \cdot \sin(2n\omega t)$$

Отсюда следуют два важных вывода:

- четные гармоники появляются только при наличии внешнего магнитного поля H , направленного вдоль оси сердечника;
- амплитуда четных гармоник пропорциональна величине этого поля.

В реальном стержневом феррозонде из-за неоднородности магнитных потоков в двух параллельных сердечниках происходит флуктуация фазы генерации импульсов и появляется квадратурная помеха в четных гармониках, которая внешне проявляется в нестабильном смещении нуля датчика. В значительной степени квадратурная помеха уменьшена в кольцевых феррозондах благодаря высокой однородности магнитного потока возбуждения в замкнутом магнитопроводе (рис. 4.8). Для внешнего магнитного поля кольцевой сердечник является разомкнутой системой и принцип его работы не отличается от стержневого феррозонда.

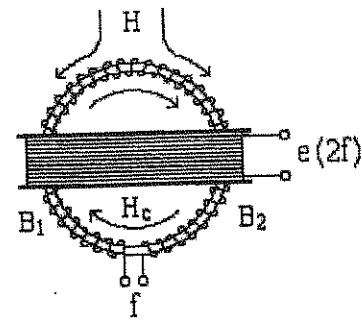


Рис. 4.8. Конструкция кольцевого феррозонда.

Кроме того, из-за неидеальной симметрии всех элементов датчика в сигнале будет присутствовать помеха в виде первой и ряда нечетных гармоник тока возбуждения. Разработчики и изготовители феррозондовых магнитометров всегда ставят задачу по минимизации помех нечетных гармоник, которые могут привести к нелинейности узкополосного усилителя второй гармоники. Наконец, в сигнале присутствует магнитный шум, вызванный неповторяемостью процессов перемагничивания доменов и микрообластей сердечников. Для стабилизации параметров магнитометра и расширения его динамического диапазона обычно вводится глубокая обратная связь по магнитному полю.

4.3.2. Диаграмма направленности феррозонда

Относительная магнитная проницаемость ферромагнитного стержня максимальна вдоль сердечника и во много раз превышает поперечную проницаемость. Поэтому феррозонд фактически является магнитной антенной с диаграммой направленности в виде «восьмерки». В ортогональном направлении к магнитной оси феррозонда индукция в сердечнике практически равна нулю и выходное напряжение магнитометра также становится нулевым. В этом положении феррозонд чувствителен к малейшим изменениям угла между осью сердечника и вектором магнитного поля и поэтому он может использоваться для определения положения вектора геомагнитного поля или его горизонтальной компоненты в пространстве.

Установив феррозонд на теодолите, мы получаем деклинометр/инклинометр для измерения склонения и наклонения вектора геомагнитного поля. Точность измерений определяется разрешающей способностью лимба теодолита и чувствительностью феррозондового датчика, которая определяется уровнем помехи в выходном сигнале магнитометра. При измерениях постоянного магнитного поля погрешность современных феррозондовых магнитометров оценивается в десятые доли нТл. При измерениях в узком частотном диапазоне от 10^{-2} до 10 Гц погрешность измерений может составлять сотые доли нТл.

Оценим возможную разрешающую способность феррозондового магнитометра, используемого в качестве деклинометра. Если отклонение нормали магнитной оси феррозонда от горизонтальной компоненты H геомагнитного поля обозначить как угол $\Delta\varphi$, то на сердечник будет действовать проекция $\Delta H = H \cdot \sin \Delta\varphi$.

Отсюда: $\Delta\varphi \approx \Delta H/H$.

Угловая чувствительность датчика в поле Иркутска (где $H = 19000$ нТл) при цене деления феррозондового магнитометра $\Delta H_{min} = 0,1$ нТл составит 1,2 угловых секунды.

Однако столь высокая угловая чувствительность феррозонда может оказаться нереализованной из-за несовершенства технологии изготовления сердечника. В реальном дифференциальном сердечнике стержни представляют собой тонкие проволоочки или полоски толщиной 0,1 мм из пермаллоя, которые трудно установить строго параллельно друг другу (рис. 4.9) и каждый стержень будет иметь свою нормаль к продольной оси. Магнитная ось такого феррозонда окажется на биссектрисе угла 2β при условии одинаковых коэффициентов преобразования $G_1 = G_2$ каждого стержня. Таким образом, положение магнитной оси (а значит и нормали к ней) будет зависеть от стабильности отношения G_1/G_2 . Если при этом имеется сдвиг фазы перемагничивания стержней, то появляется квадратная помеха от поперечного поля H и феррозонд приобретает два дополнительных лепестка диаграммы направленности (рис. 4.9). Такой деклинометр/инклинометр будет иметь пониженную угловую чувствительность, которая зависит как от угла β , так и от величины φ сдвига фаз сигналов каждого сердечника: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi$.

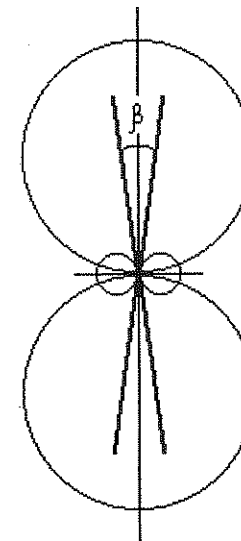


Рис. 4.9. Диаграмма направленности феррозондового датчика.

В кольцевых сердечниках в плоскости кольца сам сердечник не имеет диаграммы направленности, но при размещении его в длинной катушке обратной связи, феррозонд приобретает магнитную ось этой катушки.

4.3.3. Блок электроники феррозондового магнитометра

Блок электроники феррозондового магнитометра (рис. 4.10) обычно состоит из следующих основных узлов:

- задающего генератора ЗГ удвоенной частоты возбуждения $2f$;
- триггерного делителя Д для создания сигнала возбуждения f ;
- усилителя мощности УМ тока возбуждения обмоток ОВ;
- узкополосного усилителя ПУ второй гармоники сигнальной катушки СК;
- фазового (синхронного) детектора ФД второй гармоники;

- усилителя постоянного тока УПТ;
- элементов цепи обратной связи и индикации выходного сигнала.

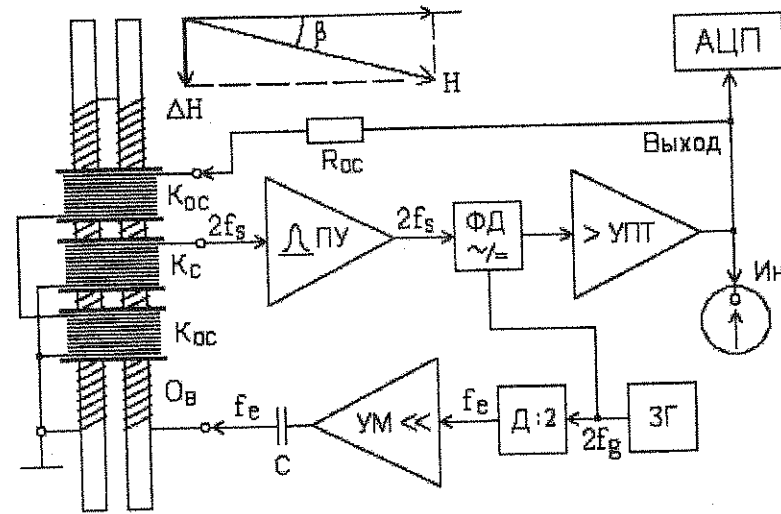


Рис. 4.10. Блок-схема феррозондового магнитометра.

Ток возбуждения частоты f_0 может иметь синусоидальную или прямоугольную форму. Достаточно широко применяется метод феррорезонансного возбуждения, при котором емкость C образует с индуктивностью L_0 обмотки возбуждения O_B цепь последовательного резонанса: $C_2 = 1 / (2\pi f_0)^2 \cdot L$. Ток возбуждения принимает вид разнополярных колокольчиков, энергия которых целиком расходуется на быстрое перемагничивание сердечников, не создавая дополнительной помехи нечетных гармоник.

Даже качественно изготовленный феррозонд на выходе сигнальной катушки имеет помеху в виде первой и третьей гармоник частоты возбуждения. Поэтому выход сигнальной катушки K_C обычно подключен к узкополосному усилителю второй гармоники ПУ, который подавляет на -60 дБ помеху нечетных гармоник. Феррорезонансный режим возбуждения позволяет не применять ПУ. Фазовый (синхронный) детектор является фазочувствительным демодулятором, обеспечивающим оптимальную фильтрацию информационного сигнала и создающий через интегрирующий усилитель постоянного тока УПТ глубокую отрицательную связь по магнитному полю. Для уменьшения влияния температуры на сопротивление катушки обратной связи K_{OC} вместо ограничивающего резистора R_{OC} обычно применяют преобразователь «напряжение/ток», выполненный на операционном усилителе.

К выходу УПТ подключают цифровой милливольтметр, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) или стрелочный «нуль-индикатор» (Ин). Для повышения стабильности общего коэффициента преобразования G магнитометра обратную связь феррозонда часто подключают к выходу АЦП.

Современная прецизионная техника измерения интервалов между импульсами позволяет применять в некоторых моделях феррозондовых магнитометрах другой метод преобразования: H (нТл) = $G \cdot \tau$ (мкс), где τ — время между разнополярными импульсами второй гармоники сигнальной катушки.

4.3.4. Феррозондовый магнитометр LEMI-203

Феррозондовый магнитометр LEMI-203 Львовского центра Института космических исследований (рис. 4.11) состоит из однокомпонентного феррозонда размером 27x27x75 мм и блока электроники, соединенных пятиметровым сигнальным кабелем. Сердечник феррозонда из пермаллоя толщиной 0,02 мм имеет длину 50 мм. Обмотка возбуждения (300 витков) с емкостным фильтром обеспечивают феррорезонансный режим перемагничивания сердечника на частоте 6,25 кГц при максимальном импульсном токе возбуждения 500 мА. Сигнальная обмотка (600 витков) с входной емкостью усилителя образует резонансный контур, настроенный на выделение сигнала второй гармоники 12,5 кГц. Компенсационная катушка (600 витков) подключена к усилителю тока обратной связи. Для уменьшения уровня помех от цепи возбуждения все обмотки включены по симметричной схеме, а их соединительные цепи экранированы. Однокомпонентный феррозондовый датчик имеет элементы крепления его к оптической трубе немагнитного теодолита ЗТ2КР-НМ и четыре юстировочных винта для совмещения магнитной оси сердечника феррозонда с оптической осью теодолита.

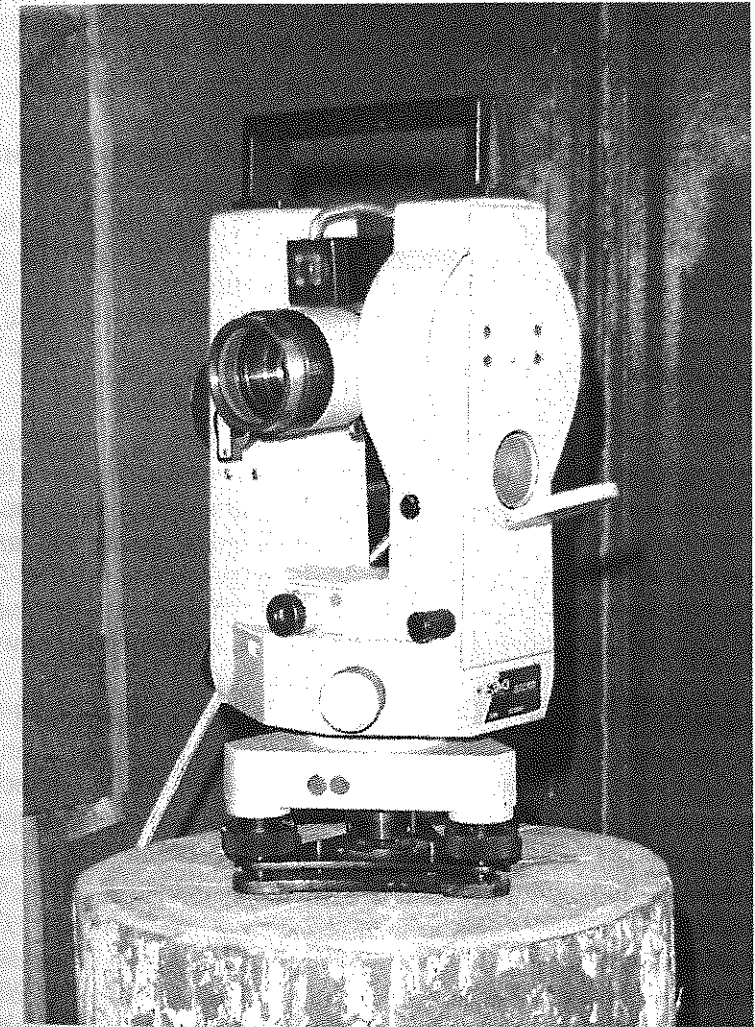


Рис. 4.11. Магнитометр LEMI-203 (фото С. Хомутова).

Блок электроники функционально выполнен по типовой схеме. В магнитометре LEMI-203 введена автоматическая подстройка фазы управляющего сигнала, поступающего от задающего генератора на фазовый детектор. С выхода УПТ сигнал разветвляется на три канала. Канал обратной связи имеет преобразователь «напряжение/ток». Канал АЦП включает в себя масштабный усилитель, который позволяет автоматически переходить на более чувствительные пределы при уменьшении величины магнитного поля, воздействующего на феррозонд. Аналого-цифровой преобразователь с дисплеем подключен к выходу масштабного усилителя. Одновременно выходной сигнал с УПТ подается на контрольное гнездо X2 с допустимой нагрузкой 1 кОм, что позволяет к этому выходу подключить контрольный стрелочный нуль-индикатор.

Кварцевый тактовый генератор обеспечивает набор частот для работы делителя частоты (200 кГц), аналого-цифрового преобразователя (100 кГц), фазового детектора (12,5 кГц), усилителя тока возбуждения (6,25 кГц) и дешифратора (50 Гц).

Питание ± 5 В узлов блока электроники осуществляется от преобразователя напряжения, который в свою очередь обеспечивается энергией от встроенного аккумулятора +12 В. Индикация разряда аккумуляторов до напряжения 10,6 В обеспечивается дисплеем, а заряд аккумулятора осуществляется от внешнего источника $13,7 \pm 0,1$ В через разъем X3.

Основные технические характеристики магнитометра LEMI-203

Диапазоны измерений	I – ± 70 мкТл, II – ± 20 мкТл, III – ± 2 мкТл
Разрешающая способность	I – 10 нТл, II – 1 нТл, III – 0,1 нТл
Коэффициент преобразования по аналоговому выходу	0,05 мВ/нТл
Среднеквадратичный уровень шума по аналоговому выходу (0,03-1 Гц) ...	<20 пкТл
Рабочий температурный диапазон	от минус 5 до +40 °С
Напряжение питания от внутреннего аккумулятора	12 В

В отличие от феррозондового магнитометра DMI-G производства Датского Метеорологического Института представленный здесь LEMI-203 не имеет звуковой индикации момента совмещения магнитного меридиана с нормалью магнитной оси феррозонда и снабжен встроенным аккумулятором небольшой емкости. Кроме того, опыт эксплуатации LEMI-203 Иркутской обсерваторией выявил недостаточную стабильность положения магнитной оси феррозонда по отношению к оптической оси теодолита.

4.3.5. Измерения склонения феррозондовым деклинометром

В принципе феррозондовый магнитометр является относительным магнитометром, но при измерении углов он работает в качестве нуль-индикатора и поэтому приобретает свойства абсолютного прибора. Для выполнения функции деклинометра (или инклинометра) феррозонд закрепляют на зрительной трубе немагнитного астрономического теодолита. Феррозондовый магнитометр применяется для нахождения положения магнитного меридиана на круге теодолита, а зрительная труба служит для определения на этом круге географического меридиана благодаря наведению на мир с известным азимутом. Угол между плоскостью магнитного меридиана и плоскостью географического (астрономического) меридиана называется склонением D :

$$D = n_m - n_g = n_m - (n_M - A), \quad (4.9)$$

где: n_m – отсчет горизонтального лимба положения на круге магнитного меридиана, n_g – положение на круге теодолита географического меридиана, n_M – отсчет горизонтального лимба при наведении зрительной трубы на мир, A – азимут мира, определенный из астрономических наблюдений.

В отличие от традиционного магнитного теодолита, у которого при измерениях ось магнита направлена по магнитному меридиану, в феррозондовом деклинометре магнитная ось феррозонда устанавливается перпендикулярно меридиану: $n_m = \theta \pm 90^\circ$.

Рассмотрим погрешности измерений склонения феррозондовым деклинометром. Феррозондовый магнитометр имеет некоторое смещение нуля, что эквивалентно сохранению в сердечнике феррозонда остаточного поля H_0 . Предположим, что оно направлено к концу сердечника, обозначенного в виде стрелки \Rightarrow (рис. 4.12). Нулевые показания на выходе магнитометра будут только при условии компенсации остаточного поля в сердечнике проекцией горизонтальной компоненты геомагнитного поля:

$$H_0 = H_1 = H \cdot \sin \beta, \text{ или } \beta \approx H_0/H,$$

где β – угол ошибки одиночного измерения магнитного меридиана.

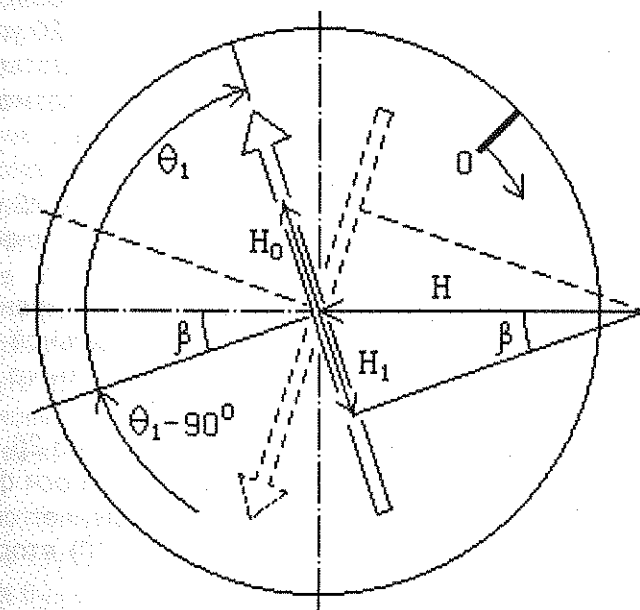


Рис. 4.12. Схема инструментальной погрешности феррозондового деклинометра при смещенном электрическом нуле.

Чтобы исправить эту ошибку, необходимо произвести второе измерение склонения после поворота феррозонда в горизонтальной плоскости на 180° , т.к. величина угла β останется прежней, но изменится его знак. Следовательно, при условии неизменности H и H_0 в течение производства отсчетов в двух положениях феррозонда, магнитный меридиан будет совпадать с биссектрисой двойного угла 2β , а положение магнитного меридиана на круге определится формулой:

$$n_m = [(\theta_1 + \theta_2)/2] \pm 90^\circ.$$

Если смещение нуля выхода феррозонда не сохраняет стабильность во время операций вращения теодолита, то в измерениях появится ошибка $\Delta D \approx \Delta H/H$. Для измерений склонения с погрешностью $0,1'$ допускается $\Delta H < \pm 0,5$ нТл. Если коэффициент преобразования магнитометра равен $0,05$ мВ/нТл, то стабильность нуля на входе АЦП магнитометра должна сохраняться в пределах 25 мкВ в течение полного цикла измерений с переворотами магнитной оси феррозонда на 180° вокруг горизонтальной и вертикальной осей теодолита.

В деklinометре магнитная ось феррозонда имеет некоторый наклон к горизонтальной плоскости на угол α . Нивелировка теодолита производится наблюдателем также с некоторой угловой погрешностью. Следовательно, на сердечник феррозонда будет действовать дополнительное поле $H_z = Z \sin \alpha$, которое может по направлению совпадать с остаточным полем H_0 или компенсировать его. Наблюдатель должен развернуть теодолит так, чтобы магнитометр показал нулевой отсчет. Условие нулевых показаний определяется формулой: $H_0 \pm Z \sin \alpha_1 = H \sin \beta_1$. Откуда:

$$\beta_1 \approx (H_0/H) \pm (Z/H) \cdot \sin \alpha_1 \quad (4.10)$$

Если после поворота феррозонда на 180° вокруг вертикальной оси $\alpha_1 \neq \alpha_2$, то в измерениях появится ошибка: $\Delta D \approx (Z/H) \cdot \Delta \alpha$.

Например, Иркутская обсерватория имеет феррозондовые деklinометры на базе теодолита ТТ-5 с ценой деления уровня 20 угловых секунд. Следовательно, нивелировка теодолита будет производиться наблюдателем с погрешностью $\Delta \alpha \geq 5''$. Отсюда можно оценить возможную погрешность из-за влияния погрешности нивелировки прибора:

$$\Delta D \geq (57200/19000) \cdot 5 = 15'' = 0,25'$$

Чтобы иметь инструментальную погрешность менее $0,25$ угл. мин. ($\Delta D \leq 15''$) необходимо для наблюдений применять более точный теодолит, напр., THEO-010A, Zeiss 010B, LEMI-203.

Влияние коллимации в горизонтальной плоскости устраняется переворотом зрительной трубы через зенит вокруг горизонтальной оси теодолита и проведением двух дополнительных измерений магнитного меридиана:

$$n_m = [(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)/4] + 90$$

После переворота зрительной трубы через зенит угол $2\beta_2$ не равен углу $2\beta_1$ первого цикла измерений из-за наклона магнитной оси феррозонда на угол α . Компонента в сердечнике, равная $Z \sin \alpha$, меняет свое направление на противоположное и поэтому в формуле (4.10) второе слагаемое поменяет знак на обратный.

Следует иметь в виду, что при перевороте зрительной трубы через зенит феррозонд переходит из положения «над трубой \uparrow » в положение «под трубой \downarrow », что может привести к дополнительной ошибке из-за смещения центра тяжести при люфтах в горизонтальной оси теодолита, а также из-за воздействия микрополей магнитных деталей в стойках теодолита. Теоретически при стабильном нуле магнитометра, проведение серии из четырех наблюдений в разных положениях зрительной трубы исключает все инструментальные ошибки, что делает феррозондовый магнитометр абсолютным прибором для измерения склонения геомагнитного поля.

4.3.6. Методика проведения наблюдений склонения

При проведении наблюдений склонения с помощью феррозондового магнитометра мы сталкиваемся с двумя противоречивыми требованиями. С одной стороны, для уменьшения влияния дрейфа нуля и вариаций геомагнитного поля необходимо быстро производить повороты оптической трубы, проверять нивелировку, находить положение приборного нуля и снимать отсчеты горизонтального круга. С другой стороны, спешка часто приводит к неточной нивелировке, ошибкам считывания и записи отсчетов. Поэтому качество наблюдений на феррозондовом деklinометре в значительной степени зависит от квалификации наблюдателя.

- Включите на прогрев феррозондовый магнитометр.
- Произведите тщательную нивелировку теодолита с помощью уровня при горизонтальном круге.
- Наведите зрительную трубу на мирю в положении феррозонда под трубой и произведите отсчет θ_{M1} .
- Переведите зрительную трубу через зенит и в положении феррозонда над трубой произведите второй отсчет направления на мирю θ_{M2} .
- Поверните зрительную трубу в направлении Восток (E) ↔ Запад (W), проверьте «нулевое» положение трубы по вертикальному лимбу (отсчеты $90^\circ 00' 00''$ или $270^\circ 00' 00''$). Старые теодолиты (напр., ТТ5) не имеют маятникового оптического компенсатора при вертикальном круге. При работе с таким теодолитом установочным винтом вертикального круга приведите его уровень с максимальной точностью в горизонтальное положение.
- Наводящим винтом горизонтального круга установите нулевые показания феррозондового магнитометра.
- Зафиксируйте время T_1 первого измерения и снимите отсчет горизонтального лимба $\theta \uparrow_W$.
- Поверните зрительную трубу на 180° в направлении W ↔ E, и наводящим винтом установите нулевые показания магнитометра.
- Зафиксируйте время T_2 второго измерения и снимите отсчет лимба $\theta \uparrow_E$.
- Переведите трубу через зенит с тем, чтобы феррозонд оказался под трубой и установите ее нулевое положение по вертикальному лимбу.
- Наводящим винтом горизонтального круга найдите положение нуля магнитометра.
- Зафиксируйте время T_3 и снимите отсчет горизонтального лимба $\theta \downarrow_W$.
- Поверните трубу на 90° вокруг вертикальной оси и повторите операции измерения $\theta \downarrow_E$ с фиксацией времени T_4 .
- Разверните трубу на мирю и произведите повторные отсчеты θ_{M3} и θ_{M4} (феррозонд под трубой и феррозонд над трубой) положения миры на круге теодолита.

Четыре отсчета на мирю и четыре отсчета магнитного меридиана составляют одну серию наблюдений склонения. Обычно на обсерватории проводят две серии наблюдений с возвращением зрительной трубы в исходное положение.

Расчеты по результатам наблюдений сводятся к вычислению средних углов и определению склонения по формуле (4.9), которые удобно производить на персональном компьютере в электронных таблицах.

Азимут миры A на приборном столбе является одной из постоянных обсерватории и эпизодически переопределяется с помощью астрономических наблюдений по полярной звезде или по солнцу. Иркутская обсерва-

тория имеет две рабочие миры N1 и N2, которые с учетом погодных условий часто используются одновременно в одном наблюдении магнитного склонения.

В табл. 4.4 приведен пример наблюдения склонения феррозондовым деклинометром, изготовленного на базе немагнитного теодолита ТТ-5 (рис. 4.13) с ценой деления горизонтального лимба 0,5'.

Таблица 4.4

Феррозондовый деклинометр ФД1 N б/н Столб N6				Поправка на прибор 0			
Азимут миры (мин.) N1 -244.8 N2 68.1				Поправка на столб 0			
Дата 20.09.2002 Наблюдатель Бычкова				Вариометры ϵ /мм: 0.37			
Время	Позиция	Град.	I (мин.)	II (мин.)	$\Delta D_{kv}'$	$\Delta D_{nvs}'$	ΔD_I (мм)
	Мира -1 ↓	108	35.0	35.5			
	Мира -2 ↑	108	25.0	25.0			
00:19	Восток ↑	19	33.0	33.0	-14.9	2.7	-38.6
00:20	Запад ↑	21	0.5	0.5	-15.0	2.6	-39.2
00:21	Восток ↓	22	30.5	31.0	-15.2	2.4	-39.8
00:23	Запад ↓	17	23.5	24.0	-15.5	2.1	-40.4
	Мира -3 ↓	108	35.5	35.5			
	Мира -4 ↑	108	24.5	25.0			
Вычисления (мин.):				θ_m	θ_{M-A_1}	D_{M1}	
				6607.0	6755.1	148.1	
Итог:	Дата	Поле	Kv	NVS	I	Прибор	
D ₀	20.09.02	-148.1	-132.9	-150.5	-133.4	ФД1	
Макрос закрытия файла.							

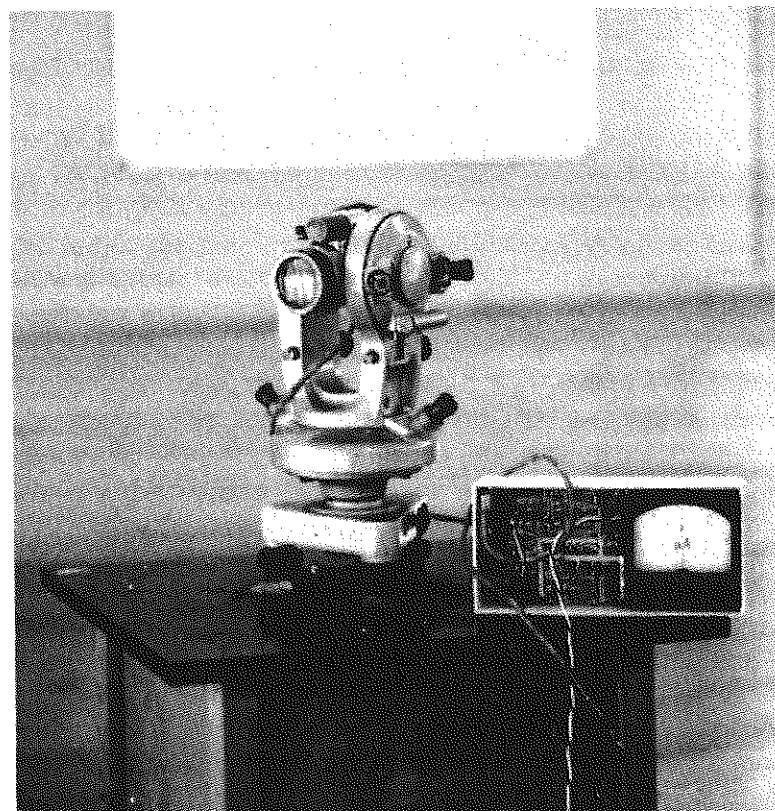


Рис. 4.13. Магнитометр fDI_M.

После запуска макроса закрытия файла итоговая строка копируется в файлы кварталных и годовых абсолютных наблюдений склонения, а исходный файл данного наблюдения сохраняется под именем даты наблюдения.

В табл. 4.5 приведен пример наблюдения склонения на феррозондовом деклинометре/инклинометре LEMI-203 с ценой деления шкалы микрометра 1''.

Таблица 4.5

Феррозондовый деклинометр/инклинометр LEMI-203				Поправка на прибор 0		
Столб N 6				Поправка на столб: $\Delta D = 0$		
Азимут миры (в угл. мин.) N1 -244.8 N2 68.1						
Дата 11.09.2003 Наблюдатель Бычкова						
Время	Позиция	Град. мин. сек.	ΔD нТ	Отсчет в мин.	Вариометры D	
	Мира 1 ↓	0 7 26		7.433	D_{kv}'	D_{nvs}'
	Мира 1 ↑	5 20 3		320.05	D_A мм	
00:20	Восток ↑	271 6 54	0.5	16266.8	-20.9	2.8
00:21	Запад ↑	92 16 19	0.5	5536.33	-20.8	2.9
00:23	Восток ↓	92 17 49	0.2	5537.82	-22.2	1.5
00:24	Запад ↓	271 13 48	0.4	16273.8	-21.0	2.7
	Мира 2 ↓	185 19 53		11119.9		
	Мира 2 ↑	180 7 21		10807.4		
Вычисления:				θ_m'	θ_{M-A}'	D'
				5652.03	5503.72	-148.31
Итог:	Дата	Поле	D_0 - Kv	D_0 - NVS	D_0 - A	Прибор
D ₀	11.09.03	-148.3	-127.1	-150.8	-146.7	LFD/I

Если результаты наблюдений на феррозондовом деклинометре вызывают сомнения, то в таблицу вводится дополнительная строка контрольных расчетов, которые позволяют сделать некоторые выводы о стабильности параметров прибора и о качестве работы наблюдателя. Горизонтальная коллимация (угол β между магнитной осью феррозонда и оптической осью зрительной трубы теодолита в горизонтальной плоскости) для каждого наблюдения определяется по формуле:

$$\beta = [(\theta_{\downarrow W} + \theta_{\downarrow E}) - (\theta_{\uparrow W} + \theta_{\uparrow E})] / 4 = (\theta_{\downarrow WE \text{ mean}} - \theta_{\uparrow WE \text{ mean}}) / 2.$$

Вертикальную коллимацию (угол α между магнитной осью феррозонда и оптической осью зрительной трубы в вертикальной плоскости) определяют по формуле:

$$\alpha \approx [(\theta_{\uparrow W} - \theta_{\uparrow E}) - (\theta_{\downarrow W} - \theta_{\downarrow E}) \pm 360] \cdot H_m / 4Z_m.$$

Величина смещенного нуля феррозонда (в нТл) определяются по формуле:

$$S_0 = \pi H_m [(\theta_{\uparrow W} - \theta_{\uparrow E}) + (\theta_{\downarrow W} - \theta_{\downarrow E})] / 4 \cdot 180.$$

Разброс значений углов коллимации длинного ряда наблюдений дает основание предполагать, что сам феррозонд или его элементы имеют ненадежную фиксацию, либо наблюдатель имеет недостаточную квалификацию. Разброс значений смещения нуля может быть вызван высоким уровнем квадратурной помехи феррозонда, нестабильностью усилителей блока электроники или ошибками наблюдателя.

4.3.7. Измерения наклона феррозондовым инклинометром

Феррозондовый деклинометр превращается в инклинометр, если его зрительную трубу с феррозондом установить в плоскости магнитного ме-

ридиана и повернуть ее вокруг горизонтальной оси до совмещения нормали датчика с направлением полного вектора F . Это положение определяется по нулевым показаниям магнитометра (рис. 4.14). Возможная ошибка измерения угла наклонения ΔI , вызванная смещением нуля магнитометра, определяется по формуле: $\Delta I \approx H_0/F$. Эта ошибка компенсируется проведением двух измерений с вращением зрительной трубы вокруг горизонтальной оси при направлении трубы на Север ($N\uparrow$) и Юг ($S\downarrow$).

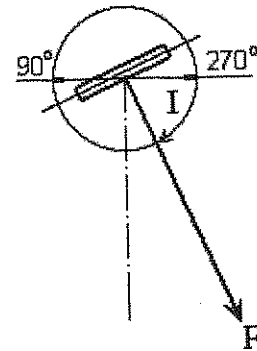


Рис. 4.14. Измерение наклонения I .

Для установки феррозонда в магнитном меридиане с погрешностью не более 10 угловых минут, необходимо производить измерения наклонения сразу после проведения измерений склонения и вычисления положения магнитного меридиана на горизонтальном круге теодолита. Современные теодолиты имеют маятниковый оптический компенсатор, который автоматически устанавливает по горизонтали положение вертикального лимба на отnivelированном теодолите. На старых теодолитах после каждого поворота трубы с максимальной точностью устанавливают горизонтальность положения нуля вертикального круга по его уровню. Перед началом каждой серии наблюдений углов наклонения и по завершении ее необходимо произвести наблюдения полного вектора F протонным магнитометром. Измерения F могут производиться на этом же приборном столбе при снятом с него феррозондовом инклинометре, но обычно датчик протонного магнитометра установлен в другой наблюдательной точке и известна градиентная поправка $\Delta F_{ст}$ «на столб». Среднее значение F используется для вычисления H и Z по формулам:

$$H = (F + \Delta F_{ст}) \cdot \cos I, \text{ и } Z = (F + \Delta F_{ст}) \cdot \sin I$$

В связи с тем, что одиночные наблюдения вектора F протонным магнитометром и наблюдения наклонения I инклинометром разнесены по времени, то всегда есть вероятность появления дополнительной погрешности в расчетах H и Z без учета вариации ГМП. Для устранения этой погрешности Жан Рассон рекомендует расчетным путем учитывать вариацию вектора F на все четыре момента T_i измерений наклонения I , используя данные вариометров:

$$F_i = (H_m/F_m) \cdot (dH_i - dH_T) + (Z_m/F_m) \cdot (dZ_i - dZ_T) + F_T, \quad (4.11)$$

или

$$F_i = (X_m/F_m) \cdot (dX_i - dX_T) + (Y_m/F_m) \cdot (dY_i - dY_T) + (Z_m/F_m) \cdot (dZ_i - dZ_T) + F_T, \quad (4.12)$$

где: F_i – расчетное значение полного вектора F в моменты T_i ; F_T – измеренное значение поля в момент T_T ; dH_i, dZ_i, dX_i, dY_i – значения вариаций компонент поля на моменты T_i ; dH_T, dZ_T, dX_T, dY_T – значения вариаций

компонент поля на момент T_T ; F_m, H_m, Z_m, X_m, Y_m – среднегодовые значения геомагнитного поля на обсерватории.

Эти дополнительные расчеты позволяют учесть вариацию F во время наблюдений.

Если обсерватория имеет протонную вариационную станцию, то специальные наблюдения вектора F не производятся, т.к. значения F на моменты измерения наклонения I можно взять из данных этой станции с учетом поправки $\Delta F_{ст}$ между точками измерения.

Погрешности расчетных значений H и Z определяются из формул:

$$\Delta H = (\cos I) \cdot \Delta F - (F \cdot \sin I) \cdot \Delta I, \quad \Delta Z = (\sin I) \cdot \Delta F + (F \cdot \cos I) \cdot \Delta I$$

Согласно этим формулам величина погрешности компонентных измерений с помощью феррозондового инклинометра зависит от инструментальных погрешностей теодолита, протонного магнитометра и от значений F и I , т.е. от местоположения обсерватории.

Если для измерений применяется протонный магнитометр с погрешностью 1 нТл и феррозондовый инклинометр с ценой деления вертикального лимба 0,5', то в Иркутске при $I = 71,6^\circ$ ошибки при определении H и Z составят: $\Delta H = 4$ нТл и $\Delta Z \approx 8$ нТл. С такими приборами производить определения горизонтальной и вертикальной составляющих методом измерения наклонения нецелесообразно. Колечная установка даст более надежные результаты с меньшими ошибками. Применяя протонный магнитометр с погрешностью 0,1 нТл и инклинометр с ценой вертикального лимба 1", соответствующие ошибки уменьшатся до 0,2–0,5 нТл.

4.3.8. Методика проведения наблюдений наклонения

По результатам предварительных измерений склонения подсчитайте положение магнитного меридиана на горизонтальном круге теодолита:

$$\theta_m = (\theta\uparrow_1 + \theta\uparrow_2 + \theta\downarrow_3 + \theta\downarrow_4) / 4 + 90^\circ.$$

Теперь произведите перечисленные ниже операции одной серии наблюдения:

- Проверьте нивелировку теодолита и установите зрительную трубу в плоскости магнитного меридиана по рассчитанному значению угла θ_m .
- Произведите наблюдения F_1 протонным магнитометром, если на обсерватории отсутствует непрерывно работающий протонный магнитометр (F-вариационная станция).
- Наводящим винтом вертикального круга установите нулевые показания магнитометра.
- Зафиксируйте время и снимите отсчет положения трубы по вертикальному лимбу $\alpha\uparrow_1$.
- Переверните зрительную трубу на 180° вокруг горизонтальной оси и наводящим винтом вертикального круга установите нулевые показания магнитометра.
- Зафиксируйте время измерения и показания вертикального лимба $\alpha\downarrow_2$.
- Поверните трубу на 180° вокруг вертикальной оси и по горизонтальному лимбу установите положение $(\theta_m + 180^\circ)$.
- Наводящим винтом вертикального круга установите нулевые показания магнитометра.
- Зафиксируйте время и снимите отсчет положения трубы по вертикальному лимбу $\alpha\uparrow_3$.

• Переверните зрительную трубу на 180° вокруг горизонтальной оси и наводящим винтом вертикального круга установите нулевые показания магнитометра.

• Зафиксируйте время измерения и показания вертикального лимба $\alpha \downarrow_4$.

• Произведите повторные наблюдения F_2 протонным магнитометром. Результаты полной серии наблюдений D и I заносятся в бланк электронной таблицы. Ниже приведен пример измерений феррозондовым деклинометром/инклинометром на базе теодолита Zeiss 010B с ценой делений $1''$.

Таблица 4.6

Феррозондовый деклинометр/инклинометр ТНВО-010А N							Поправка на прибор 0			
Столб N 6							Поправки на столб: $\Delta D=0$ $\Delta H=0$ $\Delta Z=0$ $\Delta F=0$			
Азимут мира (угл.мин.) N1 -244.8 N2 68.1							Температура $t^\circ\text{C}=15.0$			
Дата 11.02.2003							Наблюдатель Талалаевская			
Время	Позиция	Град.	мин.	сек.	ΔD пТ	Отсчет в мин.	Вариометры D			
	Мира	↓	86	20	5	5180.1	D_{kv}'	D_{nvs}'	D_A мм	
	Мира	↑	266	20	21	15980.4				
08:08	Восток	↑	0	32	4	-0.1	32.1	-23.6	-5.4	-21.4
08:13	Запад	↑	175	22	24	0	10522.4	-23.5	-5.2	-21.0
08:16	Восток	↓	175	5	7	0.3	10505.1	-23.3	-5.1	-20.4
08:19	Запад	↓	0	13	40	0	13.7	-23.2	-5.0	-20.2
	Мира	↓	86	20	16		5180.3			
	Мира	↑	266	21	10		16981.2			
08:34	F_1		60313	60313	60313	60313	60313	60312	60312	60312
08:39	Юг	↑	70	47	10	-0.3	4247.2			
08:42	Север	↓	250	47	14	0.1	15047.2			
08:47	Север	↑	287	30	30	-0.8	17250.5			
08:51	Юг	↓	107	30	7	0	6450.1			
08:52	F_2		60312	60312	60312	60312	60312	60312	60312	60312
Вычисления:	θ_m'	θ_{M-A}'	D'	F пТ	I°	H нТ	Z нТ			
	10668.3	10825.3	-156.95	60312.4	71.641	18996.8	57242.5			
Контроль:	Дата	β'	α'	S_0 пТ	α_{IF}	S_{10} пТ	$\varepsilon=0.37$	1.8	3.0	
	11.02.03	-9.1	51.3	1.9	51.2	1.9	$\mu(t)=0$	0	0.18	
Вариометры:	Время	F_{kv}	H_{kv}	Z_{kv}	F_{nvs}	H_{nvs}	Z_{nvs}	F_A	H_A	Z_A
	08:34	603136	4.7	-1.2	603128	12.4	19.6	21.4	18.4	38.6
	08:39		3.7	-1.6		11.4	19.6		18.2	38.6
	08:42		1.9	-2.1		9.7	19.0		18.6	38.2
	08:47		2.0	-2.2		9.9	18.9		18.6	38.2
	08:51		2.2	-2.3		10.0	18.7		18.6	38.2
	08:52	603123	2.0	-2.3	603117	10.0	18.7	20.9	18.6	38.2
Итог:	Дата	Поле	K_v	N_{VS}	A	Прибор				
D_0	11.02.03	-157.0	-133.6	-151.8	-149.3	FD/I				
H_0	11.02.03	18996.8	18994.1	18986.3	18939.5	FD/I				
Z_0	11.02.03	57242.5	57244.5	57223.4	57150.6	FD/I				
$F_0, \Delta F$	11.02.03	60312.4	-1.0	0.0	60274.0	FD/I				
Макрос закрытия файла.										

В связи с тем, что наблюдения наклоения I имеют комплексный характер, так как производятся сразу после определения места магнитного меридиана на круге и одновременно измеряется вектор F протонным магнитометром, то электронная таблица 4.6 имеет более сложную структуру по сравнению с представленными здесь примерами таблиц. Как правило, в таблицу введена дополнительная расчетная строка по контролю система

тических погрешностей наблюдений (см. раздел 4.3.6). Кроме того, для вычисления H и Z вводятся дополнительные формулы (4.11) и (4.12), учитывающие вариацию вектора F во время проведения серии наблюдений.

4.4. Кварцевый магнитометр QHM

На многих магнитных обсерваториях в качестве дублирующих и полевых инструментов для измерения склонения D и горизонтальной компоненты H еще используются кварцевые магнитометры типа QHM (рис. 4.15). Этот инструмент создан Ла Куром в 1931 г. для проведения взаимного контроля результатов наблюдений различных обсерваторий. Магнитометр QHM благодаря стабильным параметрам, небольшим габаритам и относительной простоте операций наблюдений получил самое широкое распространение при геологических изысканиях, магнитной съемке и в практике абсолютных наблюдений магнитных обсерваторий.

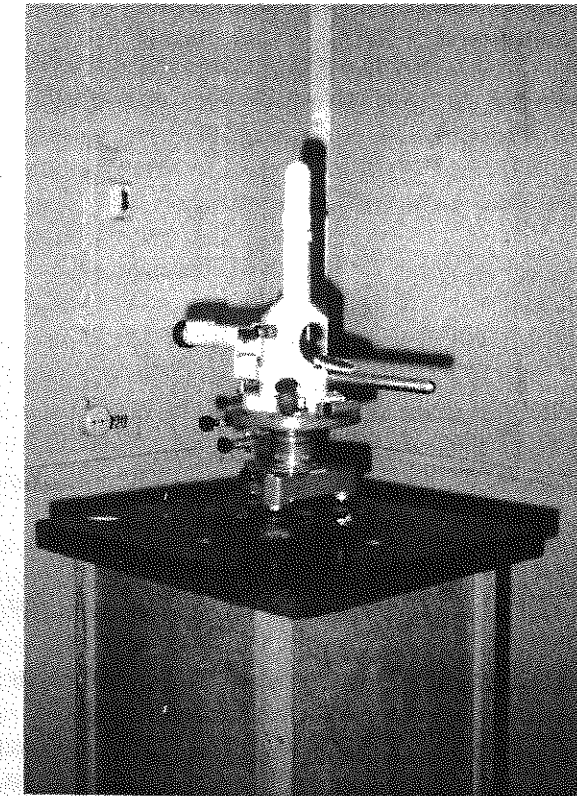


Рис. 4.15. Кварцевый магнитометр QHM (фото С. Нечаева).

Кварцевый магнитометр QHM (рис. 4.16) представляет собой упрощенную конструкцию классического магнитного теодолита. Основным узлом прибора является кварцевая нить 5 с чувствительной системой из зеркала 2, магнита 7 и слюдяной пластинки 8 воздушного демпфера колебаний. Зрительная автоколлиматорная труба 1 необходима для определения углов положения чувствительной системы и направления на астрономическую мишу. Термометр 3 служит для учета температурной поправки при измерениях горизонтальной компоненты ГМП. Узел регулировок 4 предназначен для раскручивания кварцевой нити и для вертикального перемещения чувствительной системы под лапки 6 арретира. Теодолитный гори-

горизонтальный круг 9 необходим для угловых измерений. Кварцевая нить длиной около 200 мм и толщиной от 5 до 25 мкм имеет на концах «слезки» для закрепления ее с помощью шеллачного клея в посадочных местах головки узла регулировок и чувствительной системы. В классических магнитных теодолитах нить раскручивают с помощью немагнитной болванки, которую подвешивают вместо магнита. Такой метод очень трудоемок, но зато обеспечивает получение ничтожно малых углов закручивания ψ . В магнитометре QHM магнит несъемный и поэтому применяется метод закручивания нити вращением корпуса магнитометра в одну и в другую сторону на один оборот. При этом магнит занимает два положения равновесия:

$$M \cdot H \cdot \sin \theta_1 = q \cdot (\psi + 2\pi) \quad (4.13)$$

$$M \cdot H \cdot \sin(-\theta_2) = q \cdot (\psi - 2\pi) \quad (4.14)$$

где: M – магнитный момент магнита,
 H – горизонтальная компонента геомагнитного поля,
 q – коэффициент кручения кварцевой нити,
 ψ – угол закрученности нити.

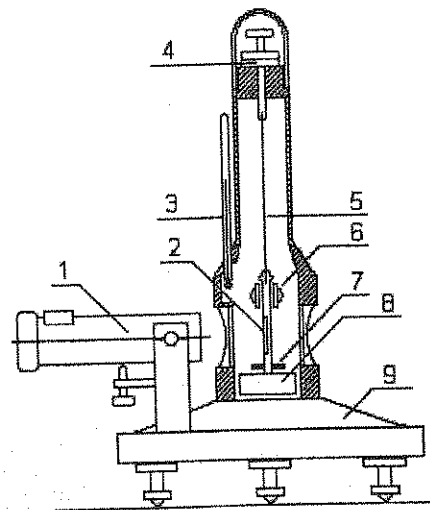


Рис. 4.16. Конструкция магнитометра QHM.

Отсюда можно найти угол, на который закручена нить:

$$\psi = 2\pi \cdot \tan[(\theta_1 - \theta_2)/2] / \tan[(\theta_1 + \theta_2)/2]$$

При юстировке инструмента поворотом головки кварцевой нити этот угол уменьшают до минимального, добиваясь равенства углов отклонения $\theta_1 \approx \theta_2$. Раскручивание нити проводят в магнитоспокойные дни. Систематическую погрешность закрученной нити определяют по формуле:

$$\Delta D \approx \{[(\theta_1 - \theta_2)/2] \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)/2\} / [1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)/2]$$

Магнитометр QHM не является абсолютным инструментом и поэтому он нуждается в регулярной сверке с образцовым магнитометром.

4.4.1. Измерения склонения D и горизонтальной компоненты H

Магнит, подвешенный на раскрученной нити, занимает положение строго в плоскости магнитного меридиана. Угол D между магнитным и астрономическим меридианами определяется с помощью наблюдения миры, азимут A которой известен из астрономических наблюдений.

$$D = \theta_m - \theta_g = \theta_m - (\theta_M - A),$$

где: θ_m – отсчет горизонтального лимба положения на круге магнитного меридиана, θ_g – положение на круге теодолита географического меридиана, θ_M – отсчет горизонтального лимба при наведении зрительной трубы на миру, A – азимут миры, определенный из астрономических наблюдений.

Источники погрешности QHM заложены в упрощенной конструкции прибора. Если в классическом магнитном теодолите ошибка коллимации зеркала компенсируется поворотом магнита с зеркалом вокруг его оси на 180° , то в QHM она принимается как постоянная приборная поправка ΔD_k , которая в зависимости от качества сборки чувствительной системы может составлять от единиц до нескольких десятков угловых минут. Вторая ошибка связана с остаточной закрученностью нити на угол ψ . Тогда положение равновесия магнита будет определяться формулой:

$$M \cdot H \cdot \sin \Delta D_\psi = q \cdot \psi$$

Суммарная приборная поправка при измерении склонения ΔD определяется во время сверки QHM с абсолютным (напр., феррозондовым) деklinометром.

При повороте корпуса кварцевого магнитометра вокруг вертикальной оси от магнитного меридиана на n оборотов в одну, а потом в другую сторону магнит под действием горизонтальной компоненты геомагнитного поля и момента кручения нити займет два положения равновесия согласно формулам (4.13) и (4.14). Решая совместно эти уравнения, определяем значение горизонтальной компоненты H :

$$H = (2\pi \cdot q/M) / \sin[(\theta_1 + \theta_2)/2] = G / \sin[(\theta_1 + \theta_2)/2] \quad (4.15)$$

Допустимое число оборотов n зависит от толщины кварцевой нити и магнитного момента магнита. При этом угол θ должен быть в диапазоне от 40° до 60° . Стремление увеличить этот угол может привести к срыву положения равновесия и к многократному перекручиванию нити. В этой ситуации потребуется кропотливая работа по восстановлению положения раскрученной нити. Число оборотов n , – это постоянная каждого магнитометра QHM.

Погрешность измерения H определяется погрешностью измерения углов на горизонтальном круге: $\Delta H = H \cdot \text{ctg} \theta \cdot \Delta \theta$. Магнитометры QHM обычно имеют лимб с разрешением 0.5 угловой минуты, что в средних широтах позволяет измерять H с основной погрешностью около 2 нТл. Кроме основной погрешности, магнитометр QHM имеет ряд дополнительных погрешностей за счет влияния температурных коэффициентов μ , а также из-за индукционного коэффициента магнита ν . С учетом этих факторов коэффициент преобразования магнитометра (постоянная прибора) равен:

$$G = G_0 \cdot [1 + \mu \cdot (t - t_0) - \nu \cdot H \cdot \cos \theta].$$

Обычно определяется только суммарный температурный коэффициент μ , который может вносить существенную поправку в измерения H . Индукционный коэффициент ν определяют только для экспедиционных инструментов в большой колечной установке. Переопределение постоянных QHM необходимо осуществлять через каждые 3-5 лет путем сверки его с образцовыми абсолютными магнитометрами.

4.4.2. Методика проведения наблюдений D и H

- Произведите по уровню нивелировку кварцевого магнитометра QHM.
- Снимите крышку заднего окна корпуса прибора.
- Винтом аретира освободите чувствительную систему.

- Произведите наведение зрительной трубы на мирю и снимите отсчеты n_{M1} и n_{M2} первого и второго нониусов лимба горизонтального круга.
- Закройте крышку заднего окна корпуса и произведите наведение на зеркальное отражение шкалы автоколлиматора.
- После успокоения колебаний магнита зафиксируйте время и снимите отсчеты n_{m1} и n_{m2} положения магнитного меридиана на круге магнитометра.
- Плавно поверните корпус магнитометра на n оборотов по часовой стрелке.
- С помощью оптической трубы произведите наведение на изображение шкалы.
- Зафиксируйте время и снимите отсчеты θ_1 лимба горизонтального круга.
- Плавно поверните корпус магнитометра против часовой стрелки на $2n$ оборотов.
- Произведите наведение на магнит, зафиксируйте время и снимите отсчет θ_2 .
- Повторите предыдущие операции с вращением корпуса магнитометра.
- Поверните прибор в исходное положение, проверьте нахождение оси магнита в плоскости магнитного меридиана.
- Зафиксируйте время наблюдения склонения и снимите отсчеты n_{M3} и n_{M4} .
- Откройте окно корпуса и винтом аретира зафиксируйте систему магнита с зеркалом.
- Произведите повторное наблюдение мирю n_{M3} и n_{M4} .

Примечание. По окончании работы с магнитометром необходимо всегда контролировать фиксацию аретиром чувствительной системы прибора во избежание обрыва кварцевой нити при переносе прибора.

Данные наблюдений занесите в бланк электронной таблицы.

Таблица 4.7

Кварцевый магнитометр QHM N156		Go= 13918	$\mu(t)$ нТ/°С= 0	$\Delta D' = -0.1$					
Дата 10.12.02	Наблюдатель Талалаевская	Поправки на столб N0		$\Delta D' = 0.1$ ΔH нТ= 2					
Время t °С	Положение	Град.	Верньер	Средние (мин.)					
	Мира	222	23.0 22.0	13342.5					
01:00	М. меридиан	224	3.0 2.5	13442.8					
01:04	+2π	271	10.0 8.5	16269.3					
01:08	-2π	176	57.0 56.0	10616.5					
01:10	-2π	176	57.5 56.5	10617.0					
01:15	+2π	271	10.0 8.5	16269.3					
01:19	М. Меридиан	224	3.5 2.5	13443.0					
	Мира	222	22.5 22.0	13342.3					
Вычисления:	D' = -152.5	H нТ=19000.3							
Вариометры:	Время	D _{kv}	H _{kv}	D _{nvs}	H _{nvs}	D _A мм	H _A мм	t °С	$\mu(t)$ нТ/°С
	01:00	-18.4		3.3		-8.6		15.4	0.18
	01:04		6.7		34.1		19.5		
	01:08		7.2		34.5		19.6		
	01:10		7.5		34.7		19.6		
	01:15		7.0		34.3		19.4		
	01:19	-18.1		3.6		-7.6			
Итог:	Дата	Поле	Базисные: Kv		NVS	A			
D ₀	10.12.02	-152.5			-134.2	-156.0		-149.5	
H ₀	10.12.02	19000.3			18993.2	18965.9		18939.7	

Макрос закрытия файла

4.5. Рекомендации по абсолютным наблюдениям

4.5.1. Прямые и косвенные измерения

Современная магнитная обсерватория может иметь минимальный комплект абсолютных магнитометров, состоящий из протонного магнитометра с разрешающей способностью 0,1 нТл (или протонной вариационной станции) и феррозондового деклинометра/инклинометра с ценой деления горизонтального и вертикального лимбов 1 или 6 угловых секунд. С помощью этих инструментов измеряются модуль вектора геомагнитного поля F , склонение D и наклонение I . Остальные элементы рассчитываются по известным формулам:

$$H = F \cos I, Z = F \sin I, X = F \cos I \cos D, Y = F \cos I \sin D$$

Возможен другой вариант минимального комплекта абсолютных приборов, состоящий из протонного магнитометра с колечной установкой и феррозондового деклинометра. С помощью этих приборов производятся измерения F , вертикальной или горизонтальной компонент Z (или H) и склонения D . Остальные элементы также рассчитываются по известным формулам:

$$H = (F^2 - Z^2)^{1/2}, \text{ или } Z = (F^2 - H^2)^{1/2}, X = H \cos D, Y = H \sin D \quad (4.16)$$

Векторные измерения геомагнитного поля протонным магнитометром и измерения углов склонения и наклонения феррозондовым деклинометром/инклинометром относятся к категории прямых измерений, погрешность которых определяется инструментальной точностью магнитометров (если не учитывать дополнительные случайные погрешности наблюдений). Остальные компоненты ГМП определяются косвенным методом с помощью соответствующих вычислений. При косвенных измерениях искомая величина B является функцией одной или нескольких переменных. Например, $B = f(F, D, I)$. Тогда погрешность определения B зависит от погрешностей измерения этих переменных, их величины и применяемых методов расчетов.

Базисные уровни вариометров обычно определяются по достаточно длинному ряду абсолютных наблюдений. Поэтому целесообразно производить оценку средней квадратической погрешности измерений σ косвенных измерений с помощью частных производных по каждой переменной B :

$$\sigma_B = [(dB/dF)^2 \sigma_F^2 + (dB/dD)^2 \sigma_D^2 + (dB/dI)^2 \sigma_I^2]^{1/2}.$$

Если горизонтальная и вертикальная компоненты геомагнитного поля определяются с помощью наблюдений на феррозондовом инклинометре, то средние квадратические погрешности таких измерений определяются по формулам:

$$\sigma_H = [(F \sin I \Delta I)^2 + (\cos I \Delta F)^2]^{1/2}$$

$$\sigma_Z = [(F \cos I \Delta I)^2 + (\sin I \Delta F)^2]^{1/2},$$

где $\Delta F, \Delta I$ – инструментальные погрешности прямых измерений F и I .

Применяя в геомагнитном поле Иркутска протонный магнитометр с инструментальной погрешностью $\Delta F = 0,1$ нТл и феррозондовый инклинометр с $\Delta I = 0,1'$, ожидаемые средние квадратичные погрешности измерений горизонтальной и вертикальной компонент составят: $\sigma_H = 1,7$ нТл, $\sigma_Z = 0,6$ нТл.

Если горизонтальная и вертикальная компоненты геомагнитного поля определяются с помощью колечной установки, то средние квадратические погрешности таких измерений определяются по формулам:

$$\sigma_H = \{[(F/H) \cdot \Delta F]^2 + [(Z/H) \cdot \Delta H]^2\}^{1/2},$$

$$\sigma_Z = \{[(F/Z) \cdot \Delta F]^2 + [(H/Z) \cdot \Delta Z]^2\}^{1/2}.$$

Применяя в Иркутске горизонтальную колечную установку с протонным магнитметром, имеющими погрешности $\Delta F = 0,1$ нТл и $\Delta Z = 0,5$ нТл, ожидаемая погрешность измерений горизонтальной компоненты составит $\sigma_H = 1,8$ нТл.

Таким образом, в средних широтах колечная установка с протонным магнитметром по точности компонентных измерений не уступает феррозондовому инклинометру. В высоких и экваториальных широтах феррозондовый инклинометр даст более точные определения H или Z . Высокие требования к точности нивелировки одинаковы и для колечной установки и для феррозонда, но производство наблюдений на первом инструменте существенно проще и меньше вероятность появления случайных ошибок при отсчетах наблюдателем показаний цифрового индикатора или лимбов и микроскопов теодолита.

Поэтому среднеширотной обсерватории целесообразно иметь универсальный комплект абсолютных инструментов, состоящий из протонного магнитметра с колечной установкой и феррозондового деклинометра/инклинометра. Измерения, производимые различными методами и разными инструментами, повышают достоверность данных обсерватории.

Если вариометры установлены по географическому меридиану, то они регистрируют вариации X , Y , Z . В первом приближении базисные значения вариометров X_0 , Y_0 , Z_0 определяются по средним значениям отсчетов абсолютных наблюдений:

- феррозондовым деклинометром/инклинометром и протонным магнитметром:

$$X_0 = F \cdot \cos I \cdot \cos D - dX, Y_0 = F \cos I \cdot \sin D - dY, Z_0 = F \cdot \sin I - dZ,$$

или колечной установкой и деклинометром:

$$X_0 = (F^2 - Z^2)^{1/2} \cdot \cos D - dX, Y_0 = (F^2 - Z^2)^{1/2} \cdot \sin D - dY, Z_0 = Z - dZ,$$

где F , I , D и Z – измеренные значения элементов по абсолютным наблюдениям, dX , dY и dZ – средние данные вариометров во время проведения абсолютных наблюдений.

В связи с тем, что наблюдения склонения и наклонения разнесены во времени, для повышения точности определений базисных значений Z Рассон рекомендует использовать данные по вариациям Z , чтобы осуществить привязку наблюдений F и I к моментам измерения склонения. Определив из наблюдения Z_0 , можно вычислить значения горизонтальной компоненты H на моменты T_i наблюдений склонения:

$$H_i = [F_i^2 - (Z_0 + dZ_i)^2]^{1/2}$$

Только теперь на основе формул (4.16) можно определить X_0 , Y_0 :

$$X_{0i} = H_i \cos D_i - dX_i, Y_{0i} = H_i \sin D_i - dY_i$$

Если феррозондовые или кварцевые вариометры с глубокой обратной связью установлены по магнитному меридиану, то их базисные значения вычисляются (в зависимости от методов наблюдений) по следующим формулам:

$$H_0 = F \cdot \cos I - dH, D_0 = D - dD, Z_0 = F \cdot \sin I - dZ, \\ H_0 = H - dH, D_0 = D - dD, Z_0 = Z - dZ$$

Базисные уровни вариометров определяются в результате ряда наблюдений путем вычисления средних базисных значений до десятых долей нТл при условии, что в течение длительного времени не отмечался явный тренд базисных значений вариометров. В противном случае, необходимо проводить интерполяцию ряда многодневных определений базисных значений вариометров.

Кварцевые магнитометры QHM, которыми располагают многие обсерватории, могут применяться для проведения полевых измерений, а также использоваться в качестве запасных инструментов. Поэтому с целью контроля систематических поправок QHM и сохранения навыка работы на этих магнитометрах рекомендуется проводить эпизодические наблюдения D и H .

Любое средство измерений не застраховано от изменения его основных параметров и поэтому нуждается в эпизодической поверке. История магнитных наблюдений знает немало случаев ошибочных обсерваторских данных, которые выявлялись лишь через несколько лет. С целью взаимного контроля систематических погрешностей магнитометров и для сохранения непрерывности ряда наблюдений в случае отказа одного из инструментов каждой обсерватории следует иметь дублирующий комплект магнитометров, которые должны регулярно применяться при абсолютных измерениях. Кроме того, для уменьшения субъективной погрешности наблюдателя традиционно рекомендуется иметь в штате обсерватории не менее двух квалифицированных магнитологов, которые поочередно проводят наблюдения.

4.5.2. Рекомендации наблюдателю

Все магнитометры, кроме протонного магнитметра, нуждаются в устойчивых немагнитных постаментах (столбах). Практика показывает, что магнитометры работают более качественно, если каждый из них установлен стационарно на своем постаменте и в павильоне поддерживается постоянная температура. Обрывы соединительных кабелей и поломки магнитометров чаще всего связаны с неаккуратным перемещением инструментов. При отсутствии термостабилизации абсолютного павильона в зимнее время создаются значительные перепады температуры, которые приводят к взаимному смещению элементов высокоточных узлов, коррозии и короблению деталей инструментов.

Если исходить из минимального комплекта магнитометров, то абсолютный павильон должен иметь один или два приборных постамента. Учитывая наличие дублирующих обсерваторских магнитометров, а также возможность приобретения новых инструментов и необходимость в проведении сверок магнитометров сторонних организаций, в абсолютном павильоне необходимо иметь дополнительные приборные постаменты.

Как правило, один из постаментов принимается за основной, – обычно тот, на котором установлен деклинометр/инклинометр или колечная установка. Наблюдения на других столбах привязываются к основному постаменту, для чего нужно знать градиенты геомагнитного поля между столбами. Определение «поправки на столб» рекомендуется производить в магнитоспокойные дни после окончания летне-осеннего сезона, т.к. в этот период обычно повышается риск изменения магнитной обстановки на территории и в павильонах обсерватории. Для определения градиентов ГМП наблюдения производятся основным и дублирующим магнитометрами одновременно на двух постаментах. После каждой серии наблюдений магнитометры меняются местами. Если нет возможности проводить наблюдения двумя магнитометрами, то следует после переустановки магнитометра на разные столбы тщательно фиксировать время произведенных отсчетов и вводить в измерения поправки на вариацию на основе данных магнитовариационной станции. Как правило, пять-шесть серий наблюдений

ний на каждом столбе дают достаточно надежный результат по определению поправок «на столб». В тех случаях, когда новые поправки отличаются от старых, необходимо провести контрольные наблюдения разностей показаний между основным постаментом абсолютного павильона и наружным абсолютным столбом. Никогда нельзя исключать возможность внесения в абсолютный павильон ферромагнитных изделий или появления в непосредственной близости от павильона ферромагнитных масс.

При работе с абсолютными магнитометрами могут появиться люфты в винтовых опорах инструментов, которые приводят к большим разбросам в наблюдениях. Проверить состояние опор можно по показаниям магнитометра, прилагая разумные вращательные усилия к основанию инструмента. Если показания при этом будут синхронно изменяться, необходимо произвести затяжку гаек всех винтовых опор или найти и устранить другие источники люфтов (напр., в креплении столешницы к столбу).

Перед абсолютными наблюдениями следует убедиться в отсутствии на территории около павильонов и внутри абсолютного павильона каких-либо случайно оставленных железных изделий или инструментов. Тетрадь для записей отсчетов, часы, калькулятор должны находиться на расстоянии не менее двух метров от магнитометра на специальном немагнитном столике. При записях лучше пользоваться обычным карандашом, т.к. нередко с ним в руках наблюдатель подходит к магнитометру для снятия отсчетов.

Наблюдатель перед работой с магнитометром должен всегда проверять у себя отсутствие магнитных изделий (очки, ключи, часы, авторучки, железные крючки и пуговицы на одежде, стальные закладки в подошве обуви и т.п.), а во время производства операций с инструментом не использовать приборный столб в качестве опоры для рук.

При производстве абсолютных наблюдений следует руководствоваться старым золотым правилом, — никто не имеет право во время наблюдений находиться около павильонов и заходить в вариационный павильон. Чтобы исключить сомнения в качестве измерений, не следует одновременно с наблюдениями проводить какие-либо дополнительные работы на территории, прилегающей к абсолютному и вариационному павильонам.

Если наблюдатель нарушил последовательность операций с магнитометром или обнаружил, что «покрутил не ту ручку» теодолита, то лучше прервать наблюдение и начать наблюдение заново, не пытаясь использовать предыдущие свои отсчеты.

В настоящее время магнитные обсерватории с помощью цифровых вариационных станций имеют возможность оперативного контроля состояния геомагнитного поля в реальном времени, что позволяет в периоды высокой магнитной активности отложить запланированные абсолютные наблюдения.

Для точной привязки (датирования) абсолютных наблюдений к данным вариометров в абсолютном павильоне полезно иметь специальную пусковую кнопку, которая включает цепь отметчика времени в моменты наведения магнитометра по полю. С этой целью в аналоговых вариационных станциях с фотозаписью рядом с основным осветителем устанавливается специальная лампочка абсолютных наблюдений, работающая в режиме коротких вспышек. В цифровых вариационных станциях желательно предусматривать служебный канал отметчика моментов абсолютных наблюдений или программно выделять соответствующие метки в канале регистрации температуры.

Эпизодически следует проверять устойчивость приборных постаментов (особенно деревянных столбов) и отсутствие контакта между постаментом и полом павильона. Для этой цели удобно использовать QHM, у которого чувствительный магнит на кварцевой нити достаточно долго успокаивается от передачи любого механического воздействия.

Настоятельно рекомендуется каждой магнитной обсерватории иметь специальный журнал регистрации всех замечаний по работе абсолютных магнитометров, их ремонту, замене на столбах, проведению ремонтно-строительных работ в абсолютном павильоне. Такие записи дают возможность обнаружить дату появления по каким-либо причинам ошибочных измерений и восстановить истинные значения геомагнитного поля.

5. РЕГИСТРАЦИЯ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Впервые вековые вариации склонения были обнаружены в 1634 г. Геллибрандом в Лондоне, а суточные вариации – в 1682 г. Ташаром в Сиаме. Сведения об изменчивости магнитного поля Земли вызвали потребность в организации непрерывных наблюдений этих вариаций. Сначала показания магнитных вариометров ежечасно считывались с оптических шкал, но уже с конца 19-го века на магнитных обсерваториях появились барабанные фоторегистраторы с непрерывной записью вариаций. Спектр частот вариаций геомагнитного поля (ГМП) лежит в очень широком диапазоне от 10 до 10^{-5} Гц и ниже с амплитудами от сотых долей нТл до нескольких тысяч нТл. Исторически сложилось, что мировая сеть магнитных обсерваторий регистрирует длиннопериодную часть (< 1 Гц) вариаций ГМП.

Самой большой проблемой при создании магнитных вариометров оказался вопрос стабильности базисного («нулевого») уровня приборов. Для регистрации вариаций в единицы нТл на фоне постоянного магнитного поля около 60000 нТл требовались приборы класса 0,00001 (0,001%), которые являются прецизионными в любой области измерений. Поэтому вплоть до середины 20-го века на мировой сети магнитных обсерваторий применялись вариометры конструкций Гаусса, Шульца, Тепфера, Эшенгагена, Эдельмана, Лакура, Яновского. Эти вариометры были однотипными по принципу действия, но различались исполнением узлов с целью повышения стабильности метрологических параметров приборов. В полной мере в те годы эта задача так и не была решена. Поэтому основное содержание работы наблюдателей магнитных обсерваторий заключалось в непрерывном контроле базисных уровней вариометров, которые могли дрейфовать до 20 нТл и более в течение суток.

В 60-е годы прошлого века разработки новых вариометров пошли двумя различными путями. В Канаде и Европе основные усилия были направлены на создание феррозондовых вариометров. В нашей стране в 1955 г. В.Ф. Шельтинг создал новый магнитостатический вариометр на основе кварцевой рамки. Эту работу продолжил В.Н. Бобров и довел конструкцию кварцевого вариометра до совершенства. Более того, он организовал серийный выпуск магнитовариационных станций и оснастил ими все обсерватории Советского Союза и стран социалистического лагеря.

Более 100 лет сохранялся принцип регистрации вариаций геомагнитного поля на фотобумажной ленте. Менялась только конструкция фоторегистраторов. Наиболее надежными в работе оказались суточные барабанные регистраторы с мощным часовым приводом и разверткой 20 мм/час. Появившиеся в конце прошлого века цифровые магнитовариационные станции использовали самые различные накопители цифровой информации: киноплёнки, перфоленты, магнитные ленты, дискеты, жесткие диски.

5.1. Кварцевые вариометры Боброва

В принципе вариометр с магнитом на кварцевых растяжках первым применил Ватсон в 1904 г. для измерения вертикальной компоненты геомагнитного поля, но нити он закрепил на металлической рамке и традиционно ввел ряд дополнительных элементов для настройки системы, что привело к нестабильности работы этого датчика.

В 1959 г. В.Н. Бобров создал вариометр на основе кварцевой рамки Шельтинга, в котором вся настройка магнитной системы производилась

кварцеводувом во время изготовления датчика (рис. 5.1). Чувствительный магнит из викаллы с кварцевым зеркалом 6 приваривается к кварцевым нитям 5, которые в свою очередь приварены к кварцевой рамке 1. Кварцевая рамка имеет два симметрично расположенных магнита 8, которые служат для компенсации измеряемой компоненты ГМП в объеме чувствительного магнита. К рамке приварено неподвижное зеркало 9, предназначенное для правильной установки вариометра и для получения базисной линии на магнитограмме. Рамка со всеми перечисленными элементами закрепляется в центре крышки 2 корпуса 4 вариометра.

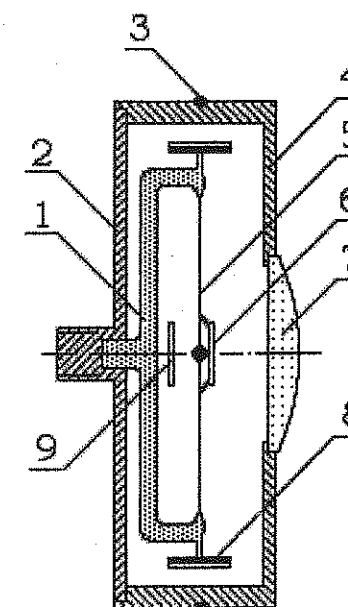


Рис. 5.1. Кварцевый вариометр Боброва.

Кварцевая рамка с чувствительным магнитом является универсальной для измерения вариаций любой компоненты геомагнитного поля. Линза 7 служит для фокусировки отраженных от зеркал лучей света на фотобумагу регистратора. Внутри корпуса вариометра перед его окончательной сборкой и герметизацией устанавливается стакан с силикагелем (на рисунке не показан) для осушения воздуха в объеме датчика. В наружный паз корпуса укладывается один виток изолированного провода 3 для градуировки вариометра. Датчики Боброва по сравнению со старыми вариометрами всех конструкций отличаются своей малогабаритностью и сравнительной простотой их инсталляции. Датчики Боброва слабо зависят от наклонов приборных фундаментов, обладают малыми температурными коэффициентами и имеют очень высокую стабильность базисного уровня. За высокие параметры приходится расплачиваться единственным ограничением, – каждый такой датчик изготавливается кварцеводувом только на определенное магнитное поле. Поэтому для экспедиционных работ нужно иметь набор датчиков, настроенных на различные поля.

Теория магнитных вариометров подробно разработана С.М. Мансуровым в 1957 г. (Труды НИЗМИР, вып. 12). Ниже будут рассмотрены только некоторые ее практические аспекты.

Условие равновесия магнита с моментом M , подвешенного на упругой нити или растяжках с коэффициентом кручения C в магнитном поле с индукцией B определяется в векторной форме: $[M \cdot B] = C \cdot \psi$, где ψ – угол закручивания нити.

В прямоугольной системе координат XY на горизонтальной плоскости получаем основную формулу равновесия магнита:

$$M_x \cdot B_y - M_y \cdot B_x = C \cdot \psi \quad (5.1)$$

Изменение индукции магнитного поля будет поворачивать магнит на угол $d\theta$, причем воздействие на магнит будет оказывать только проекция поля на нормаль к продольной оси магнита dB_{\perp} :

$$d\theta = [M/(C + M \cdot B \cdot \cos \psi)] \cdot dB_{\perp} \quad (5.2)$$

Коэффициент пропорциональности в этой формуле обычно называется чувствительностью (коэффициентом преобразования) магнитометра.

В первом частном случае, при котором ось магнита совпадает с направлением магнитного меридиана ($B_x = H$, $B_y = 0$, $\psi = 0$) и совпадает с осью X ($M_x = M$, $M_y = 0$), уравнение (5.2) приобретает следующий вид:

$$d\theta = [M/(C + M \cdot B)] \cdot dY, \text{ где } dY = H \cdot dD. \quad (5.3)$$

$$\text{Отсюда: } dD = [(C + M \cdot H)/M \cdot H] \cdot d\theta = G_D \cdot d\theta$$

Следовательно, угол поворота магнита θ пропорционален вариации склонения dD (рад). Обычно вариации склонения выражаются в угловых минутах и тогда коэффициент преобразования магнитометра G_D следует перевести из радиан в минуты:

$$dD' = (360 \cdot 60/2\pi) \cdot dD_{\text{рад}} = (360 \cdot 60/2\pi) \cdot dD_{\text{нтл}}/H_{\text{нтл}} \approx dD_{\text{нтл}}/H_{\text{нтл}} \cdot \sin 1', \quad (5.4)$$

где $2\pi/(360 \cdot 60) \approx \sin 1' = 0,000290888$.

Температурный коэффициент вариометра склонения обычно нулевой, т.к. $\mu_D = \mu_0 \cdot \text{tg } \varphi$, где φ – угол между осью магнита и направлением магнитного меридиана. Если измерения в температурном диапазоне покажут наличие температурного коэффициента у D -вариометра, то это означает, что он установлен с недопустимым отклонением от магнитного меридиана, либо на внешнюю шину вариометра поставлен магнит подстройки с большим температурным коэффициентом.

Во втором частном случае закручиванием кварцевой нити магнит устанавливается перпендикулярно магнитному меридиану ($\psi = 90^\circ$). Тогда уравнение (5.2) принимает вид:

$$d\theta = (M/C) \cdot dX = (M/C) \cdot dH. \quad (5.5)$$

$$\text{Отсюда: } dH = (C/M) \cdot d\theta = G_H \cdot d\theta.$$

В этом случае вариометр будет регистрировать вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Коэффициент преобразования имеет постоянную величину, определяемую магнитным моментом магнита и коэффициентом кручения нити. При этом, у H -вариометра будут заметно проявляться температурные коэффициенты магнита и нити:

$$G = G_0 \cdot (1 + \mu \cdot t) \quad (5.6)$$

С помощью дополнительных разнонаправленных магнитов (поз. 8, рис. 5.1), имеющих различные температурные коэффициенты, кварцевую добирается минимального значения $\mu \leq 1$ нТл/°С.

Кварцевые вариометры Боброва можно ориентировать не только по магнитному меридиану, но и по астрономическим координатам. Датчик D , установленный по направлению географического меридиана будет регистрировать вариацию dY , а датчик H в ортогональном направлении превратится X -вариометр.

$$dY = (C/M + H \cdot \cos D) \cdot d\theta = G_Y \cdot d\theta$$

$$dX = (C/M + H \cdot \sin D) \cdot d\theta = G_X \cdot d\theta$$

Чтобы кварцевая рамка выполняла функцию датчика вертикальной компоненты геомагнитного поля Z , ее нужно повернуть в горизонтальное положение нитей. В этом случае на чувствительный магнит, кроме воздействия момента вращения нити, будет действовать момент смещенного центра тяжести магнита. В общем виде уравнение равновесия магнита представится в виде:

$$M \cdot Z \cdot \cos \theta - M \cdot H_x \cdot \sin \theta = \pm C \cdot \psi + mgl \cdot \cos (\beta - \theta) \quad (5.7)$$

где: θ – угол между осью чувствительного магнита и горизонтальной плоскостью,

ψ – угол закручивания кварцевой нити,

M – магнитный момент чувствительного магнита,

m – масса магнита,

g – ускорение силы тяжести,

l – расстояние от центра тяжести магнита до его оси вращения,

β – угол между осью магнита и линией l ,

C – коэффициент кручения кварцевой нити,

Z – вертикальная компонента геомагнитного поля,

H_x – проекция на нормаль к оси магнита горизонтальной компоненты.

Для регистрации вертикальной компоненты геомагнитного поля центр тяжести магнита кварцевую смещается к южному полюсу на расстояние $l = MZ/mg$ и тогда ось магнита устанавливается в горизонтальной плоскости на раскрученных нитях.

Дифференциал формулы (5.7) с учетом, что $d\psi = -d\theta$ и $l \cdot \cos \beta = l_z$, представляет зависимость поворота магнита на угол $d\theta$ от воздействия на него вариации dZ :

$$dZ = \{[(m \cdot g \cdot l_z \pm C \cdot \cos \theta) / M \cdot \cos 2\theta] - H_x / \cos^2 \theta\} \cdot d\theta$$

Если магнит установлен строго горизонтально ($\theta = 0$), то формула упрощается:

$$dZ = \{[(m \cdot g \cdot l_z \pm C) / M] - H_x\} \cdot d\theta = G_Z \cdot d\theta \quad (5.8)$$

Следовательно, угол отклонения магнита $d\theta$ пропорционален вариации вертикальной компоненты геомагнитного поля dZ . Чтобы полностью исключить влияние горизонтальной компоненты H на коэффициент преобразования G_Z необходимо ось магнита установить по нормали к магнитному меридиану (тогда $H_x = 0$).

На работу вариометров вертикальной компоненты сказывается влияние температуры, т.к. магнит обладает коэффициентом линейного расширения, (что приводит к смещению центра тяжести магнита), собственным температурным коэффициентом магнитного момента и температурным коэффициентом кручения кварцевой нити:

$$G_Z = G_0 \cdot (1 + \mu \cdot t).$$

С помощью дополнительных магнитов на кварцевой рамке можно уменьшить суммарный температурный коэффициент датчика до минимального значения для определенного значения вертикальной компоненты геомагнитного поля.

Коэффициент преобразования G вариометров определяется методом создания магнитного поля образцовой величины в объеме чувствительного магнита. Для этой цели предназначено кольцо градуировки (поз. 3 рис.

5.1), в цепь которого подается ток известной величины. В центре кольца индукция магнитного поля градуировки определяется по формуле:

$$B_k = (628,5/R) \cdot I_k = C_k \cdot I_k,$$

где: B_k – индукция магнитного поля калибровки, нТл;

R – радиус кольца, мм;

I_k – ток калибровки, мА;

C_k – постоянная кольца калибровки, нТл/мА.

Для стандартных датчиков Боброва постоянная градуировочного кольца:

$$C_k = 12,7 \pm 0,1 \text{ нТл/мА}, (C_{kD} = 12,7/H \cdot \sin 1' \text{ угл. мин./мА})$$

Иногда для создания образцового поля B_k в объеме датчика применяется система колец Гемгольца из двух витков провода:

$$B_k = (900n/R) \cdot I_k = C_k \cdot I_k$$

где: n – число витков в одном кольце (обычно $n = 1$).

На практике при подаче тока в цепь градуировочного кольца измеряются отклонения светового луча на магнитограммах в мм или изменение выходного напряжения в мВ для вариометров с фотопреобразователем и поэтому коэффициент преобразования вычисляется по формулам:

$$G = C_k \cdot I_k / \Delta n \text{ нТл/мм}, \text{ или } G = C_k \cdot I_k / \Delta U \text{ нТл/мВ}$$

Вариометры Боброва имеют собственную частоту около 1 Гц, и поэтому практически без искажений регистрируют вариации с периодом более 10 сек.

5.1.1. Аналоговая магнитовариационная станция с фотозаписью

Комплект (серия) компонентных вариометров с регистратором называют вариационной станцией. Станции с фоторегистратором потребляют не более 0,4 Вт электроэнергии, просты в обслуживании и очень надежны в условиях непрерывной круглосуточной работы. Существенным недостатком этих станций является опасность засвечивания фотобумаги, необходимость в приготовлении растворов фотообработки, применение ручного труда при оцифровке аналоговых записей. Кроме того, во время магнитных бурь записи компонент на магнитограммах переплетаются, уменьшается их контрастность или они вовсе выходят за границы рабочего поля. Из-за этого очень часто терялась значительная часть ценнейшей информации.

В настоящее время, в связи с переходом на цифровые методы получения и обработки данных, эти станции славно завершают свой век. На обсерваториях и в центрах сбора геофизической информации хранятся сотни тысяч магнитограмм, которые уже дали и, благодаря сканирующим устройствам по оцифровке магнитограмм, могут еще дать исследователям неоценимую информацию о геофизических явлениях прошлого столетия, связанных с магнитным полем Земли.

Классическая вариационная станция (рис. 5.2) состоит из трех или четырех вариометров Боброва D , H , Z и F , оптического датчика температуры $t^{\circ}C$, регистратора 1, осветителя 4 и лампочки часовых марок времени 6. Регистратор состоит из барабана с фотобумажной лентой 5, часового привода 2 и фокусирующей цилиндрической линзы 3 в щели немагнитного светонепроницаемого корпуса.

Величина погрешностей регистрируемых вариаций поля в значительной степени зависит от правильной установки вариометров. Сначала приборный постамент следует проверить на немагнитность с помощью наблюдений кварцевым магнитометром QHM или феррозондовым инклин-

метром в различных точках на поверхности постамента. Применять протонный магнитометр для этой цели можно при условии размещения его датчика на расстоянии не ближе 10 см от постамента, т.к. сильное поле поляризации датчика может оставить на бетоне следы наведенной остаточной намагниченности. Градиенты поля в 2-3 нТл/м вполне удовлетворяют обсерваторским требованиям. С помощью буссоли на поверхности фундамента проводят линии магнитного меридиана и нормали к нему. На фокусном расстоянии линз датчиков (обычно 2 м) к северу от регистратора размещается вариометр горизонтальной компоненты H , который нивелируется по накладному уровню.

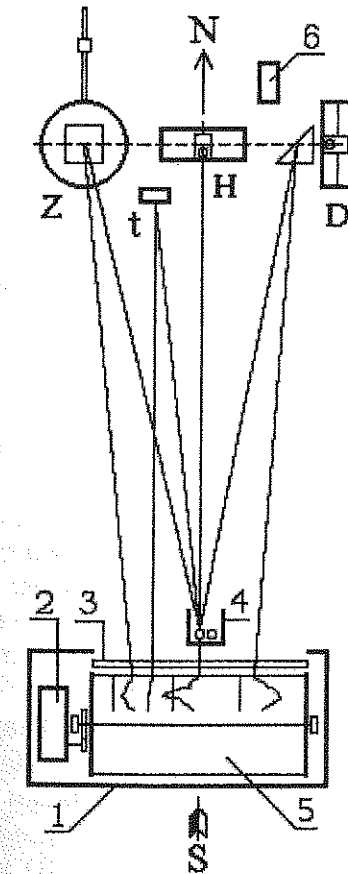


Рис. 5.2. Схема фотозаписи аналоговой магнитовариационной станции (МВС).

Дополнительным магнитом выводится подвижный световой блик («зайчик») на временный экран у регистратора. Небольшими поворотами корпуса вариометра относительно магнитного меридиана можно найти две точки совпадения подвижного зайчика и фикс-зайчика. Средняя точка этого отрезка является положением магнитного меридиана H -датчика и является ориентиром для окончательной установки зайчиков вариометра. Расстояние между зайчиками должно быть 3–4 см в сторону возрастания компоненты H . Возможность такого метода точной установки вариометра по нормали к магнитному меридиану обеспечивается тем фактом, что коэф-

коэффициент преобразования чувствительного магнита зависит от угла φ между его осью и направлением магнитного меридиана:

$$G_x = (C \pm M \cdot H \cdot \sin \varphi) / M \cdot \cos \varphi \approx G_H \cdot (1 \pm H \cdot \varphi / G_H).$$

Если H -вариометр точно установлен по нормали к магнитному меридиану ($\varphi = 0$), то данное выражение превращается в формулу (5.5).

Теперь следует зафиксировать пластилином подпятники вариометра. Подвижкой осветителя 4 и регистратора 1 добиваются попадания на линзу 3 примерно на середину барабана 5 зайчиков H -вариометра. Регистратор нивелируется по образующей барабана, а вертикальность кварцевой нити датчика проверяется по горизонтальности перемещения подвижного зайчика при воздействии на магнит вариометра какого-либо магнитного предмета.

Далее производят установку D -вариометра на расстоянии 20–30 см от H -вариометра по нормали к магнитному меридиану. Временно H -вариометр удаляется с подпятников. Для установки чувствительного магнита D -вариометра по магнитному меридиану, достаточно повернуть вариометр вокруг вертикали в такое положение, чтобы подвижный зайчик оказался в 3–4 см от неподвижного. Оптической призмой вариометра световые лучи направляются в щель регистратора. С помощью любого магнитного предмета проверяется горизонтальность перемещения подвижного зайчика по щели регистратора. После возвращения H -вариометра на подпятники чувствительный магнит D -вариометра может отклониться от магнитного меридиана. В этом случае на шину D -вариометра по нормали к магнитному меридиану устанавливается дополнительный внешний магнит подстройки, с помощью которого зайчик D возвращается в первоначальное положение.

Требования при установке H и D -вариометров относительно магнитного меридиана достаточно высоки из-за возможного влияния на точность регистрации вариаций ортогональной компоненты. Если обозначить угол отклонения оси магнита вариометра от магнитного меридиана через φ , то под действием вариаций геомагнитного поля магнит будет отклоняться на угол $d\theta$:

$$d\theta = (dD/G_D) \cdot [1 \pm (dH/dD) \cdot \operatorname{tg} \varphi] - \text{для } D\text{-вариометра,}$$

$$d\theta = (dD/G_H) \cdot [1 \pm (dD/dH) \cdot \operatorname{tg} \varphi] - \text{для } H\text{-вариометра.}$$

Можно принять, что в средних широтах вариации dH и dD близки по амплитуде и поэтому отношение $dH/dD \approx 1$. Тогда уменьшить воздействие поперечной компоненты на два порядка ($\operatorname{tg} \varphi \leq 0,01$) можно при условии установки D -вариометра по магнитному меридиану (или H -вариометра ортогонально к меридиану) с погрешностью менее 34 минут. При активной вековой вариации склонения в 4–6 мин/год на обсерватории необходимо через каждые 5–10 лет производить переустановку D и H -вариометров согласно новому положению магнитного меридиана на приборном постаменте.

Вариометры вертикальной компоненты Z выпускались в двух вариантах, – с установкой его чувствительного магнита перпендикулярно магнитному меридиану и по направлению меридиана. Вторые встречаются значительно реже по причине более сложной технологии изготовления, но зато они практически не зависят от наклонов приборных постаментов. Как правило, Z -вариометр устанавливается с противоположной стороны от H -вариометра и нивелируется по накладному уровню. С помощью вертикального дополнительного магнита подвижный зайчик выставляется на

стандартное расстояние 3–4 см от фикс-зайчика в сторону увеличения вертикальной компоненты. Призма вариометра позволяет установить зайчики в щели регистратора. На показания Z -вариометра могут оказывать влияние вариации горизонтальных компонент, если ось магнита будет иметь отклонение от горизонтали на угол α . Если чувствительный магнит установлен по нормали к магнитному меридиану, то:

$$d\theta = (dZ/G_Z) \cdot [1 \pm (dD/dZ) \cdot \operatorname{tg} \alpha].$$

При установке чувствительного магнита Z -вариометра по магнитному меридиану:

$$d\theta = (dZ/G_Z) \cdot [1 \pm (dH/dZ) \cdot \operatorname{tg} \alpha].$$

Для средних широт вариации dD и dH превышают вариации dZ в 2–3 раза, что приводит к повышенным требованиям к точности установки Z -вариометра относительно горизонтальной плоскости (угол $\alpha \leq 15'$).

Определение температурных коэффициентов вариометров на обсерваториях обычно производят в дни спокойного состояния геомагнитного поля в холодное время года, когда при отключении обогрева вариационного павильона температура в кабине с вариометрами может снизиться до +5...+10 °С. Контроль температуры воздуха осуществляется по лабораторному термометру. В кабине дублирующей вариационной станции сохраняют стабильную температуру. Во время температурных испытаний производят серию абсолютных компонентных наблюдений ГМП. Диапазон изменения температуры в кабине должен быть не менее 20 °С. По результатам измерений определяется зависимость от температуры разностей показаний идентичных вариометров двух станций и базисных значений испытываемых вариометров по результатам серии абсолютных наблюдений. Если эти зависимости оказываются нелинейными, то причиной такого явления могут быть большие градиенты температуры в объеме кабины из-за слишком быстрого ее изменения. Постаменты, имеющие остаточную намагниченность, также могут вносить ошибки в результаты температурных испытаний вариометров. Поэтому рекомендуется проводить цикл температурных измерений в течение двух-трех суток, а остаточную намагниченность постаментов можно устранить только хирургическим методом бригадой строителей.

Ширина магнитограмм фоторегистраторов обычно составляет 200 или 280 мм при стандартной скорости развертки 20 мм/час. Поворот зеркала чувствительного магнита каждого вариометра на угол $d\theta$ приводит к линейному перемещению зайчика по образующей барабана на расстояние dn мм, причем $dn = L \operatorname{tg} (2 \cdot d\theta) \approx 2L \cdot d\theta$, где L – расстояние от вариометра до регистратора. Отсюда, $d\theta = dn/2L$ и формулы (5.3), (5.5), (5.8) для аналоговой вариационной станции принимают следующий вид:

$$dD = (G_D/2L) \cdot dn = \varepsilon_D \cdot dn, \text{ или } dD' = (\varepsilon_D/H \cdot \sin 1') \cdot dn = \varepsilon_D' \cdot dn$$

$$dH = (G_H/2L) \cdot dn = \varepsilon_H \cdot dn, \quad dZ = (G_Z/2L) \cdot dn = \varepsilon_Z \cdot dn,$$

где: $\varepsilon_D, \varepsilon_H, \varepsilon_Z$ – цены делений вариометров в нТл/мм

ε_D' – цена деления D -вариометра, в угл. мин/мм.

Цена делений вариометров принимается постоянной величиной без учета ее зависимости от амплитуды регистрируемых на магнитограмме вариаций геомагнитного поля. Меньше всего эта зависимость проявляется у D -вариометра:

$$\varepsilon_{Dx} = \varepsilon_D / \cos^2 d\theta \approx \varepsilon_D \cdot [1 + (dn/2L)^2]$$

При ширине фотобумаги 20 см и фокусном расстоянии вариометров 2 м максимальная поправка цены делений ε_D составляет $(dn/2L)^2 = 0,0025$, т.е. не превышает 0,25 %.

Для H-вариометра зависимость цены деления от амплитуды вариации горизонтальной компоненты выражается следующей формулой:

$$\varepsilon_{Hx} = \varepsilon_H \pm H \cdot \text{tg } d\theta \approx \varepsilon_H [1 \pm (H \cdot dn / 4\varepsilon_H L^2)]$$

Погрешность цены деления H-вариометра для Иркутской обсерватории (где $H = 19000$ нТл и $\varepsilon_H = 3$ нТл/мм) при вариации H на всю ширину магнитогаммы, составляет около 8%.

Для Z-вариометра имеем следующую формулу:

$$\varepsilon_{Zx} = \varepsilon_Z \pm Z \cdot \text{tg } d\theta \approx \varepsilon_Z [1 \pm (Z \cdot dn / 4\varepsilon_Z L^2)]$$

Погрешность цены деления в этом случае может достигнуть 25 %, но вариаций Z на всю ширину фотоленты в средних широтах практически не бывает.

Следовательно, для регистрации вариаций горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля с погрешностью 1 % необходимо применять два комплекта вариометров – с обычной ценой деления в 2–3 нТл/мм и грубой ценой деления в диапазоне 10–15 нТл/мм для регистрации магнитных бурь. Существовавшая практика применения дополнительных осветителей для расширения динамического диапазона регистрируемых вариаций одним комплектом вариометров приводила к значительным ошибкам при фотозаписи магнитных возмущений.

Следует отметить, что вариометры Боброва, имеющие оптический рычаг 2 м, с большой точностью устанавливаются по магнитному меридиану и по горизонтали. Поэтому при умеренных возмущениях геомагнитного поля станцию с фотозаписью можно применять в качестве контрольной при уточнении параметров блока вариометров цифровых станций.

Привязка записей на магнитограммах к мировому времени осуществляется кратковременным включением осветителя 6, который каждый час засвечивает ленту в виде тонких линий.

Из-за неравномерности развертки регистратора трудно определить моменты абсолютных наблюдений без создания специальных световых марок. Дополнительная лампочка в основном осветителе 4 служит в качестве отметчика времени каждого наблюдения в виде точек около записи вариаций и базисных линий.

После проявления каждая магнитограмма оформляется по стандарту Международного Центра сбора геофизической информации МЦД и представляет собой архивный материал для последующей цифровой обработки данных по вариациям геомагнитного поля.

Для обеспечения работы станции используется специализированный блок питания и управления БПУ (рис. 5.3), в состав которого входят следующие узлы:

- источник регулируемого стабилизированного питания осветителя 3,
- стабилизированный источник тока градуировки вариометров 2,
- ручной или автоматический коммутатор цепей градуировки вариометров 6,
- кварцевые часы 1,
- схема формирования часовых марок времени 5 и марок абсолютных наблюдений 4.

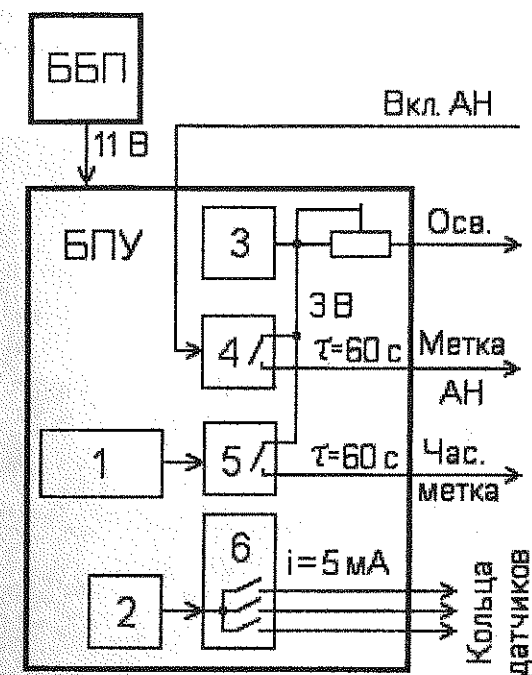


Рис. 5.3. Блок-схема пульта управления МВС.

Блок питания обычно размещается в тамбуре вариационного павильона или в техническом здании. Напряжение питания основного осветителя обычно изменяют в зависимости от чувствительности применяемой фотобумаги. Контроль цен делений датчиков достаточно производить ежеквартально и после каждой регулировки вариометров.

5.1.2. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем

С 50-х годов прошлого века начались работы по созданию вариометров с электрическим выходом. Но электронная техника тех лет не позволяла изготовить высокостабильный фотоэлектрический преобразователь для магнитостатических вариометров. Поэтому вариометры Б.Е. Брюнелли (1958 г.) и Н.Ф. Кротевича (1966 г.) из-за непрерывного дрейфа выходного напряжения более 2 нТл/час предназначались для регистрации только короткопериодных вариаций геомагнитного поля. Но эти работы дали толчок в интенсивных поисках методов преобразования угла поворота магнита вариометра в электрический сигнал. ИЗМИРАН и ААНИИ изготовили партию вариометров «видимой записи» с регистрацией вариаций геомагнитного поля самопишущими милливольтметрами. Современная интегральная электроника позволила создавать на базе датчиков Боброва стабильные вариометры с фотопреобразователями, которые совместно с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) образуют цифровые магнитовариационные станции обсерваторского уровня. В 1985 г. институтом геофизики Польской АН на базе полевой магнитовариационной станции «ИЗМИРАН-4» с кварцевыми датчиками Боброва была разработана высокостабильная фотоэлектрическая станция PSM, которая работала на обсерваториях Польши, Финляндии, Монголии. В 1986 г. Опытным заводом в Иркутске для полевых наблюдений была выпущена партия вариационных

станций МВС разработки С. Нечаева. Вариант такой станции НВС в комплекте с АЦП «ADAM» является дублирующей цифровой вариационной станцией Иркутской магнитной обсерватории (рис. 5.4).

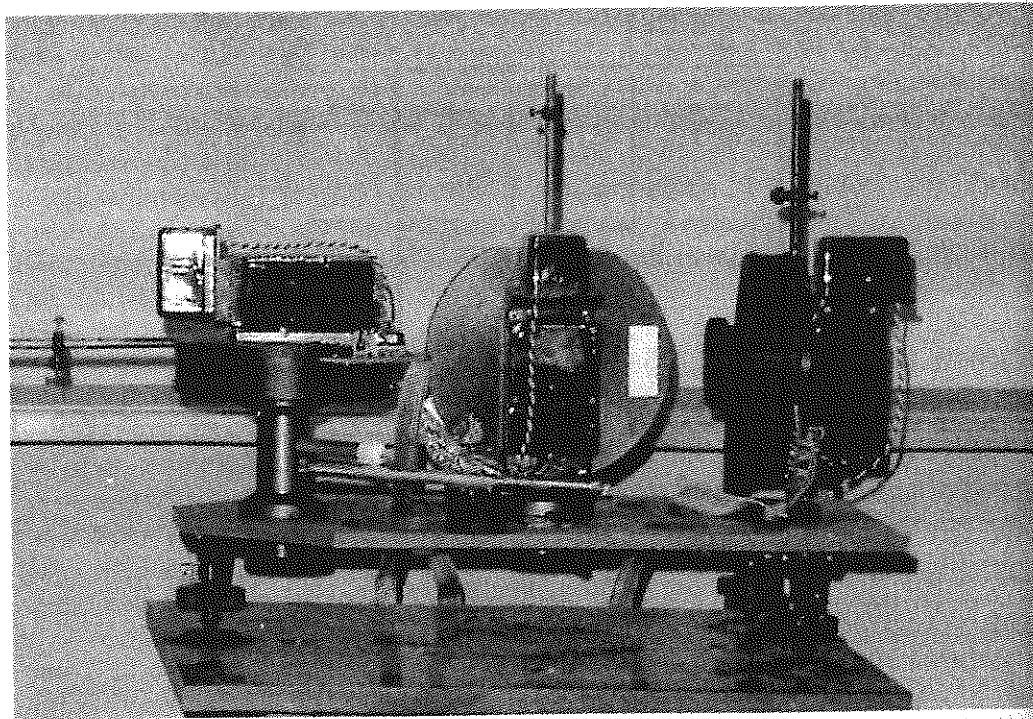


Рис. 5.4. Блок вариометров вариационной станции НВС (фото С. Хомутова).

В станции НВС вариометры имеют традиционную конструкцию: каждый магнитоэлектрический датчик Боброва имеет катушки обратной связи и фотоэлектрический преобразователь, изготовленный на базе фотогальванометра Ф-117. С целью экономии энергопотребления и повышения надежности станции вместо штатной лампы накаливания ОП4-4-2 мощностью 4 Вт в фотопреобразователе установлен сверхяркий светодиод с энергопотреблением 0,075 Вт. Трехщелевая диафрагма Ф-117, допускающая неопределенность в пяти устойчивых состояниях, заменена однооконной маской, изготовленной из немагнитного материала. Датчики D и H имеют поворотные стойки для их точной установки по отношению к направлению магнитного меридиана.

Схема одного канала вариационной станции НВС представлена на рис. 5.5. Светодиод 4 желтого свечения через конденсор 3 освещает окно диафрагмы 2. Световой поток отражается от системы зеркал 5 и зеркала 8 чувствительного магнита вариометра. Объектив 1 формирует изображение диафрагмы на маске 7 дифференциального фоторезистора 6. Поворот зеркала вариометра вызывает перераспределение площади засветки окон маски и пропорциональное изменение проводимости g_i половин фоторезистора. Если сопротивление нагрузки много больше сопротивления освещенного фоторезистора, то коэффициент преобразования фотоголовки с окнами маски размером h мм составляет:

$$G_p = (2U_0/h) \cdot (1 - g_i/g_*)$$

где: g_i — проводимость затемненной части фоторезистора, g_* — проводимость освещенной части фоторезистора.

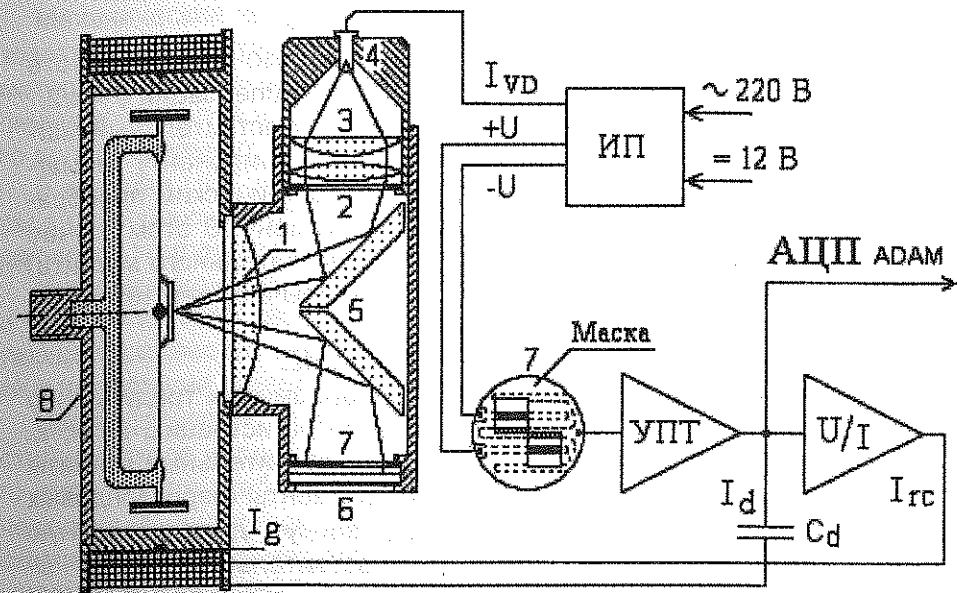


Рис. 5.5. Блок-схема станции НВС.

При повороте зеркала чувствительного магнита датчика на угол $\Delta\theta$ световой луч переместится на двойной угол и изображение диафрагмы сместится по маске фоторезистора на расстояние $x = 2\Delta\theta \cdot l$, где l — расстояние от зеркала датчика до фоторезистора. Выходное напряжение с фоторезистора равно:

$$U_x = G_p \cdot x = 2G_p \cdot l \cdot \Delta\theta.$$

Напряжение разбаланса с фоторезистора U_x поступает на вход инструментального усилителя УПТ с коэффициентом усиления K_1 . С выхода усилителя через фильтр низкой частоты ФНЧ с коэффициентом усиления K_2 сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь. Напряжение сигнала пропорционально углу отклонения чувствительного магнита вариометра:

$$U_0 = 2G_p \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \Delta\theta = G_u \cdot \Delta\theta.$$

Для повышения стабильности параметров вариометра и усилителя вводится общая обратная связь по магнитному полю с помощью катушки датчика с постоянной Q_0 . Преобразователь «напряжение — ток» U/I исключает влияние температуры на коэффициент передачи вариометра из-за изменения сопротивления медного провода катушки. Чувствительный магнит датчика в схеме с глубокой обратной связью по магнитному полю превращается в «нуль-индикатор». Коэффициент преобразования такого вариометра зависит от коэффициента k обратной связи: $G_0 = G_u / (1 + k \cdot G_u) \approx 1/k$. Т.к. в этой цепи имеются фазосдвигающие L - C элементы, а также инерционное звено чувствительного магнита с фотоэлементом, то система может оказаться неустойчивой вплоть до возникновения автоколебаний магнитной системы. Дополнительная дифференцирующая обратная связь по напряжению через емкость C и дополнительную обмотку датчика

препятствует возникновению таких автоколебаний благодаря необходимому сдвигу фазы ϕ демпфирующего тока:

$$\phi = \arctg(\omega L - 1/\omega C)/R_d \approx -\arctg 1/\omega R_d C,$$

где R_d – выходное сопротивление демпфирующей цепи.

Затухание колебаний будет оптимальным, если на резонансной частоте чувствительного магнита датчика ω_0 сдвиг фазы тока компенсации $\phi \approx \pi/2$.

Учитывая формулу (5.2), из которой следует, что чувствительный магнит датчика реагирует на перпендикулярную его оси компоненту геомагнитного поля, целесообразно вариометры с фотоэлектрическим преобразователем устанавливать по географическому меридиану. В этом случае два вариометра (в зависимости от направления чувствительного магнита) будут измерять компоненты X и Y , а третий, как обычно, вертикальную компоненту Z :

$$dU_x = G_x dX, dU_y = G_y dY, dU_z = G_z dZ.$$

В нашей стране на магнитных обсерваториях вариометры традиционно устанавливались по магнитному меридиану и вели регистрацию D , H , Z . Учитывая, что в вариометрах с обратной связью чувствительные магниты практически неподвижны (как и чувствительные элементы феррозондовых вариационных станций), вариации склонения внесут дополнительную ошибку в измерения D и H . На рис. 5.6 чувствительный магнит D -вариометра направлен по магнитному меридиану N_m и регистрирует ортогональную компоненту dD , вариации склонения dD , которую следует выразить в единицах индукции нТл. Ось магнита H -вариометра направлена по нормали к меридиану N_m и с учетом поля компенсирующих магнитов этот вариометр регистрирует проекцию горизонтальной составляющей $(H_0 + dH_v)$. Из рисунка следует, что при изменении склонения на угол dD вариометры с глубокой обратной связью будут измерять проекции вектора H на магнитные оси датчиков:

$$dH_v = H \cos dD' \text{ и } dD_{vнт} = H \sin dD'$$

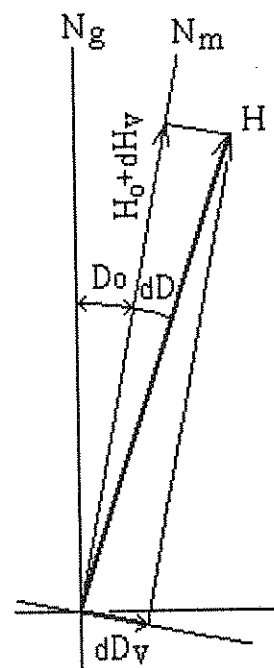


Рис. 5.6. Векторная диаграмма погрешностей регистрации D , H .

Погрешность регистрации горизонтальных компонент во время магнитных бурь можно исправить по формулам:

$$H = [(H_0 + dH_v)^2 + dD_{vнт}^2]^{1/2}, dD = \arcsin(dD_{vнт}/H) \quad (5.9)$$

Механические крепления оптических деталей и корпуса фотопреобразователя могут сказаться на нестабильности базисных значений вариометров. Электронные узлы, выполненные на базе прецизионных операционных усилителей и прецизионных резисторов, обычно не вносят заметного дополнительного вклада в температурные погрешности вариометров.

В станции НВС имеется дополнительный канал измерения температуры с разрешающей способностью $0,1^\circ\text{C}$, изготовленного на базе диодного датчика с температурным коэффициентом $-2,2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

Информационные сигналы по кабелю передаются в техническое здание и через блок грозозащиты ГЗ поступают на 4 входных канала АЦП, работающего совместно с персональным компьютером ПК первичной обработки и накопления данных.

Цепи фоторезисторов и диодного датчика температуры питаются от стабилизатора напряжения $\pm U_0$. Блок питания состоит из предварительного импульсного стабилизатора/преобразователя напряжения и параметрических стабилизаторов с выходными напряжениями $\pm 12 \text{ В}$ и $+5 \text{ В}$. Такая схема блока позволяет работать станции от сети 220 В ($\pm 10\%$) и от аккумуляторов $+12 \text{ В}$ ($\pm 25\%$) при достаточно высоком КПД (65%) и малом уровне импульсных помех ($< 1 \text{ мВ}$). Вариационная станция НВС разрабатывалась для работы с восьмиканальным 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем типа «ADAM» с установленной разрешающей способностью 1 мВ . Поэтому коэффициент преобразования вариометров станции НВС настраивался в диапазоне $0,08 \dots 0,1 \text{ нТл/мВ}$, что позволило регистрировать вариации геомагнитного поля с разрешением $0,1 \text{ нТл}$ в диапазоне $\pm 1000 \text{ нТл}$.

Температурные коэффициенты вариометров Иркутской НВС: $\mu_D = 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu_H = 1,2 \text{ нТл}/^\circ\text{C}$, $\mu_Z = 2,6 \text{ нТл}/^\circ\text{C}$.

Частотный диапазон измеряемых вариаций от постоянного поля до $0,1 \text{ Гц}$. Дрейф вариометров по результатам абсолютных наблюдений не превысил $\pm 2 \text{ нТл/год}$.

Зафиксирован один отказ выходного каскада усилителя Z -канала от грозового разряда молнии.

5.1.3. Цифровая вариационная станция Кварц-ЗЕМ

Надежная и стабильная цифровая вариационная станция Кварц-ЗЕМ была разработана в ИЗМИРАН на базе кварцевых магнитостатических датчиков Ю.А. Бурцева – Б.А. Белова (рис. 5.7).

Они отличаются от стандартных вариометров Боброва применением уголкового зеркального отражателя (рис. 5.8), который позволяет исключить влияние на нестабильность базисных уровней смещений фотопреобразователя, имеющего механическое крепление к корпусу датчика. Если зеркала 1 и 2 занимают строго взаимно перпендикулярное положение, то свет от щели диафрагмы излучателя 7, пройдя через фокусирующую линзу 3 и отразившись от зеркал, вернется обратно на излучатель. При этом, смещение фотоголовки не изменяет положения изображения диафрагмы. Если зеркало чувствительного магнита 2 отклонится на малый угол $\Delta\theta$, то появятся два изображения диафрагмы, которые сместятся на угол $4 \cdot \Delta\theta$ в

противоположные стороны от осветительной щели. Светоприемники 5 и 6 являются индикаторами положения зеркала и с помощью рассмотренной ранее обратной связи по магнитному полю могут удерживать зеркало с магнитом в этом положении.

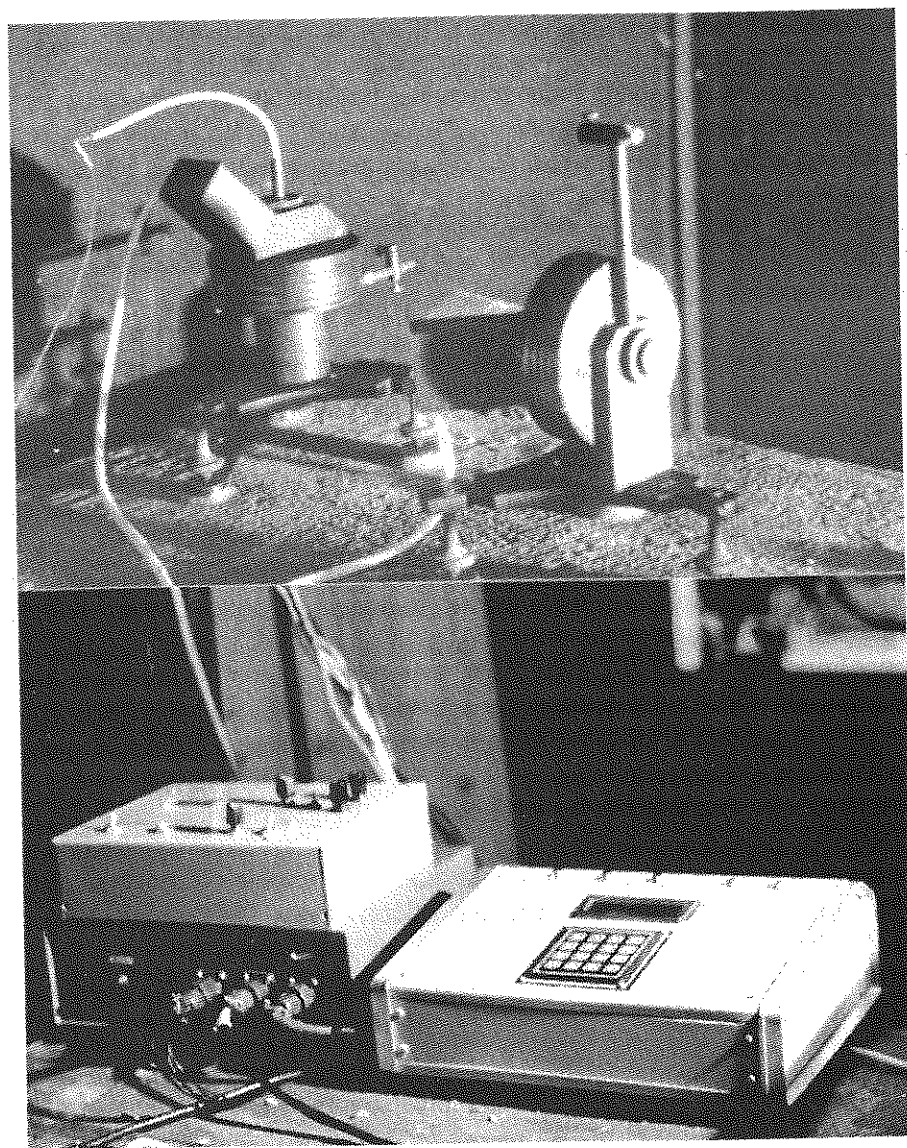


Рис. 5.7. Цифровая магнитовариационная станция Кварц-3ЕМ (фото С. Нечаева).

Следует заметить, что в данной системе есть второе устойчивое состояние при повороте зеркала в противоположном направлении на угол $\Delta\theta$, что может произойти, например, из-за временного отключения электропитания или из-за воздействия достаточно мощной электромагнитной помехи. Поэтому для сохранения однозначности положения чувствительного магнита, внутри корпуса датчика размещена специальная катушка, в которую при необходимости на короткое время можно подать ток начальной установки магнита.

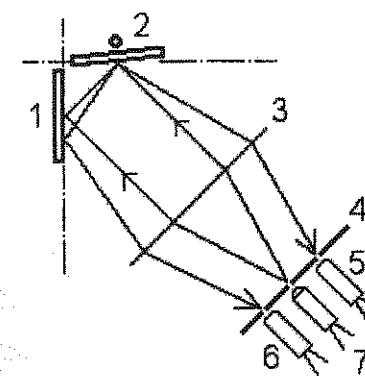


Рис. 5.8. Угловой фотоэлектрический преобразователь Кварц-3ЕМ.

Фотопреобразователи в вариометрах станции «Кварц» выполнены на светодиодах и фотодиодах инфракрасного диапазона излучения с вентиляльным режимом работы фотодиодов. Цифровая вариационная станция «Кварц-3ЕМ» состоит из комплекта трех вариометров, блока усилителей, пульта контроля и калибровки, блока аналого-цифрового преобразователя (АЦП), блока сбора и накопления цифровых данных (LOGGER). Измерение температуры в штатной комплектации станции не производится.

Фотодиоды имеют щелевые диафрагмы, соединены встречно-параллельно и подключены к входам прецизионного операционного усилителя сигнала разбаланса. После двухкаскадного усиления сигнал поступает на преобразователь «напряжение/ток» катушки обратной связи. Датчик Бурцева-Белова имеет одну катушку обратной связи L_1 (рис. 5.9) и поэтому для реализации дифференциального звена обратной связи на вход преобразователя сигнал подается через резистор R_1 и через цепочку C_1 - R_2 . Выходное напряжение этой схемы имеет зависимость от частоты сигнала:

$$U_{od} \approx [1 + j\omega C_1 \cdot (R_1 + R_2) / (1 + j\omega C_1 R_2)] \cdot (R_3 / R_1) \cdot U_x$$

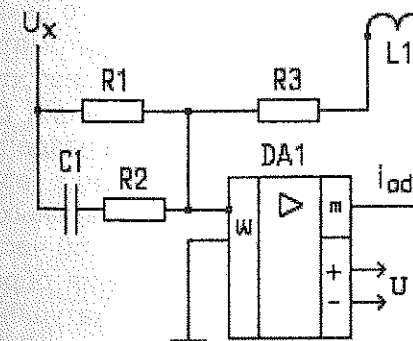


Рис. 5.9. Усилитель тока обратной связи Кварц-3ЕМ.

На высоких частотах фазовый сдвиг в такой схеме достигает 180° , что может привести к самовозбуждению в цепи ОС. Поэтому необходимо обеспечить рациональный выбор величины сопротивления R_2 для конкретного кварцевого датчика: $R_2 = 2 \cdot (R_3 / \omega_1 \cdot C_1)^{1/2}$, где ω_1 – частота единичного усиления ОУ. Тогда: $U_{od} \approx (-R_3 / R_1) \cdot U_x - C_1 R_3 \cdot dU_x / dt$.

Ток обратной связи определяется из выражения: $i_{od} = -U_x/R_1 - C \cdot (dU_x/dt)$. Одновременно напряжение U_x подается на фильтр низкой частоты 2-го порядка. Выходные напряжения трех измерительных каналов амплитудой до ± 10 В (что соответствует максимальным вариациям геомагнитного поля ± 1000 нТл) поступают на пульт контроля и на блок аналого-цифрового преобразователя.

Пульт контроля имеет свой АЦП, предназначенный для визуальной проверки работоспособности измерительных каналов. Кроме того, он позволяет контролировать ток в цепях градуировочных колец вариометров при определении коэффициентов преобразования G нТл/мВ. Пульт контроля имеет кнопку перезапуска вариометров, которая замыкает цепь катушек установки чувствительных магнитов вариометров в исходное положение.

Блок аналого-цифрового преобразователя каждую секунду опрашивает шесть каналов и преобразует аналоговые сигналы в 16-ти разрядные двоичные числа. Секундные данные вариаций геомагнитного поля собираются в среднeminутные значения, которые сохраняются в блоке накопления данных.

Блок сбора и накопления данных DATALOGGER имеет твердотельную память объемом 64 Кб, что позволяет работать станции около 60 часов без перезаписи накопленной информации в память персонального компьютера. В данном блоке имеются кварцевые часы с ручной установкой даты и времени, корректировки хода часов, выбора числа рабочих каналов, коэффициента умножения численных значений входных данных. Соответствующая информация выводится на контрольный дисплей. Связь между блоком накопления данных и персональным компьютером осуществляется через порт RS-232 с последовательным портом ПК.

Вариационная станция «Кварц-ЗЕМ» питается стабилизированным напряжением от сети 220 В и от 12-вольтовых аккумуляторов с потребляемой мощностью 3,6 Вт.

5.2. Феррозондовая магнитовариационная станция

Достижения в электронной технике конца 20-го века позволили создать достаточно стабильные феррозондовые магнитометры, которые оказались возможным применять на магнитных обсерваториях в качестве трехкомпонентных вариометров. Устройство и принцип работы феррозондовых магнитометров были рассмотрены ранее в разделе 4.3.

Для вариационной станции три феррозонда взаимно-ортогонально размещаются в едином блоке в центре ортогональных колец Гельмгольца. Обмотки колец служат для компенсации основной части соответствующей компоненты геомагнитного поля и для создания обратной связи по магнитному полю. Требования к изготовлению катушек очень высоки для обеспечения максимальной ортогональности их магнитных осей и минимального температурного коэффициента. Источник тока компенсации должен обеспечивать стабильность тока в кольцах менее 0,002 %/год, достичь которую еще 20 лет назад казалось недостижимой задачей.

К такому типу феррозондовых станций относится выпускаемая Датским метеорологическим институтом станция FGE и станция LEMI-008 Львовского центра института космических исследований (рис. 5.10).

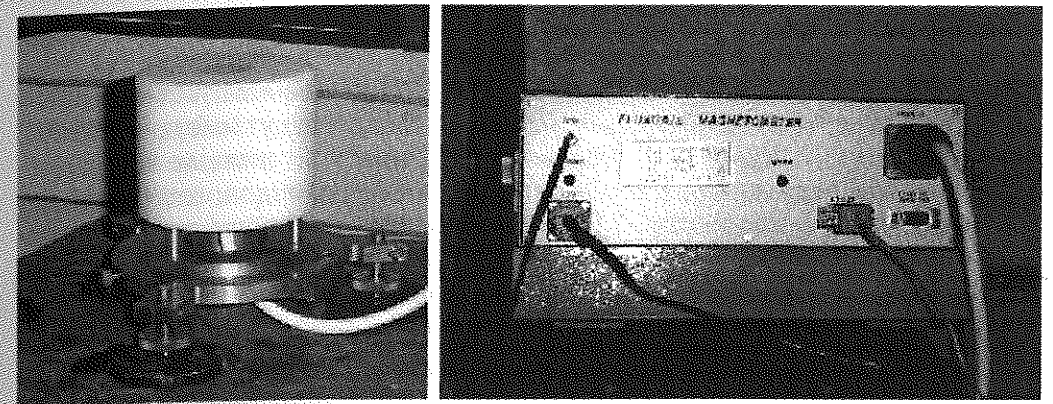


Рис. 5.10. Внешний вид феррозондовой ЦМВС Lemi-008 (фото С. Хомутова).

В отличие от магнитостатических датчиков, феррозондовые вариометры предъявляют повышенные требования к стабильности положения приборных фундаментов, т.к. базисные уровни датчиков изменяются от смещений магнитных осей датчиков на единицы угловых секунд.

Если феррозондовый вариометр имеет дрейф базисных уровней несколько десятков нТл в год из-за сезонных отклонений постамента, то рядом с таким вариометром желательно устанавливать регистрирующие наклонометры и датчики азимутального поворота фундамента. Информация с этих приборов позволит вводить необходимые компенсирующие поправки в данные вариаций компонент геомагнитного поля. Часть феррозондовых вариометров выпускается с блоком датчиков на бронзовых ленточных подвесах, обеспечивающих сохранение вертикального положения блока при небольших наклонах постамента (напр., модель FGE Датского метеорологического института). Такие вариометры имеют дрейф менее 3 нТл/год.

Установку блока датчиков начинают с тщательной нивелировки блока феррозондов. Затем необходимо скомпенсировать вертикальную компоненту геомагнитного поля так, чтобы канал Z показывал близкое к нулю значение поля. Вертикальность положения магнитной оси Z-датчика устанавливается по уровню и проверяется по сохранению показаний канала Z при поворотах блока феррозондов вокруг вертикальной оси. Феррозондовые вариометры чаще устанавливаются по географическому меридиану, но для этого нужно знать среднюю величину компоненты Y на приборном фундаменте вариационного павильона с помощью предварительных абсолютных наблюдений. При отключенной цепи компенсации Y-датчика следует найти такое положение блока датчиков, при котором канал Y покажет на выходе ожидаемое значение Y-компоненты геомагнитного поля. Это положение блока датчиков необходимо зафиксировать на постаменте. Теперь следует произвести компенсацию X и Y компоненты ГМП, контролируя показания соответствующего канала. Значения базисных уровней X_0 , Y_0 , Z_0 определяются расчетным путем с помощью абсолютных наблюдений.

При установке феррозондового вариометра по магнитному меридиану блок датчиков разворачивается вокруг вертикальной оси до получения нулевых показаний канала Y. Этот прием определения направления магнитного меридиана был рассмотрен ранее при описании работы феррозондо-

вого деklinометра. Датчик X в этом положении будет измерять вариации горизонтальной компоненты H геомагнитного поля. Регулировкой тока компенсации обеспечивают работу H -датчика в нулевом магнитном поле.

На практике магнитные оси каждого феррозонда будут иметь некоторое отклонение от истинного направления в декартовой системе координат. На рис. 5.11 представлена схема положения феррозондов, которые измеряют компоненты вдоль нормалей к своим магнитным осям, не совпадающих с направлениями компонент X , Y , Z . Предполагаем, что Y -феррозонд установлен строго перпендикулярно плоскости меридиана, но имеет некоторый технологический наклон магнитной оси к горизонтальной плоскости.

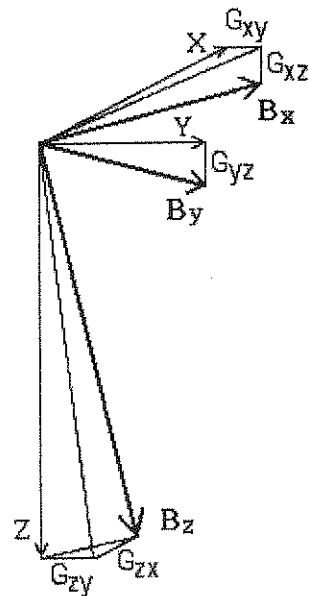


Рис. 5.11. Векторная диаграмма неортогональности магнитных осей феррозондовых датчиков.

Тогда можно записать следующие формулы, определяющие результат измерений компонент геомагнитного поля:

$$B_x = G_x \cdot dU_x = (X - X_k) + G_{xy} \cdot dY + G_{xz} \cdot dZ \pm X_0$$

$$B_y = G_y \cdot dU_y = (Y - Y_k) + G_{yz} \cdot dZ \pm Y_0$$

$$B_z = G_z \cdot dU_z = (Z - Z_k) + G_{zx} \cdot dH + G_{zy} \cdot dY \pm Z_0$$

где: X , Y , Z – компоненты геомагнитного поля,

X_k , Y_k , Z_k – поле компенсации компонент в датчике,

X_0 , Y_0 , Z_0 – поле смещенного нуля в канале вариометра,

B_i – измеренные значения компонент поля вариометром,

G_i – коэффициент преобразования канала вариометра,

U_i – показания измерительного канала вариометра,

G_{ik} – поправочные коэффициенты неортогональности осей феррозондов.

Обычно коэффициенты преобразования и поправочные коэффициенты даются изготовителем в паспорте на прибор. Если есть сомнения в точности этих постоянных или вариометр подвергался ремонту, то с помощью дополнительного оборудования или на основе данных абсолютных измерений и данных образцовой вариационной станции, можно не-

посредственно на обсерватории произвести переопределение всех постоянных.

Кроме катушки обратной связи блок датчиков имеет дополнительную обмотку грубой компенсации каждой компоненты геомагнитного поля. Компенсатор имеет в блоке электроники переключатель тока компенсации, что позволяет настроить станцию практически в любой точке северного полушария Земли. Для работы станции в южном полушарии необходимо изменить полярность тока компенсации с помощью специальных перемычек в схеме. Если станция устанавливается по магнитному меридиану, то цепь компенсации Y -датчика полностью отключается.

Феррозондовая вариационная станция имеет небольшие температурные коэффициенты, которые обычно приводятся в ее паспорте. В станции имеются два температурных датчика (в блоке феррозондов и в блоке электроники), которые позволяют вводить необходимые температурные поправки при обработке цифровых данных регистрируемых вариаций. Если приборный постамент имеет некоторую намагниченность, то он может повлиять на паспортное значение температурного коэффициента станции. Вероятно следует еще раз напомнить о специфической особенности геомагнитных измерений, которая заключается в воздействии на магнитометры локальных магнитных полей постамента, здания и предметов, находящихся вблизи датчиков. Поэтому настоятельно рекомендуется производить переопределение температурных коэффициентов станции непосредственно в вариационном павильоне.

Блок электроники желательно размещать в термостабильном помещении. После проверки на немагнитность его обычно ставят в непосредственной близости от станции. Выход электронного блока имеет 4 или 5 аналоговых каналов, из которых три являются информационными по вариациям компонент геомагнитного поля. Амплитуда аналоговых сигналов не превышает ± 10 В в частотном диапазоне от постоянного тока до 1 Гц. Энергопотребление блока электроники обычно не превышает 2 Вт.

К аналоговому выходу блока подключают многоканальный АЦП, напр., 8-ми канальный ADAM-4017, который имеет цифровой порт RS485, позволяющий размещать персональный компьютер в техническом здании на расстоянии до 1 км от вариационного павильона.

Феррозондовая вариационная станция LEMI-008 имеет два диапазона измерений: на 100000 нТл с разрешающей способностью 10 нТл и на 3200 нТл (0.1 нТл). Коэффициент преобразования аналогового выхода составляет 2 мВ/нТл в частотном диапазоне от нуля до 1 Гц. Компенсатор поля имеет 9-ступенчатую по 1000 нТл и плавную подстройку на ± 1000 нТл. Время усреднения отсчетов может задаваться в 1, 2, 5, 10, 60 с. Объем памяти 8 МБ. Паспортный температурный коэффициент не более 10 мВ/°С. Датчик температуры размещен в блоке феррозондов. Станция имеет вход антенны GPS и выход RS-232 для связи с персональным компьютером. Электропитание станции производится от аккумулятора 12 В, 0,2 А. Блок электроники феррозондов построен по типовой схеме, приведенной ранее на рис. 4.8.

Магнитовариационная станция MAG-386 фирмы Bartington (Англия) имеет некоторые принципиальные отличия от рассмотренной модели FGE. Блок датчиков имеет шесть кольцевых сердечников, размещенных в центре сферических ортогональных катушек обратной связи. Принцип работы феррозондов на кольцевых сердечниках был рассмотрен в разделе

4.3.1. Цепь обратной связи построена на принципе «цифрового слежения» с помощью 20-разрядного АЦП. Амплитудный диапазон станции от -11800 до 64800 нТл при разрешающей способности $0,1$ нТл и долговременной стабильности менее 3 нТл/год. Динамический диапазон – от постоянного поля до вариаций частотой $3,5$ Гц.

5.3. Вариационная станция с протонным магнитометром

В 50-х годах прошлого века Л. Олдридж создал автоматическую вариационную станцию на базе протонного магнитометра в колечной установке. Ежеминутно такая станция производила измерения склонения D , наклонения I и полной величины F индукции геомагнитного поля. Вариационная станция Олдриджа не получила широкого распространения из-за применения в ней сложной колечной системы и дорогостоящего оборудования сбора, обработки и регистрации данных.

Лишь после освоения промышленностью выпуска протонных магнитометров с цифровым стандартизованным выходом снова вернулись к идее применения протонного магнитометра для непрерывных измерений F в качестве контрольного абсолютного магнитометра, работающего совместно с цифровыми вариационными станциями. В качестве непрерывно работающей протонной станции применяются быстродействующие протонные магнитометры с эффектом Оверхаузера (см. п. 4.1.1.) типа SM90R, POS-1 и др.

Для сравнения вариаций геомагнитного поля, записанных двумя вариационными станциями, важно иметь малые градиенты компонент поля между приборными постами. Поэтому протонный магнитометр обычно размещается в вариационном павильоне на удалении $4-5$ м от цифровых вариационных станций (рис. 5.12). Датчик протонного магнитометра может быть установлен на полу, на полке или подвешиваться к потолку. Выход блока электроники рассчитан на подключение к последовательному порту персонального компьютера или к накопителю цифровых данных. Секундные или минутные значения полного вектора F , полученные протонным магнитометром, сравниваются с данными вариационных станций, которые вычисляются в зависимости от регистрируемых компонент:

$$\Delta F = F_p - (H_s^2 + Z_s^2)^{1/2}, \text{ или } \Delta F = F_p - (X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2)^{1/2}$$

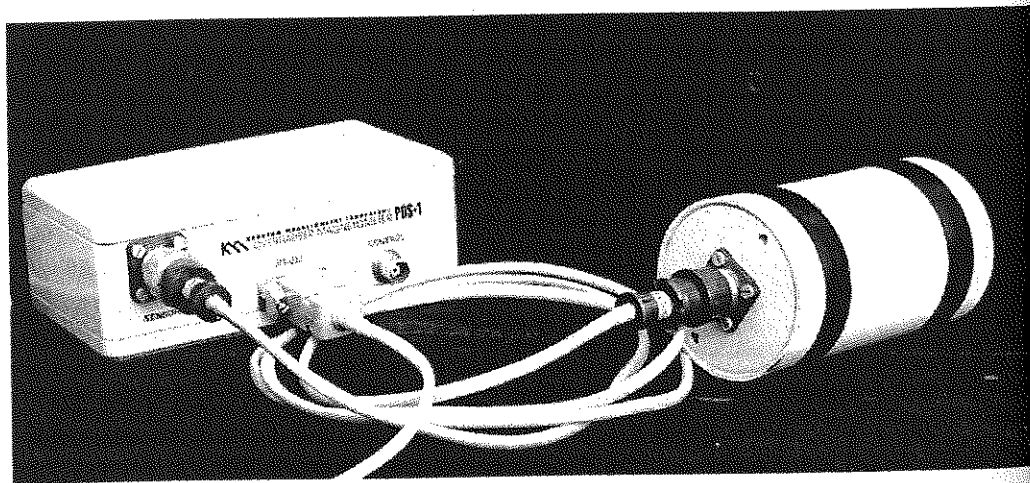


Рис. 5.12. Внешний вид магнитометра POS-1 (фото С. Хомутова).

Изменение разности ΔF указывает на возникшие проблемы с каким-либо датчиком или с АЦП вариационной станции. Компонентные абсолютные наблюдения помогают найти причину изменения базисных уровней одного из каналов станции.

Возможен вариант размещения датчика протонного магнитометра в колечной установке, т.е. осуществить компонентную вариационную станцию (см. п. 4.2.1). В этом случае сохраняются стандартные требования к высокой стабильности приборного поста. После нивелировки колечной системы ее магнитная ось устанавливается в магнитном меридиане. Измерения с помощью программатора могут производиться по следующей схеме. Сначала измеряется полный вектор F . Затем в кольца подается ток компенсации горизонтальной или вертикальной компоненты (в зависимости от широты местоположения обсерватории), и протонный магнитометр измеряет вертикальную компоненту Z (или горизонтальную компоненту H). Далее повторяется новый цикл измерений. Каждую минуту или через каждые несколько секунд (частота опроса определяется возможностями применяемого протонного магнитометра) регистрируются вариации F и Z (или H), что позволяет не только контролировать параметры датчиков Z и H вариационных станций, но представлять параллельные данные по вариациям двух компонент поля. Такую непрерывно действующую колечную установку можно назвать компонентной магнитовариационной станцией с протонным магнитометром.

Точно так же, как при абсолютных наблюдениях, колечную установку эпизодически необходимо подвергать контрольной юстировке с целью проверки совпадения магнитной оси ее колечной системы с магнитным меридианом и в горизонтальной плоскости, а также для уточнения величины тока компенсации.

5.4. Дополнительное оборудование вариационных станций

Одной из основных задач магнитных обсерваторий является обеспечение непрерывной круглосуточной регистрации вариаций геомагнитного поля. Практика показывает, что наибольшее число потерь данных происходит из-за нарушений в системе энергообеспечения аппаратуры. Обычно магнитные обсерватории находятся в удалении от промышленных центров, и поэтому сетевое электропитание бывает очень низкого качества с большим числом отключений в течение каждого месяца. По этой причине вся аппаратура в вариационном павильоне должна подключаться к блоку бесперебойного питания ББП, который может находиться непосредственно в помещении вариационного павильона, если здание имеет общую площадь более 60 м², либо находится в отдельном здании, предназначенном для электрооборудования. Помещение с аккумуляторами должно иметь вентиляцию. Простой и достаточно надежный вариант ББП (рис. 5.13) предполагает подключение вариационных станций и АЦП к аккумуляторам 12 В большой емкости 2 , которые подзаряжаются от выпрямительного устройства 1 . Рекомендуется выход подключать через стабилизирующий ограничитель напряжения 3 . Емкость аккумуляторов должна быть достаточной для обеспечения работы вариационных станций при отсутствии сетевой электроэнергии в течение $2-3$ суток. Щелочные аккумуляторы надежны и почти не нуждаются в обслуживании, но из-за магнитности аккумуляторов их нужно размещать на значительном удалении от вариационного павильона. Кислотные аккумуляторы немагнитные и обла-

дают хорошей вольт-амперной характеристикой, но долговечность их меньше щелочных и в значительной степени зависит от качества обслуживания и режима зарядки. В цепи аккумулятора обязательно должен быть установлен плавкий предохранитель для защиты от возгорания кабельной линии в случае короткого замыкания в цепи. Следует всегда помнить, что надежные соединения цепей питания обеспечивают малый уровень помех в электронных схемах и значительно уменьшает число отказов аппаратуры. Резервирование блоков бесперебойного питания также повышает надежность работы вариационных станций.

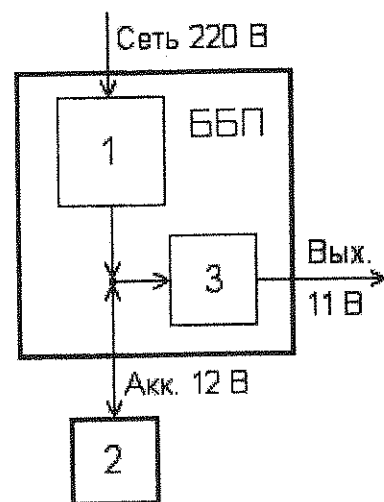


Рис. 5.13. Блок-схема источника питания ЦМВС.

С широким внедрением в практику работы магнитных обсерваторий электронной техники возникла проблема ее грозозащиты. При грозовых разрядах выходят из строя микросхемы усилителей и последовательные порты персональных компьютеров. Необходимо применять комплекс мер по защите аппаратуры, работающей в непрерывном режиме. Питание аппаратуры от сети 220 В рекомендуется осуществлять через развязывающий заземленный трансформатор. Корпуса блоков необходимо подключать к отдельной приборной земле. Кабельные линии аналоговых сигналов и цепей питания защищают экранированием, L - C фильтрами, разрядниками и диодными ограничителями высокого напряжения. Таким же способом защищают цифровые кабельные линии, но применение фильтров здесь ограничено частотными параметрами импульсных сигналов. Следует применять специализированные устройства, предназначенные для передачи цифровой информации по длинным линиям.

Если электронные блоки установлены в разных зданиях, то наиболее радикальным методом грозозащиты является применение оптоволоконных кабельных соединений и перевод всей электроники вариационных станций на автономное аккумуляторное электропитание.

Серьезные трудности в получении качественных непрерывных данных возникают при необходимости проведения профилактических работ с вариометрами и строительными-ремонтными работ в вариационном павильоне. Избежать этих проблем можно только при наличии второго вариационного павильона с дублирующей цифровой станцией.

Опыт работы Иркутской магнитной обсерватории, расположенной в сельской местности с ненадежным электроснабжением, показал, что, применяя полное дублирование информационно-измерительных систем, надежный монтаж кабельных линий и регулярный контроль состояния аккумуляторов, можно реально не иметь потерь данных и непрерывно регистрировать вариации геомагнитного поля в течение восьми лет подряд.

6. ОБРАБОТКА И КОНТРОЛЬ НАБЛЮДЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

6.1. Результаты абсолютных наблюдений

Магнитные обсерватории выдают информацию о геомагнитном поле, используя данные вариационных станций, датчики которых являются относительными приборами с достаточно узким диапазоном измерений. Абсолютные значения вариаций эпизодически определяются путем проведения абсолютных наблюдений, с помощью которых становится известными базисные значения фикс-линий на магнитограммах аналоговых станций и значения в единицах индукции (нТл) нулевых напряжений в измерительных каналах цифровых станций. Поэтому результаты обсерваторских абсолютных наблюдений необходимо рассматривать только совместно с данными вариационных станций.

Как указывалось выше, абсолютные магнитометры, вариометры и средства преобразования информации фактически объединены с территорией и со строительными конструкциями в общую измерительную систему магнитной обсерватории. Поэтому изолированное нормирование метрологических характеристик магнитометров по методикам Госстандарта (напр., по методике МИ 156-78) не дает представление о реальных погрешностях обсерваторских измерений. Для оценки ожидаемой погрешности измерений необходимо знать кроме систематической (инструментальной) погрешности применяемых средств измерений дополнительные составляющие погрешностей от воздействия внешних факторов.

Систематическая часть погрешности измерений остается квазипостоянной при повторных измерениях данным прибором одной и той же величины. Систематические погрешности внешне себя не проявляют, и обнаружить их можно только методами сверки с образцовыми приборами или эталонами. Причинами возникновения систематических погрешностей магнитометров могут быть отклонения параметров инструмента от паспортных значений, неуравновешенность узлов теодолитов относительно их осей вращения, износ рабочих поверхностей, сдвиг шкалы, намагниченность деталей прибора, дрейф параметров электронных узлов, изменение магнитной обстановки в павильоне.

Постоянную систематическую погрешность абсолютного магнитометра исправляют путем введения соответствующих поправок «на прибор», если показания рабочего инструмента отличаются от показаний образцового магнитометра, или «на столб», если наблюдения проводятся на разных постах абсолютного павильона.

Случайная погрешность возникает при одновременном воздействии многих источников, каждый из которых может иметь малое влияние на результат измерения, но в совокупности при измерениях одной и той же величины приводят к разным результатам. Случайная погрешность геомагнитных измерений может возникнуть из-за изменения магнитной обстановки около датчиков магнитометров, колебаний температуры, нестабильности и шумов источников питания, субъективных неточностей оптического наведения зрительной трубы или окуляра нониусной шкалы, ошибок считывания шкал наблюдателем.

Случайная погрешность Δ_{ci} является разностью между результатом единичного измерения A_i и математическим ожиданием результатов измерений $M(A)$. Как правило, случайные погрешности длинного ряда измере-

ний имеют нормальный закон распределения и поэтому математическое ожидание представляет собой среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\Delta_{ci} = A_i - M(A) \approx A_i - (\sum A_i)/n, \text{ где } i = 1 \dots n.$$

Чем больше произведено измерений, тем ближе среднее арифметическое значение к истинному значению измеряемой величины.

Степень рассеивания возможных значений погрешности около среднего значения определяется оценкой дисперсии d или оценкой среднего квадратического отклонения σ :

$$\sigma = d^{1/2}, \text{ где } d = [\sum (\Delta_{ci})^2] / (n - 1).$$

Оценка дисперсии d или среднего квадратического отклонения σ позволяют сравнивать между собой результаты наблюдений разными инструментами, различными приемами и методами наблюдений, разными наблюдателями.

Действующий ГОСТ 8.009-84 рекомендует рассматривать нормируемые метрологические характеристики средств измерений как статистическое объединение всех составляющих погрешностей в реальных условиях эксплуатации этих средств. При таком подходе вполне оправдано отсутствие в паспортных данных вариометров и компонентных магнитометров графы о погрешности измерений элементов геомагнитного поля.

Для примера, Иркутская обсерватория производит наблюдения склонения феррозондовыми деклинометрами FD с ценой деления кругов теодолитов 30" и деклинометрами/инклинометрами THEO-010A и LEMI-203 с ценой деления 1". При первом взгляде на цифры разрешающей способности этих теодолитов появляется естественное ожидание, что точность измерений склонения односекундными деклинометрами должна увеличиться на порядок. Но реальные измерения дают иные результаты. На графике наблюдений D_0 (рис. 6.1) приведены базисные значения вариометров двух цифровых станций. Первые 14 дней наблюдения проводились «грубыми» деклинометрами FD, а последующие – точным деклинометром FD/1. Средние значения D_0 , измеренные разными инструментами, совпадают для двух вариационных станций до десятой доли минуты, т.е. в измерениях отсутствуют систематические инструментальные ошибки. Оценка дисперсии наблюдений оказалась одного порядка и практически мало зависит от разрешающей способности теодолитов. Следовательно, в результаты наблюдений разными деклинометрами в одинаковой степени входит составляющая случайной погрешности, которая превосходит погрешность магнитометров.

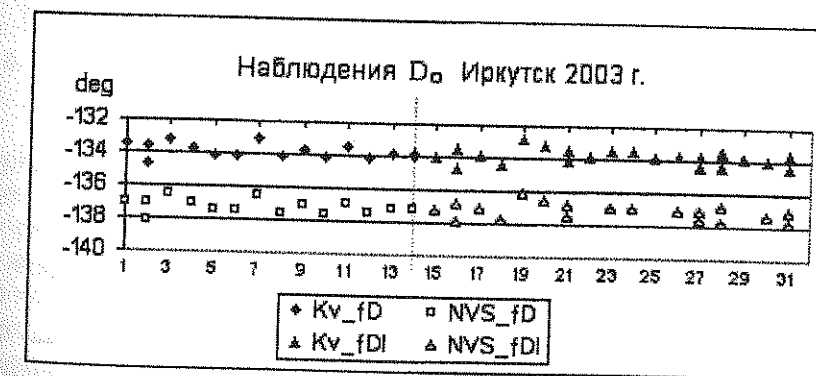


Рис. 6.1. График сравнительных измерений D деклинометрами с различным разрешением горизонтального круга.

Погрешность каждого определения базисного уровня D -вариометра складывается из погрешностей определения положения на круге деклинометра магнитного и географического меридианов, а также из погрешностей вариометров и неточности датирования моментов наблюдений. Основная часть первой погрешности связана с неточной нивелировкой феррозонда, закрепленного на оптической трубе теодолита и нестабильностью электрического нуля на выходе усилителя магнитометра во время производства каждой серии наблюдений. Для измерений склонения с погрешностью $0,1'$ необходимо сохранять нивелировку магнитной оси феррозонда в пределах 2–3 секунд после компенсирующих поворотов его в новые положения. Нестабильность электрического нуля может быть вызвана нелинейностью чувствительного элемента феррозонда и воздействием сигналов перегрузки усилителей во время переверотов теодолита на 180° в каждой серии наблюдений. Для измерений с погрешностью $0,1'$ уход нуля не должен превышать $0,5$ нТл в геомагнитном поле Иркутска (см. п. 4.3.5). Вторым источником разброса данных могут являться погрешности наведения на мир. Требования к взаимной стабильности положения мира и точки наблюдения зависят от расстояния между ними, а точность наведения – от исполнения мишени мира, атмосферных условий видимости и квалификации наблюдателя.

Дополнительные погрешности наблюдений, связанные с погрешностями вариационных станций, будут рассмотрены ниже.

Конечный результат статистической обработки наблюдений называют результатом измерений. Погрешность результата измерения определяется по формуле:

$$\sigma_m = \sigma/n^{1/2} = \{[\sum(x_i - m)^2/n(n-1)]^{1/2}$$

Следовательно, результирующую погрешность измерений можно снизить в n раз, увеличив число наблюдений в n^2 раз.

В Иркутске определения горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля производятся из наблюдений на феррозондовом инклинometре FD/I, а также двумя методами КУ1 и КУ2 на колечной установке с протонным магнитометром. Из графиков абсолютных наблюдений (рис. 6.2 и 6.3) разными инструментами, видно, что разброс наблюдаемых значений базисных уровней H_0 и Z_0 находится в пределах 5 нТл, а средние значения результатов измерений разными магнитометрами и разными методами совпадают до десятых долей нанотеслы. Расчеты инструментальных погрешностей (см. раздел 4) показывают, что точность измерений H и Z должна быть около 1 нТл.

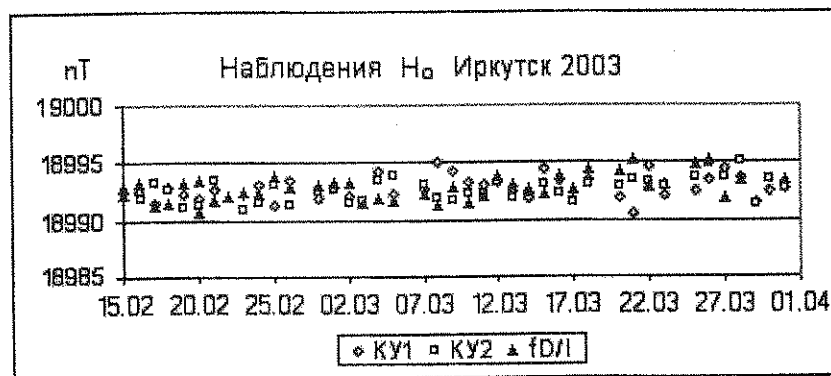


Рис. 6.2. График сравнительных измерений H различными методами и магнитометрами.

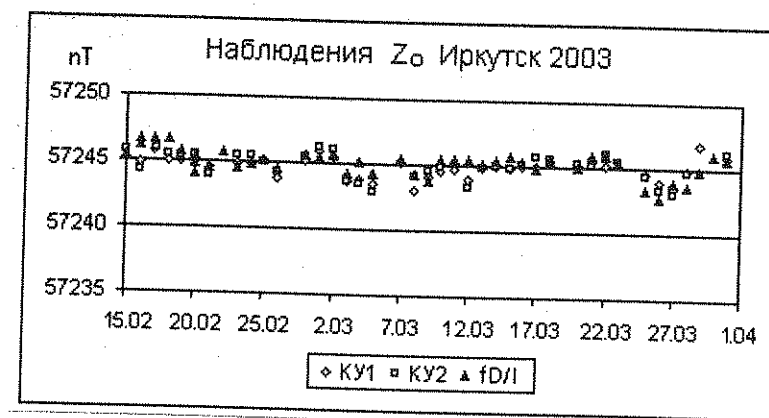


Рис. 6.3. График сравнительных измерений Z различными методами и магнитометрами.

Следовательно, помимо составляющей случайных погрешностей абсолютных наблюдений остальная часть погрешности определений базисных значений относится к погрешностям регистрации ГМП вариометрами и к неточной временной привязке моментов абсолютных наблюдений с данными вариационных станций. Данные вариационных станций могут быть искажены из-за неточной установки датчиков по магнитному или географическому меридианам, погрешностей определения коэффициентов преобразования и температурных коэффициентов вариометров, погрешности датчика температуры, дрейфовых шумов, нелинейности передаточной характеристики вариометров.

Представление о шумах двух вариационных станций можно получить сравнением их минутных данных в магнитоспокойные дни (рис. 6.4).

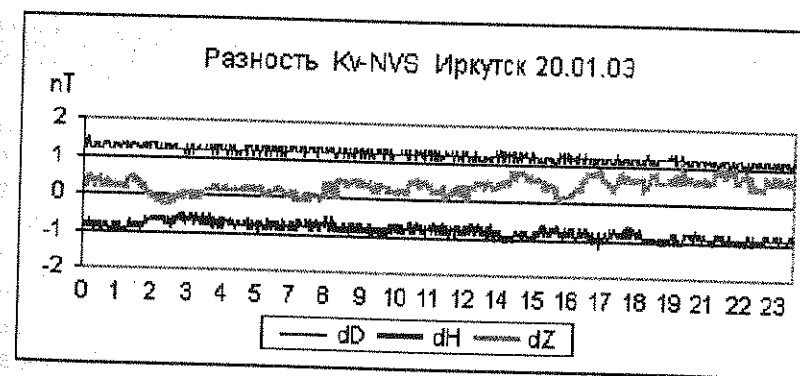


Рис. 6.4. График суточной разности вариаций двух ЦМВС при спокойном ГМП.

Из представленного графика следует, что наибольшей амплитудой шумов сложного спектра обладают кварцевые Z -датчики. Эти дрейфовые шумы, природа которых не совсем ясна, могут в течение различных суток менять амплитуду от $0,2$ до $1,5$ нТл независимо от возмущенности геомагнитного поля.

Существенное значение при регистрации иррегулярных возмущений имеет метод создания минутных значений вариаций поля из секундных данных и точность временной привязки (датирование) данных. Обычно минутные значения создаются как средние арифметические значения за

60 с или с применением весовых коэффициентов цифровых фильтров Гаусса. На сравнительном графике (рис. 6.5) представлены разности минутных данных магнитной бури, полученных от одного комплекта вариометров по двум разным каналам, в которых применяются разные методы цифровой фильтрации и имеются разные системные часы. Расхождение между минутными данными может достигать нескольких десятков нТл в зависимости от активности нерегулярных флуктуаций поля и точности датирования моментов цифровой регистрации вариаций. Отсюда следует, что проведение абсолютных наблюдений в периоды повышенной магнитной активности вносит существенные дополнительные погрешности при определении базисных значений элементов. Для повышения точности таких измерений необходимо обеспечить жесткую привязку моментов отсчетов абсолютных наблюдений к секундным данным цифровых вариационных станций, введя на обсерватории службу единого точного времени (напр., на основе спутниковой глобальной системы GPS).



Рис. 6.5. График разности вариаций двух независимых регистрирующих каналов блока вариометров ЦМВС.

Учитывая заметное влияние случайных погрешностей на магнитные измерения, рискованно принимать одиночное измеренное базисное значение вариометра за безусловно истинную величину и принимать его в качестве базисного уровня при обработке данных вариационной станции.

Если составляющая случайных погрешностей абсолютных измерений близка к систематической погрешности магнитометров, то достаточно осуществлять контроль базисных уровней вариационных станций ежедневными абсолютными наблюдениями. В противном случае число наблюдений необходимо увеличивать вплоть до ежедневных. Статистика большого числа наблюдений обычно позволяет реализовать высокий класс применяемых магнитометров. Необходимое число наблюдений N для надежного определения среднемесячного значения базисных уровней вариометров можно оценить по формуле:

$$N = (M/m)^2, \quad (6.4)$$

где: M — реальная средняя квадратичная погрешность измерений,
 m — допустимая на обсерватории средняя квадратичная погрешность.

Если принять допустимую среднюю квадратичную погрешность измерений вертикальной компоненты $m = 0,5$ нТл, а средняя квадратичная ошибка реальных измерений с учетом влияния случайных погрешностей составила $M = 2$ нТл, то в течение месяца нужно сделать не менее 16 абсолютных наблюдений этой компоненты ГМП.

При проведении точных геомагнитных измерений следует учитывать, что одна серия абсолютных наблюдений занимает по времени достаточно большой промежуток времени (от 5 до 20 мин.), в течение которого геомагнитное поле не остается постоянным. Усредняя все отсчеты инструментов, мы осуществляем линейную интерполяцию изменений поля от одного момента отсчета показаний инструмента к другому моменту. В условиях возмущенного ГМП повысить точность измерений можно по предложенному Ж. Рассоном методу приведения к единому моменту времени отсчетов абсолютных магнитометров с использованием данных вариационных станций (см. разд. 4.5.1).

Базисные значения вариометров определяются по результатам ряда наблюдений путем вычисления средних значений до десятых долей нТл. При стабильной работе вариометров, базисные значения можно принимать на основе среднемесячных результатов наблюдений с предварительной отбраковкой грубых ошибок измерений (промахов). Решение вопроса об исключении аномальных результатов наблюдений не всегда просто принять. Прежде всего, такие результаты необходимо проверить на отсутствие случайных ошибок при ручном вводе исходных данных в таблицу обработки наблюдений. Следует обратить внимание на амплитуды иррегулярных возмущений ГМП, которые могут совпасть по времени с проведением абсолютных наблюдений. Полезно по журналу ежедневных записей выяснить возможность нарушения нормальных условий проведения абсолютных наблюдений или работы вариометров. Если явные ошибки не обнаружены, следует воспользоваться статистическими методами анализа наблюдений. Сначала нужно рассчитать среднее значение A_{cp} и среднее квадратическое отклонение σ для выборки надежных измерений. Напомним, что среднее квадратическое отклонение рассчитывается по формуле: $\sigma = [\sum(A_i - A_{cp})^2 / (n - 1)]^{1/2}$.

Чтобы оценить принадлежность сомнительного наблюдения A_x к нормальной совокупности наблюдений и принять решение об исключении или сохранении его в составе выборки, нужно вычислить отношение $(A_x - A_{cp})/\sigma$, которое сравнивается с табулированными значениями для нормального распределения случайных значений в зависимости от принятого по предыдущим наблюдениям уровня значимости $p = 0,075$ (0,05 или 0,025) (табл. 6.1). Если отношение $(A_x - A_{cp})/\sigma$ больше или равно табличному значению для принятого уровня значимости, то рассматриваемый результат наблюдения аномален и может быть удален.

Таблица 6.1
 Максимальные квантили распределения по уровню значимости p и объему выборки N

N	p			N	p			N	p		
	0,075	0,05	0,025		0,075	0,05	0,025		0,075	0,05	0,025
3	1,15	1,15	1,15	9	2,04	2,11	2,21	15	2,32	2,41	2,55
4	1,44	1,46	1,48	10	2,1	2,18	2,29	16	2,35	2,44	2,58
5	1,64	1,67	1,72	11	2,14	2,23	2,36	17	2,38	2,48	2,62
6	1,77	1,82	1,89	12	2,2	2,29	2,41	18	2,41	2,5	2,66
7	1,88	1,94	2,02	13	2,24	2,33	2,47	19	2,44	2,53	2,68
8	1,96	2,03	2,13	14	2,28	2,37	2,50	20	2,46	2,56	2,71

В тех случаях, когда наблюдается дрейф базисных уровней вариометров, то нужно попытаться сначала выяснить причины тренда базисных значений. Иногда это удается, напр., дрейф вызван постепенным сезонным изменением температуры в вариационном павильоне, и тогда можно ввести в расчеты базисных значений дополнительные уточняющие коэффициенты. Сезонный дрейф также может быть вызван неустойчивостью или остаточной намагниченностью постаментов. Дрейф в виде иррегулярных колебаний можно связать с элементами усилителей или источников электропитания. В таких случаях приходится интерполировать базисный уровень, понимая, что этой операцией не всегда можно уменьшить погрешность определения базисных уровней.

Итоговые результаты абсолютных наблюдений собираются в квартальные и годовые таблицы абсолютных наблюдений. Для примера в неполном виде представлена такая таблица 6.2 за первый квартал 2003 года.

Таблица 6.2

*Магнитная обсерватория «Иркутск» ИСЗФ РАН
Абсолютные измерения горизонтальной компоненты H
Год 2003 Квартал 1*

Дата	H	Ho_Kv	Ho_nvs	Ho-A	Прибор	Нач.	Конец	Наблюд.	
1.01.03	19014.7	18994.5	18986.7	18941.3	KY1	00:13	00:16	Талалаев.	
1.01.03	19012.1	18991.7	18983.7	18938.4	KY2	00:16	00:21	Талалаев.	
*****	*****	*****	*****	*****	****	****	****		
16.02.03	19002.2	18992.6	18984.5	18938.7	KY1	00:10	00:13	Бычкова	
16.02.03	19002.5	18992.6	18984.5	18938.8	KY2	00:13	00:18	Бычкова	
16.02.03	18999.8	18992.7	18984.7	18938.7	FD/I	00:32	00:42	Бычкова	
*****	*****	*****	*****	*****	****	****	****		
31.03.03	18963.6	18992.7	18984.9	18938.1	KY1	00:11	00:14	Вертипр.	
31.03.03	18960.8	18992.7	18985.0	18938.5	KY2	00:14	00:19	Вертипр.	
31.03.03	18948.3	18994.0	18986.2	18939.7	FD/I	00:33	00:41	Вертипр.	
Среднемесячные	1	18993.1	18985.5	18939.1					
		2	18992.6	18984.8	18938.8				
		3	18993.1	18985.2	18939.1				
Среднеквартальные		18993.1	18985.3	18939.2	KY1				
		18992.5	18984.8	18938.6	KY2				
		18992.9	18984.3	18938.9	FD/I				
Дисперсия		1.204	1.225	1.335	KY1				
		1.298	1.381	1.381	KY2				
		1.091	1.109	1.337	FD/I				

Вторая колонка «H» измеренной величины горизонтальной компоненты геомагнитного поля используется для проверки правильности принятых коэффициентов преобразования G (цен делений ϵ) вариометров с помощью графика зависимости $H_0 = f(H)$, или путем определения коэффициента корреляции. Если такая зависимость проявляется для одного из вариометров, то следует провести повторные операции градуировки этого вариометра, либо усомниться в правильности паспортного значения постоянной кольца градуировки датчика.

Если значения H_0 зависят от величины склонения D ($H_0 = k \cdot D$) или значения D_0 зависят от величины горизонтальной компоненты H ($D_0 = k \cdot H$), то в первом случае следует перепроверить установку H-вариометра, магнитная ось которого должна быть перпендикулярна магнитному меридиану, а во втором – установку D-вариометра по магнитному меридиану.

Раздельное определение среднеквартальных значений H_0 для различных магнитометров (в нашем случае применяется три метода наблюдений, – два на коленной установке и наблюдения на феррозондовом деклинометре/инклинометре FD/I), позволяет выявить появление систематической ошибки в одном из инструментов и принять меры к ее устранению, или определить и ввести поправку на прибор. Оценка дисперсии наблюдений дает представление о качестве работы как абсолютных, так и вариационных магнитометров обсерватории. Напр., завышенные значения дисперсии наблюдений с помощью коленной установки KY по отношению к наблюдениям деклинометром/инклинометром FDI связаны с недостаточной точностью устаревшего протонного магнитометра ММП-203, а завышенные значения дисперсии базисных значений аналоговой серии вариометров по отношению к цифровым станциям объясняются неточным снятием ординат записей магнитограмм.

Вспомогательные колонки времени проведения наблюдения и фамилии наблюдателя облегчают поиск исходного файла обработки данных в тех случаях, когда появляется необходимость в выяснении причин ошибочных наблюдений.

Случаются резкие изменения базисных уровней, связанные с настройкой вариометров. Такие изменения четко фиксируются с точностью до единиц минут. С этого времени принимается новый базисный уровень элемента.

Любые неожиданные изменения базисных значений вариометров более 2 нТл, должны быть тщательно рассмотрены с целью выяснения причин таких отклонений. Если изменения базисных значений оказываются одинаковыми для всех вариационных станций по результатам наблюдений на разных магнитометрах, то необходимо проверить появление ферромагнитных предметов в абсолютном павильоне или на территории около этого здания. Если базисные значения изменились одновременно по всем компонентам одной вариационной станции, но имеют разную амплитуду в компонентах, то вероятную причину помехи следует искать в вариационном павильоне. Возможно, в павильон был внесен какой-либо ферромагнитный предмет, например, измерительный прибор или нагреватель в стальном корпусе.

Вывод базисных уровней по результатам абсолютных наблюдений, – это один из самых ответственных этапов обработки вариационных данных, т.к. ошибочное базисное значение войдет во все результаты обсерватории, начиная с секундных и минутных данных, кончая итоговыми

среднемесячными и среднегодовыми значениями ГМП. Принятые базисные значения вводятся в специальный файл констант цифровой вариационной станции, которые используются программой создания файлов минутных данных.

Квартальные таблицы базисных значений сопровождаются графиками, которые наглядно демонстрируют качество наблюдений и стабильность работы вариационных станций. Пример такого графика представлен на рис. 6.6.

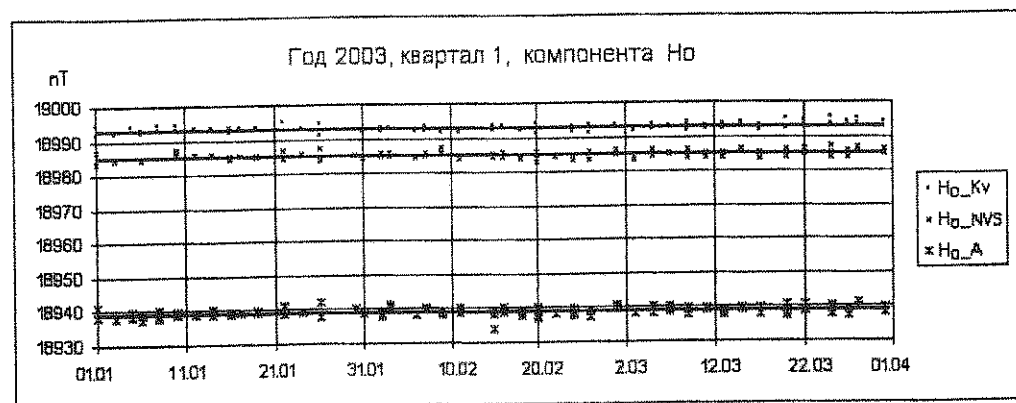


Рис. 6.6. Квартальный график наблюдений базисных значений H -вариометров МВС и двух ЦМВС.

Подобные таблицы и графики сопровождают измерения базисных значений вариометров склонения D и вертикальной компоненты Z геомагнитного поля.

Несколько иной вид имеют таблицы модуля вектора F , т.к. для вариационных станций, не имеющих F -вариометра, базисные значения не определяются. Для таких станций вычисляется разность $\Delta F = F_{pr} - F_v$, где F_{pr} — абсолютные наблюдения протонным магнитометром, F_v — расчетное значение: $F_v = (H_v^2 + Z_v^2)^{1/2}$. Колонки таблицы для цифровых станций обозначаются ΔF_{kv} и ΔF_{nvs} , которые заполняются значениями разностей в десятых долях нТл. Если базисные уровни H_0 и Z_0 (или X_0 , Y_0 , Z_0) выбраны правильно, то среднемесячное значение $\Delta F \approx 0$. Как правило, приходится более тщательно контролировать базисные уровни Z -вариометров, которые вносят большой вклад в значения F и больше зависят от температуры и нестабильности приборных фундаментов.

Графический материал наблюдений на бумажном носителе рекомендуется сохранять в архивной папке абсолютных наблюдений. Обычно по окончании текущего года все материалы наблюдений подвергаются комплексной проверке, корректировке и сохранению окончательных данных на оптическом диске CD-ROM. В архиве следует сохранять все материалы анализа материалов абсолютных наблюдений.

6.2. Обработка магнитограмм

Несмотря на переход магнитных обсерваторий к цифровым вариационным станциям, все еще сохраняются действующие аналоговые вариометры с фотозаписью, которые спасают положение при катастрофических отказах электронной техники и могут исполнять роль арбитра при подозре-

нии на изменение параметров электронных узлов цифровых станций или ошибок в программах по обработке данных. Кроме того, в экспедиционных и экспериментальных работах, связанных с регистрацией вариаций геомагнитного поля, пока трудно найти доступную замену полевым станциям типа «ИЗМИРАН-4». Именно поэтому кратко напомним основные принципы обработки магнитограмм.

Для регистрации вариаций в аналоговом виде применяется рулонная осциллографная фотобумага высокой чувствительности 400 или 600 ед. шириной 200 или 280 мм (в зависимости от ширины барабана регистратора), которая в фотокомнате разрезается на ленты длиной 520 мм. Раз в сутки лента меняется на барабане фоторегистратора и проявляется при температуре около 20 °С.

<i>Состав стандартного проявителя N1:</i>		<i>Состав закрепителя:</i>	
Метол	– 1 г	Гипосульфит	– 250 г
Сульфит натрия кристаллический	– 26 г	Метабисульфит калия	– 25 г
Гидрохинон	– 5 г	Вода	1000 см ³
Натрий углекислый безводный	– 20 г		
Калий бромистый	– 1 г		
Вода кипяченая	1000 см ³		
Останавливающий раствор уксусной кислоты – 1,5%.			

Проявление – 2 мин., прерывание – 10 с., фиксирование – 15 мин., промывка ≥ 30 мин.

После промывки в воде лента споласкивается в слабом растворе глицерина и сушится в течение суток.

Оформляются магнитограммы тушью по принятому стандарту: название обсерватории и условное название вариационной станции, дата, обозначения часовых марок времени, всех базисных линий и регистрируемых элементов геомагнитного поля, температурной линии, записи принятых цен делений, базисных значений и температурных коэффициентов, измеренной температуры. Оформленная магнитограмма является основным первичным документом для ручной или автоматизированной цифровой обработки данных. Хранятся магнитограммы под гнетом в специальных архивных шкафах.

Ординаты (значения вариаций в мм) снимаются палеткой (прозрачной мерной пластинкой) с точностью до 0,1 мм. Палетку удобно применять при снятии ординат моментов абсолютных наблюдений и трех-пяти точек в суточной записи для создания разностей с цифровыми вариационными станциями. В последние десятилетия для оцифровки всей магнитограммы применяют графико-цифровые преобразователи, сканеры, цифровые фотоаппараты.

Вариации в нТл вычисляются по формуле:

$$B_i = \varepsilon \cdot n_i + \mu \cdot (t_i - t_0) + B_0,$$

где: n_i — ордината магнитного элемента на момент времени T_i , мм;

ε — цена деления вариометра, нТл/мм (или 1/мм для записи D);

μ — температурный коэффициент вариометра;

t_i — температура на момент времени T_i , °С;

t_0 — температура приведения, °С;

B_0 — значение базисной линии магнитного элемента, нТл (или угл. мин.

для D);

B_i — абсолютное значение магнитного элемента, нТл (или угл. мин. для D).

Температура на момент снятия ординат магнитных элементов определяется по ординате температурной линии: $t_i = \varepsilon_f n_i + t_0$, где t_0 – базисное значение датчика температуры.

Погрешность определения мгновенного значения поля по магнитограмме при цене деления 2–3 нТл/мм составляет около 0,5 нТл из-за неопределенностей, связанных с толщиной линий на фотобумаге. Погрешность датирования (привязки данных к времени) зависит от стабильности протяжки фотобумаги приводом барабанного регистратора. При развертке 20 мм/час снять с магнитограмм минутные данные возможно, но необходимо интерполировать время между часовыми марками из-за нестабильности протяжки фотобумаги в регистраторе.

Цены делений вариометров определяются по амплитуде выбросов n_k в записях вариаций на магнитограмме после подачи разнополярных импульсов тока градуировки в кольца вариометров. Зная паспортное значение постоянной кольца вариометра C и величину тока калибровки I_k , определяют цену делений по формуле: $\varepsilon = C \cdot I_k / n_k$ (нТл/мм). Для D -вариометра цена делений пересчитывается в угловые минуты на миллиметр по формуле: $\varepsilon_D = C \cdot I_k / n_k \cdot H_m \cdot \sin 1'$ (л/мм), где H_m – среднегодовое значение горизонтальной компоненты, нТл.

Базисные значения магнитных элементов определяются по абсолютным наблюдениям: $B_0 = B_{AN} - \varepsilon \cdot n_i + \mu \cdot (t_i - t_0)$. Как правило, базисные уровни элементов выводятся путем осреднения всех наблюденных базисных значений за месяц.

6.3. Первичная обработка цифровых данных вариометров

Замена аналоговых вариационных станций цифровой техникой не изменили основные принципы обработки данных. В корне поменялась технология получения и хранения первичных данных о вариациях ГМП, в которой важное место занимает блок программного обеспечения системы сбора и накопления данных. К программам этого блока должны предъявляться особо жесткие требования по надежности, т.к. любой сбой или зависание программы приводит к необратимой утрате первичной информации. Программисту следует продумать все возможные меры по обеспечению работоспособности системы и сохранению данных в самых неожиданных аварийных ситуациях.

К первому блоку программного обеспечения можно отнести программы, которые выполняют следующие функции:

- управление АЦП, сбор и хранение секундных или пятисекундных данных вариационных станций (в милливольтках) с привязкой данных к единому точному времени;
- коррекция сбойных значений, цифровая НЧ фильтрация исходных данных и создание суточных файлов минутных данных (в милливольтках);
- сбор и создание суточных файлов пятисекундных данных протонной вариационной станции;
- графический вывод на монитор в реальном времени 12-ти последних часов вариаций геомагнитного поля;
- автоматическую и ручную коррекцию системных часов.

Секундные данные позволяют с повышенной точностью обрабатывать результаты абсолютных наблюдений, применять короткие токовые импульсы при градуировке датчиков, оценивать уровень шума по каждому

каналу. В возмущенные дни эта информация представляет повышенный интерес для исследований геомагнитных явлений. В секундных данных подлежат автоматической коррекции сбойные значения, которые заменяются средним двух соседних значений. Увлечаться автоматической коррекцией данных очень опасно, т.к. при этом можно безвозвратно потерять неожиданные эффекты, связанные, например, с падением метеорита, солнечным затмением, с космическими экспериментами. При определении коэффициентов преобразования (цен делений) вариометров также происходят резкие изменения в амплитудах данных после подачи тока в кольца градуировки. Эти выбросы в значениях являются необходимой информацией для контроля параметров вариометров и могут исправляться только после производства соответствующих расчетов.

Цифровая фильтрация обычно применяется по рекомендациям ИНТЕРМАГНЕТ с использованием 19-точечного фильтра Гаусса с набором весовых коэффициентов. Значение каждой минуты $N_{(мин)}$ создается суммированием 5-секундных данных, умноженных на соответствующие коэффициенты, представленных в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Время, сек.	0	±5	±10	±15	±20	±25	±30	±35	±40	±45
Коэффициенты K_i	0.12578865	0.11972085	0.10321785	0.08061140	0.05702885	0.03654680	0.02121585	0.0115655	0.00531440	0.00229315
$N_{(мин)} = \sum K_i N_{i(c)}$										

Если протонная вариационная станция работает со скважностью измерений 5 сек., то для создания файлов минутных данных также применяется 19-точечный метод цифровой фильтрации. При скважности вариационных измерений 10 секунд возможен вариант 9-точечного фильтра Гаусса, представленный в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Время, сек	0	±10	±20	±30	±40
Коэффициенты K_i	0.30123004	0.22657992	0.09642526	0.02321702	0.02321702

Вывод на монитор графической информации о вариациях ГМП в реальном времени позволяет оценивать состояние геомагнитного поля перед проведением абсолютных наблюдений или работ по юстировке и сверке магнитометров. Кроме того, оперативная графическая информация позволяет своевременно обнаружить нарушения в системе сбора данных и проконтролировать появление помех производственного характера, например, при въезде транспорта на территорию обсерватории или от посещения вариационного павильона.

С внедрением цифровых вариационных станций на порядок возросли требования к точности датирования (временной привязки) данных. Регистрация минутных данных должна осуществляться с временной погрешностью не более 1 секунды. Использование в качестве системных часов встроенных часов персональных компьютеров или других накопителей данных удобно при создании программ, но может привести к получению некачественных данных в магнитовозмущенные дни из-за невысокой стабильности этих часов. Самый простой способ некоторого повышения точ-

ности хода часов состоит в ручной ежедневной коррекции их показаний по радиосигналам точного времени. Более радикальным решением является автоматическая корректировка системных часов по сигналам спутниковой глобальной системы GPS или от кварцевых часов с суточным ходом менее 0,1 с/сутки.

6.4. Стандартная подготовка цифровых минутных данных

Ко второму блоку программного обеспечения следует отнести программы, которые выполняют следующие функции:

- умножение первичных данных (в мВ) на коэффициенты преобразования (G нТл/мВ);
- ввод поправок на температуру и неточную ориентацию датчиков;
- ввод принятых базисных уровней D_0, H_0, Z_0, T_0 , или X_0, Y_0, Z_0, T_0 ;
- вычисление модуля вектора поля: $F = (H^2 + Z^2)^{1/2}$, или $F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$;
- формирование суточных файлов данных в текстовом формате ASCII-866;
- создание разностей данных цифровых станций;
- замена сбойных участков минутных данных основной вариационной станции на соответствующие данные дублирующей станции;
- отправка данных по каналам связи.

Следует с большой осторожностью относиться к автоматическому вводу различных поправок, т.к. сбой в исходных данных для ввода поправок, напр., в канале регистрации температуры, могут чрезвычайно исказить основные данные по вариациям ГМП.

Поправки на температуру вводятся по формуле:

$$dB(T) = dB + \mu \cdot (T - T_0),$$

где T_0 – температура приведения (как правило, $T_0 = 15^\circ\text{C}$ или 20°C).

Поправки из-за не ортогональности магнитных осей датчиков рассматривались в разделе 5. Учитывая малость углов отклонений ориентации, можно использовать упрощенные формулы введения поправок. Для кварцевых вариометров с чувствительным магнитом на нитях, которые установлены по географическому меридиану, поправки определяются следующим образом:

$$dX = g_{xy} \cdot dY, \quad dY = g_{yx} \cdot dX, \quad dZ = g_{zx} \cdot dX + g_{zy} \cdot dY$$

Каждый чувствительный элемент феррозондового вариометра может иметь отклонение от всех осей декартовой системы координат. Поэтому на него могут дополнительно действовать две ортогональные компоненты геомагнитного поля:

$$dX = g_{xy} dY + g_{xz} dZ, \quad dY = g_{yx} dX + g_{yz} dZ, \quad dZ = g_{zx} dX + g_{zy} dY$$

Поправочные коэффициенты обычно приводятся в паспорте на вариационную станцию или могут определяться анализом длинного ряда абсолютных наблюдений.

Для кварцевых цифровых вариометров, установленных по магнитному меридиану, можно принять следующий вариант обработки первичных данных с учетом выявленных поправочных коэффициентов из-за неточной установки вариометров.

Вариация склонения dD в нТл: $dD_{(нТл)} = G_{D(нТл/мВ)} \cdot dD_{(мВ)} + g_{H(нТл/мВ)} \cdot dH_{(мВ)}$

Полная вариация горизонтальной компоненты H :

$$H_{(нТл)} = \{ [G_{H(нТл/мВ)} \cdot dH_{(мВ)} + g_{D(нТл/мВ)} \cdot dD_{(мВ)} + H_{0(нТл)}]^2 + dD_{(нТл)}^2 \}^{1/2}$$

Полная вариация склонения в угловых минутах:

$$D' = (180-60/\pi) \cdot [dD_{(нТл)}/H_{(нТл)}] + D_0'$$

Полная вариация вертикальной компоненты:

$$Z_{(нТл)} = G_{Z(нТл/мВ)} \cdot dZ_{(мВ)} + g_{ZH(нТл/мВ)} \cdot dH_{(мВ)}$$

Если вариометры установлены точно по магнитному меридиану и по горизонтали, то коэффициенты g_H, g_D и g_{ZH} равны нулю и поправки за неортогональность магнитных осей датчиков не вводятся в результирующие минутные данные.

Текстовый суточный файл минутных данных лучше создавать из первичного суточного файла в виде информационных колонок, которые хорошо читаются и легко импортируются в электронные таблицы.

Пример небольшой части такого файла под именем «020110k.txt», применяемого в работе Иркутской магнитной обсерватории, приведен ниже:

Таблица 6.5

Kvarz 01.10.2002		Do -13380	-2.120	Ho 189909	1.220	Zo 572437	0.918
h	m	D	H	Z	t	F	$t_0 = 15.0 (-0.15, -5.0, 12.50)$
0	0	-15002	189939	572442	15.6	603131	
0	1	-14995	189938	572442	15.6	603130	
**	**	*****	*****	*****	***	*****	
23	58	-15608	189135	572303	15.3	602746	
23	59	-15581	189135	572305	15.3	602748	

Здесь две первые строки являются служебной информацией магнитной обсерватории. В первую строку заносится условное название вариационной станции и дата. Далее следуют принятые базисные значения в сотых долях угловых минут и десятых долях нТл и коэффициенты преобразования измеряемых элементов поля. Во второй строке, – обозначения колонок, температура приведения и температурные коэффициенты вариометров. Значения этих строк копируются из файла констант цифровой вариационной станции. Ниже следуют колонки часов и минут, значения склонения в сотых долях угловых минут, горизонтальной и вертикальной компонент в десятых долях нТл, температура вариометров в градусах Цельсия и расчетное значение модуля геомагнитного поля. Общий размер суточного файла минутных значений составляет около 62 килобайт.

Программа стандартной подготовки и создания суточного файла минутных данных должна работать как в автоматическом режиме с последовательным выполнением всех операций, так и в ручном с пошаговыми процедурами обработки данных. Второй режим нужен при определении температурных коэффициентов вариометров, поправочных коэффициентов и коэффициентов преобразования (цен делений) вариометров. При этом, в программе следует предусмотреть защиту от случайного повторения этих операций и сохранение промежуточных файлов в различных подкаталогах.

Математическая обработка данных протонной станции ограничивается суммированием ее значений F_i с градиентной поправкой $\Delta F_{(A-V)}$ между основным постаментом абсолютного павильона и местом расположения датчика протонного магнитометра в вариационном павильоне.

Взаимный контроль основной и дублирующей цифровых станций осуществляется созданием ежесуточной разности минутных значений соответствующих компонент измеряемого поля. Если в суточных файлах найдутся значения разностей превышающих 1 нТл от среднесуточной разности

сти, то программа должна вывести предупреждение для оператора о появлении возможных сбойных значений в данных одной из станций.

Оператор должен иметь возможность тщательного просмотра сомнительных участков в записях вариаций для принятия решения о замене части цифрового массива основной вариационной станции на соответствующие данные дублирующей станции. При этом неверная информация по температуре после введения температурной поправки может привести к очень большим искажениям данных по вариациям поля. Температура в теплоизолированных помещениях обычно изменяется достаточно медленно, что позволяет легко обеспечить программными методами автоматический контроль и редакцию сбойных значений температурных каналов.

Разности основной и дублирующей станций являются хорошим инструментом для контроля качества работы вариометров путем определения корреляционной зависимости разности от амплитуды вариаций. Например, из рисунка 6.7 можно сделать вывод о неточном определении коэффициента преобразования H -вариометра одной из станций. Определить вариометр, который нуждается в переопределении коэффициента преобразования, можно с помощью третьей вариационной станции или по абсолютным наблюдениям.

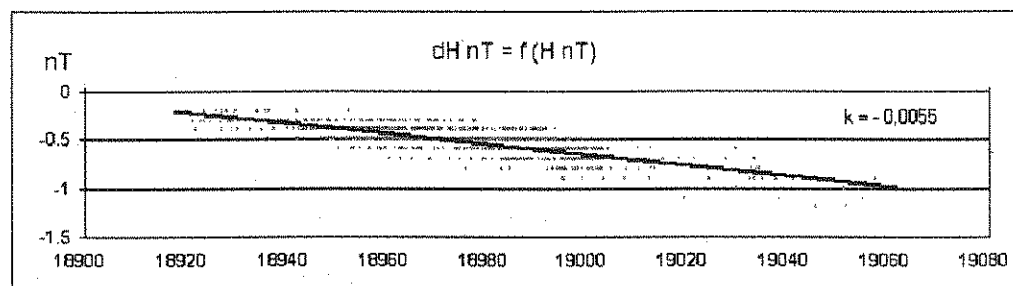


Рис. 6.7. График контроля принятых коэффициентов преобразования H -вариометров по разности вариаций двух ЦМВС.

По второму графику (рис. 6.8), на котором представлена зависимость разности горизонтальной компоненты dH от амплитуды склонения D , можно сделать вывод о неточной установке H -вариометра одной из станций по отношению к магнитному меридиану. Можно вводить соответствующую поправку в данные горизонтальной компоненты за вариацию склонения, но лучше сделать переустановку вариометра.

Контроль с помощью протонной вариационной станции осуществляется по разностям между ее минутными значениями и расчетными значениями колонки F кварцевых или феррозондовых вариационных станций. Близкое к нулю значение среднесуточной разности указывает на правильность принятых значений базисных уровней вариометров.

Как правило, оператор должен проверить суточный файл минутных данных по разностям с дублирующими станциями и с абсолютными наблюдениями перед их отправкой потребителям. Если непосредственно на обсерватории нет возможности проверять оперативные суточные данные, то предполагается, что проверка данных будет произведена позднее специалистами головной организации. Однако опыт показывает, что откладывание «на потом» процедуры проверки нарушает ритм работы обсервато-

рии, ухудшает качество данных и создает массу дополнительных проблем при необходимости их редактирования.

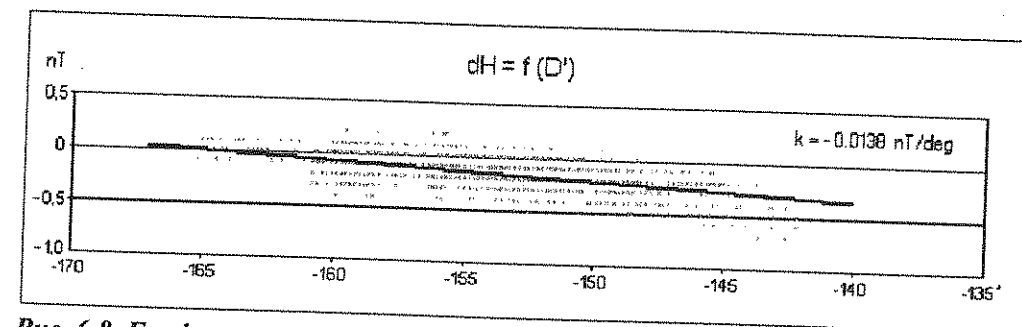


Рис. 6.8. График проверки ортогональности положения H -вариометра по отношению к плоскости магнитного меридиана.

Рекомендуется в программе редакторских изменений суточного файла минутных данных вести протокол правок, в который автоматически должны записываться все действия, приводящие к изменениям в массиве данных. Такой протокол позволяет выявить проблемные элементы в системе сбора и обработки данных.

6.5. Подготовка дополнительных материалов по вариациям ГМП

Магнитная обсерватория должна иметь специализированные программы для определения K -индексов, создания среднечасовых и среднемесячных таблиц.

Потребителей геомагнитной информации часто не интересуют детали процессов, происходящих в магнитном поле Земли. В этих случаях достаточно знать меру магнитной активности на каждый день. Очень долго применялась визуальная трехбалльная характеристика S : 0 – спокойное поле, 1 – возмущенное поле и 3 – поле сильно возмущенное. Такая характеристика была очень грубой и субъективной. Поэтому предлагались самые различные индексы магнитной активности. Наиболее популярным стал трехчасовой K -индекс, который был принят в 1939 г. по предложению Бартельса. Чтобы выделить возмущения геомагнитного поля, вызванные корпускулярными потоками, он рекомендовал сначала определить спокойные солнечно-суточные вариации S_q . Для этого на каждой магнитной обсерватории нужно выбрать несколько магнитограмм спокойного поля с четко выраженными дневными S_q вариациями (обычно отбирают по пять магнитограмм в месяц) и построить среднюю сглаженную кривую, которая становилась нулевой линией отсчета значений K -индексов. Таким образом, к « K -вариациям» относятся иррегулярные вариации, бухтообразные возмущения, повышенная солнечно-суточная вариация возмущенных периодов. Диапазон в нТл десятибалльной квазилогарифмической шкалы K -индексов зависит от широты расположения магнитной обсерватории. Наибольшему баллу $K = 9$ шкалы индексов была присвоена максимальная амплитуда вариаций во время очень большой мировой магнитной бури, произошедшей 16 апреля 1938 года. Все промежуточные значения индексов были привязаны к первоначальной шкале K -индексов немецкой обсерватории Нимегк. Для примера, шкала для трех обсерваторий представлена в табл. 6.6.

Таблица 6.6

К-индекс	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нимегк, Ирк. ΔB нТл	<5	<10	<20	<40	<70	<120	<200	<330	<500	≥ 500
Ташкент ΔB нТл	<3	<6	<12	<24	<40	<70	<120	<200	<300	≥ 300

В Иркутске во время бури 16.04.38 г. максимальная амплитуда вариаций ΔD составила 624 нТл, $\Delta H = 540$ нТл, $\Delta Z = 362$ нТл. Обсерватории, которые начали свою работу после 1938 г., должны согласовывать значение максимального K -индекса с отделениями IAGA через Центры сбора данных (напр., МЦД-Б2 kharin@wdcb.ru).

По методике Бартельса на основе «нулевых» линий сглаженной S_q -вариации двух горизонтальных компонент D и H геомагнитного поля рисовались прозрачные палетки с параллельными кривыми согласно таблице 6.6 и трехчасовой разметкой. Палетка подводилась параллельно базисным линиям к минимальному значению вариации на трехчасовом отрезке магнитограммы соответствующей компоненты. По максимальному значению вариации присваивалось значение K -индекса. Процедура снятия K -индексов повторялась для другого элемента и принималось максимальное значение индекса для каждого трехчасового промежутка. Изготовление палеток и сами измерения на магнитограммах производились вручную, занимали много времени и обладали низкой точностью при обработке малых амплитуд вариаций. В настоящее время определение K -индексов для цифровых данных осуществляется специальными программами.

На магнитной обсерватории «Иркутск» все основные операции определения K -индексов выполняются программой «k_ind_m.exe», в которой использованы принципы Бартельса. Такой подход сохраняет преемственность рядов обсерваторских K -индексов за предшествующие годы. Опытный наблюдатель обсерватории визуально по магнитограммам выбирает пять спокойных дней за каждый месяц с четко выраженным суточным ходом элементов. По запросу программы оператор вводит имена выбранных суточных файлов минутных данных. Далее происходит процесс создания «нулевых» линий путем осреднения и сглаживания вариаций склонения и горизонтальной компоненты (рис. 6.9). Созданный файл спокойного суточного хода сохраняется под именем нулевого дня обрабатываемого месяца (напр., 020700.txt).

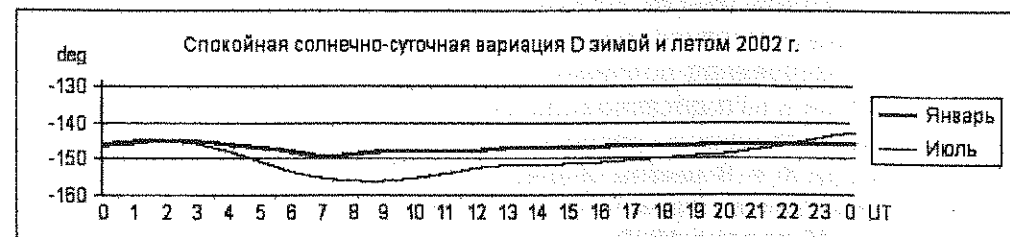


Рис. 6.9. Среднемесячные спокойные суточные вариации D в летний и зимний сезоны года.

Далее программа трехчасовыми интервалами обрабатывает последовательно все дни месяца и выдает таблицу K -индексов, напр., «k0308.irt». Кроме того, имеется возможность получать в оперативном порядке K -индексы на каждые сутки по «нулевому» файлу предыдущего месяца или такого же месяца прошлого года. Следует иметь в виду, что если в минутных данных не отредактированы сбойные значения, то в таблице могут появиться значительные ошибки значений K -индексов.

На некоторых обсерваториях применяются другие программные методы выявления спокойно-суточной S_q -вариации, основанные на математической обработке каждого дня. Например, S_q -вариация выводится методом наименьших квадратов с ограничениями на вторые производные вариаций и с применением весовых коэффициентов, которые экспериментально подбираются для лучшего совпадения с ручным способом определения K -индексов. Неплохие результаты дает так называемый FMI-метод, при котором на каждые сутки сначала определяются 24 опорные точки, служащие для построения плавной кривой S_q -вариации. Опорные точки вычисляются как среднее значение каждого часа с добавлением некоторого числа m минутных значений до начала этого часа и некоторого числа n минут после окончания часа. Число m зависит от местного времени, а n — от магнитной активности часа.

Любые индексы магнитной активности являются условными значениями, которые вычисляются по определенным общепринятым правилам. Если эти правила меняются, то вероятно следует изменить наименование индекса. Поэтому, на наш взгляд, программа определения K -индексов должна максимально приближаться к принятому авторскому методу Бартельса для сохранения адекватности предыдущих данных.

Оформление таблиц K -индексов не имеет общепринятого стандарта. Иркутская обсерватория создает месячные таблицы по принятым в 1962 г. рекомендациям ИЗМИРАН с добавлением информации о магнитных бурях, пяти спокойных и пяти возмущенных дней.

Ниже приведен стандарт ИНТЕРМАГНЕТ для годовой таблицы K -индексов:

Таблица 6.7

INSTITUTE OF SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS (ISTP)										
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch										
IRKUTSK IRT, RUSSIA										
K-Index Values for 2000 (K9 Limit = 500 nT)										
DA-MON-YR	DAY#	1	2	3	4	5	6	7	8	SK
1 - jan - 00	001	4	4	3	4	5	4	4	4	32
2 - jan - 00	002	3	3	3	3	2	4	4	2	24

30 - jan - 00	030	3	3	2	2	3	3	3	3	22
31 - jan - 00	031	3	3	3	1	3	3	2	2	20

В связи с тем, что шкала K -индексов является квазилогарифмической, то в качестве суточной характеристики дается суммарный K -индекс.

Планетарный K_p -индекс создается на базе средних значений K -индексов 12-ти магнитных обсерваторий: SIT (Аляска), MEA (Канада), FRD (США), OTT (Канада), HAD (Англия), ESK (Шотландия), LER (Шотландия), WNG (Германия), LOV (Швеция), BFE (Дания), CAN (Австралия), EYR (Новая Зеландия). Шкала K_p -индексов имеет следующий вид: 0_o, 1₋, 1_o, 1₊, 2.

..., 8+, 9-, 9o. Не всех исследователей устраивает квазилогарифмический K_p -индекс и тогда он возвращается в амплитуду вариаций, выраженную в нТл, который носит название A_p -индекс.

Каждой магнитной обсерватории рекомендуется вести каталог магнитных бурь, в котором указывается дата, время начала и конца каждой бури, ее продолжительность, время начала и конца активных периодов, максимальные амплитуды вариаций и краткая характеристика бури. Для магнитной бури с внезапным началом время начала бури можно определить с точностью до минуты, а в остальных случаях решение о времени начала бури с точностью до часа принимается по характеру ее активного развития. Время конца бури также определяется с точностью до часа и нередко можно критерием конца бури считать восстановление среднего уровня горизонтальной компоненты H магнитного поля. Определение времени активных периодов бури и времени окончания бури носит в значительной степени субъективный характер, т.к. нет еще четких критериев для этих понятий. В последние годы появилась возможность по оперативным данным мировой сети обсерваторий составить более объективную картину каждой магнитной бури. Продолжительность бурь обычно колеблется от 6 часов до трех суток. Словесная характеристика бури определяется амплитудой вариаций элементов. Для Иркутска эта характеристика представлена в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Иркутск	Малая (М)	Умеренная (У)	Большая (Б)	Очень большая (ОБ)
D нТл	от 80 до 100	101...160	161...220	> 221
H нТл	от 70 до 125	126...180	181...240	> 241
Z нТл	от 25 до 40	41...70	71...130	> 131

На основе суточных файлов минутных значений вариаций геомагнитного поля на каждый месяц программой «3-tab.exe» создаются среднечасовые таблицы (табл. 6.9). В этих же таблицах производится подсчет среднесуточных и среднемесячных значений по всем дням, по пяти спокойным и пяти возмущенным дням, которые используются для подсчетов среднегодовых значений всех компонент геомагнитного поля.

Таблица 6.9

GEOMAGNETIC FIELD																
IRKUTSK IRT Latitude 52° 10' Longitude 104° 27'																
Full intensity in nanotesla 60200 + table value																
2002 June		0	1	2	3	4	5	6	7	*	19	20	21	22	23	Mean
Day	Int															
1	Q	113	108	102	97	99	102	102	105	*	123	122	124	123	113	105
2	D	108	103	93	82	80	93	104	107	*	110	114	116	114	112	110
***		*****														***
30		106	100	93	88	83	83	91	94	*	112	114	116	105	99	104
Mean		107	101	95	90	89	93	97	103	*	115	115	116	114	111	109
Q-mean		111	105	100	96	97	98	98	102	*	115	116	118	118	114	111
D-mean		108	100	95	88	85	94	102	106	*	114	115	116	113	108	110

Московский международный Центр сбора данных МЦД-Б2 несколько лет назад перешел на другой формат среднечасовых таблиц и поэтому для передачи данных в Центр производится переформатирование файлов таблиц. Проблема разных форматов, принятых у потребителей геофизи-

ческой информации, всегда создает затруднения при передаче обсерваторских данных. Если обсерватория имеет своего программиста, то эта проблема решается достаточно быстро путем создания программ переформатирования исходных материалов под запросы конкретного потребителя продукции.

Среднемесячные значения из этих таблиц собираются в специальном файле среднемесячных данных, в котором производятся вычисления всех остальных элементов геомагнитного поля: $X = H \cdot \cos D$, $Y = H \cdot \sin D$, $I = (180/\pi) \cdot \arcsin(Z/H) = (180/\pi) \cdot \arctg(Z/H)$.

Среднемесячные значения элементов ГМП могут изменяться не только из-за вековой вариации магнитного поля Земли, но и в зависимости от числа магнитных бурь в месяце. Эта зависимость наиболее четко прослеживается в горизонтальной компоненте H , среднемесячное значение которой обычно уменьшается на несколько нТл, если в течение месяца наблюдалось несколько умеренных и больших бурь.

На основании среднемесячных значений элементов по окончании года вычисляются их среднегодовые значения, которые заносятся в файл вековой вариации компонент ГМП в районе нахождения обсерватории. Так как вековая вариация обусловлена процессами на значительной глубине под поверхностью Земли, то обычно наблюдается плавное изменение среднегодовых значений геомагнитного поля. Резкие изломы в графиках вековой вариации обычно обусловлены переносом наблюдений в другой район или связаны с низким качеством абсолютных наблюдений. Из представленных графиков вековой вариации горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля в Иркутске (рис. 6.10, 6.11), несмотря на сжатый масштаб по оси ординат, можно видеть два скачка в данных, которые объясняются переносом на 20 км места расположения обсерватории в 1914 и 1959 г. Перенос наблюдений был вызван увеличением уровня воздействия промышленных помех на работу магнитометров.

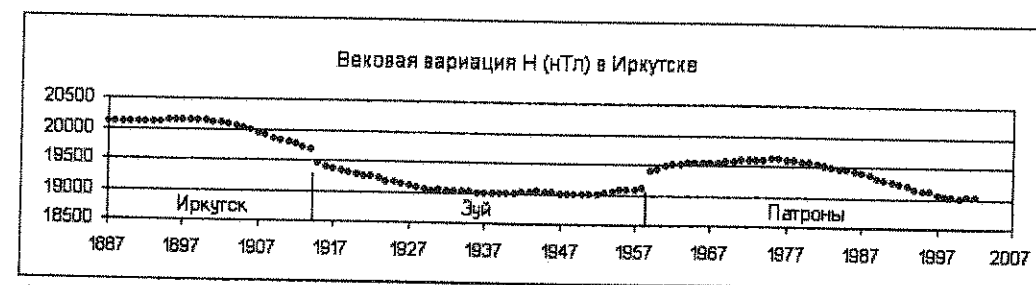


Рис. 6.10. Вековая вариация горизонтальной компоненты H по наблюдениям в Иркутске.

Как уже отмечалось выше, всю информацию по состоянию магнитного поля Земли обсерватории готовят на основе минутных данных вариационных станций. Ошибки в определении базисных уровней впрямую вносятся во все выходные данные, кроме данных по K -индексам.

Если программы разрабатываются под оборудование конкретной обсерватории, то рекомендуется вести совместную работу программиста со специалистами-наблюдателями.

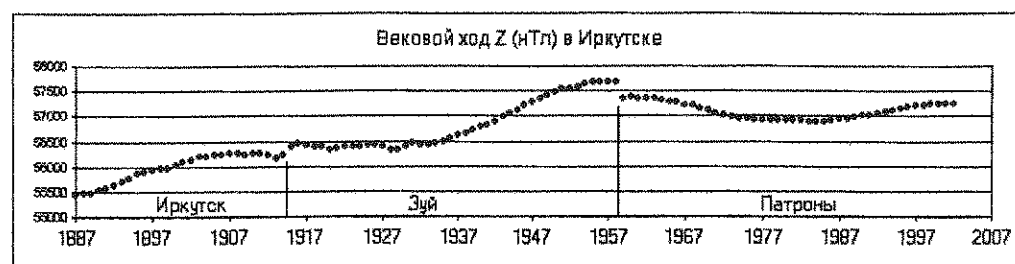


Рис. 6.11. Вековая вариация вертикальной компоненты Z по наблюдениям в Иркутске.

В этом случае можно избежать скрытых ошибок в программах обработки данных и обеспечить оперативные многофункциональные виды контроля выходной информации. Очень важно предусмотреть все возможные нештатные ситуации, которые могут возникнуть в практике обсерваторской работы, и разработать соответствующее программное обеспечение для их оперативного решения. Комплект программного обеспечения желательно дополнить программой инсталляции, которая позволит обеспечить сеть магнитных обсерваторий универсальной системой обработки цифровых данных.

6.6. Архивные материалы

До недавнего времени все материалы магнитной обсерватории оформлялись исключительно на бумажных носителях и был четкий порядок их хранения. В архивном помещении имелись специальные шкафы для магнитограмм, альбомов с графиками абсолютных наблюдений и базисных линий, папок с таблицами среднечасовых значений, абсолютных наблюдений, цен делений, температур вариационного павильона, K -индексов. Сохранению подлежали книжки и графики определения температурных коэффициентов вариометров и абсолютных магнитометров, астрономические наблюдения азимута миры, измерения градиентов магнитного поля наблюдательных столбов и территории обсерватории, определения констант абсолютных приборов, материалы поверки магнитометров сторонних организаций. Ежеквартально составлялись и хранились текстовые отчеты с подведением итогов наблюдений, перечислением выполненных работ и указанием всех исполнителей. Велся специальный журнал движения архивных материалов. При надлежащем отношении персонала обсерватории к архивному делу бумажные носители действительно могли сохраняться вечно.

В то же время знакомство с архивами показывает, что на многих обсерваториях утеряны первичные материалы по магнитной съемке территории, примененным материалам при строительстве павильонов, астрономическим наблюдениям миры и другим результатам магнитных наблюдений. Отсутствие такой информации не позволяет провести анализ изменения магнитной обстановки на обсерватории с помощью последующих однотипных контрольных наблюдений.

Переход к цифровым методам получения и обработки данных сломал старую архивную систему, но еще не создал новую. Бумажный носитель сейчас воспринимается как анахронизм, но цифровая техника обработки и сохранения данных стремительно изменяется, меняются языки программного обеспечения. Еще недавно массивы цифровых данных сохранялись

на магнитных лентах и перфолентах, которые сейчас уже практически недоступны чтению и много ценной информации уже потеряно за последние десятилетия. В настоящее время Иркутская магнитная обсерватория все результаты измерений сохраняет в виде текстовых файлов на дискетах, жестких дисках персональных компьютеров и частично на оптических дисках CD-ROM.

Каждая обсерватория должна продолжить историческую функцию хранителя материалов наблюдений, проведя определенную перестройку организации архива.

Магнитная обсерватория должна иметь персональный компьютер с лазерным записывающим накопителем CD и цветным принтером для ежедневной обработки данных, подготовки и копирования архивных материалов. На диске CD-ROM следует по окончании года записать упакованные суточные файлы секундных данных магнитных бурь, суточные файлы минутных данных цифровых вариационных станций за все дни года, файлы с результатами контроля и анализа наблюдений, измерения констант вариометров и абсолютных магнитометров, определений азимута миры и градиентов между наблюдательными столбами. На втором диске сохраняются файлы данных после окончательной редакции, предназначенных для отправки в центры сбора данных и квартальные отчетные материалы (таблицы наблюдений базисных уровней вариометров, среднечасовые таблицы и K -индексы). В качестве приложения на этих дисках должен находиться тот минимум программного обеспечения, который позволит использовать данные и просматривать вариации ГМП в графическом виде спустя несколько лет. В любом случае, архивные материалы должны сопровождаться текстовой информацией о примененных форматах и структуре записи данных. Эта мера связана с возможным изменением в последующие годы форматов файлов и языка программного обеспечения. Задача состоит в том, чтобы обеспечить возможность чтения архивных материалов через 50 и 100 лет.

Файлы обработки абсолютных наблюдений можно сохранять на дискетах сроком до двух лет. Все графические материалы желательно копировать на бумажные носители, которые очень удобны для быстрого просмотра и отбора необходимой информации.

Для хранения дисков CD и дискет в архивном помещении обсерватории необходимо иметь металлический сейф с отделениями по годам хранения информации.

Окончательные данные Российских обсерваторий следует отправлять в МЦД-Б2 по адресу Москва, ул. Молодежная, 3 stpftp@zeus.wdcb.ru, который готов принять на хранение в цифровом виде любые материалы обсерваторий.

Архивом должен заниматься очень ответственный и аккуратный сотрудник обсерватории, через которого должны проходить все материалы обсерватории. У архиватора должны храниться ключи от архива и журнал учета движения архивных материалов. Неполнота материалов в архиве или их утрата часто приводят к невозможной потере важной информации многолетней работы обсерватории.

7. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБСЕРВАТОРИЯМ СЕТИ ИНТЕРМАГНЕТ

Научные исследования и решение многих практических задач сегодня сопровождаются освоением современных информационных технологий. Необходимость иметь информацию по состоянию геомагнитного поля в реальном времени заставила искать пути по реализации этой задачи на базе мировой сети магнитных обсерваторий. В 1989 г. впервые была опробована схема из магнитных обсерваторий Великобритании, США и Канады, которые передавали по спутниковой и компьютерной сети минутные данные вариаций геомагнитного поля с интервалами 12 и 60 минут. Проект ИНТЕРМАГНЕТ был принят Исполнительным комитетом IAGA с рекомендацией расширения глобальной сети цифровых магнитных обсерваторий. Число обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ с каждым годом увеличивается и в настоящее время более 85 обсерваторий 32-х стран через спутники или ежедневно по компьютерным и телефонным сетям передают данные в центры сбора геомагнитной информации (GIN). Окончательная информация с каждой обсерватории, входящей в сеть ИНТЕРМАГНЕТ, в виде минутных данных с уточненными базисными значениями, среднегодовыми таблицами, таблицами *K*-индексов ежегодно оформляется для создания дисков CD-ROM. Такие диски с годовыми данными всей сети ИНТЕРМАГНЕТ распространяются среди участников проекта.

ИНТЕРМАГНЕТ стремится поддерживать строгие требования к качеству данных, предполагая, что каждая обсерватория имеет цифровые вариационные станции, современные магнитометры, обеспечена службой точного времени, имеет надежную связь для оперативной передачи данных и осуществляет тщательный контроль наблюдений.

Магнитная обсерватория сети ИНТЕРМАГНЕТ (ИМО) должна проводить регулярные (не реже одного раза в неделю) абсолютные измерения и непрерывно регистрировать с помощью цифровых вариационных станций три компоненты (*X*, *Y*, *Z*) геомагнитного поля. Дополнительно необходимо иметь непрерывно работающий протонный магнитометр, измеряющий полный вектор *F*, который выполняет функцию контрольного протонного вариометра.

В качестве инструментов для абсолютных измерений рекомендуется применение протонных прецессионных магнитометров с разрешающей способностью не менее 0,1 нТл и феррозондовых деклинометров /инклинометров с ценой деления не хуже 6".

С помощью абсолютных наблюдений ИМО должны обеспечивать погрешность определения базисных уровней вариометров в пределах ± 5 нТл. Если при строительстве магнитной обсерватории были выполнены необходимые требования к территории, павильонам и приборным постамам магнитной обсерватории, то регулярными наблюдениями с помощью современных абсолютных магнитометров можно уверенно определять базисные уровни вариометров с погрешностью не более ± 1 нТл.

Магнитная обсерватория ИМО должна каждый час или раз в сутки передавать оперативные цифровые минутные данные по вариациям геомагнитного поля в центры GIN с максимальной задержкой до 72 часов после получения и предварительной обработки ежесуточных минутных данных.

Вариационные станции ИМО должны удовлетворять следующим требованиям:

- Разрешающая способность 0.1 нТл
- Динамический диапазон для северных широт 6000 нТл
- для средних широт 2000 нТл
- Частотный диапазон измерений от 0 до 0.1 Гц
- Частота считывания данных 1 Гц
- Температурные коэффициенты ≤ 0.25 нТл/°C
- Дрейф базисных уровней ≤ 5 нТл/год
- Погрешность определения базисных значений вариометров ± 5 нТл

Протонный вариометр ИМО должен удовлетворять следующим требованиям:

- Разрешающая способность 0.1 нТл
 - Погрешность измерений 1 нТл
 - Частота считывания данных 0.033 Гц
- Требования к точности временной привязки (датированию) данных:
- Уход системных часов, не более 5 с/мес.
 - При наличии спутниковой связи, не более ± 1 с

Для многих магнитных обсерваторий могут возникнуть серьезные проблемы при выполнении двух пунктов из перечисленных технических требований, – по величине дрейфа базисных уровней вариометров и точности датирования (временной привязки) регистрируемых вариаций ГМП. Чтобы иметь дрейф базисных уровней вариометров в пределах 5 нТл/год, необходимо иметь не только высокостабильные цифровые вариационные станции, но и располагать качественным вариационным павильоном со стабильными немагнитными постами. Также не везде легко решить вопрос с точностью системных часов обсерватории, т.к. часто программное обеспечение цифровых вариационных станций использует компьютерное время, не обладающее высокой стабильностью.

Исполнительный комитет ИНТЕРМАГНЕТ рекомендует всем ИМО производить регулярные сверки рабочих магнитометров с инспекторскими, увеличивать число абсолютных наблюдений при нестабильных базисных уровнях вариометров, поддерживать стабильную температуру в павильонах. Следует постоянно контролировать территорию и павильоны обсерватории от загрязнения магнитными материалами и ежегодно проводить измерения градиентов геомагнитного поля между постами абсолютного павильона и наружным контрольным постаментом.

Остальные требования ИНТЕРМАГНЕТ в основном касаются отправляемых в GIN форматов данных, которые детально изложены в соответствующем техническом руководстве – INTERMAGNET Technical Reference Manual. До 2003 г. наша страна в мировой сети ИМО была представлена одной Иркутской магнитной обсерваторией, но уже ряд обсерваторий (Новосибирск, Борок, Паратунка) проводят модернизацию своего оборудования и с 2005 г. стали участниками мировой сети ИНТЕРМАГНЕТ. Кроме того, некоторые магнитные обсерватории работают в режиме передачи информации в реальном времени по сети Интернет. Ведутся активные работы по созданию и выпуску новых магнитометров повышенной точности в ИЗМИРАН, Уральском техническом университете, Львовском центре ИКИ, НПО «Геологоразведка» в Санкт-Петербурге. Поэтому есть уверенность, что к следующему периоду максимальной активности Солнца (2011 г.), сеть российских магнитных обсерваторий будет полноценно участвовать в целом ряде международных геофизических проектов.

ЛИТЕРАТУРА

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. – М.: Мир, 1974.
- 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 CD-ROM. – М., 2001.
- Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
- Багратуни Г.В., Лукьянов В.Ф., Сокольский Я.А., Сухов А.Н. Справочник по геодезическим разбивочным работам. – М.: Недра, 1982.
- Бурцев Ю.А., Захаров П.И., Ларкин В.Г., Семенов И.Х., Тимофеев Г.А. Магнитный теодолит для измерения склонения и наклона геомагнитного поля. – М., 1987.
- Геомагнитная активность и ее прогноз / Под ред. М.И. Пудовкина и А.Д. Шевнина. – М.: Наука, 1878.
- ГОСТ 8.009-84 Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
- Кудревский А.И. Методика измерения горизонтальной и вертикальной компонент вектора геомагнитного поля в обсерватории модульными магнитометрами. – М., 1989.
- Кудревский А.И. Измерение абсолютных величин горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля в низкоширотной обсерватории Далат, Вьетнам. – М., 1990.
- МИ156-78 Методика поверки рабочих средств измерения магнитной индукции постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Тл. – М.: Изд-во стандартов, 1979.
- Мюхкюра В.И. Компонентный протонный магнитометр. Геофизическая аппаратура, N31. – Л.: Недра, 1967.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. – М.: Мир, 1986.
- Пономарев Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. – М.: Наука, 1985.
- Пенкевич М.С. Руководство к производству и обработке магнитных наблюдений по генеральной магнитной съемке СССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1946.
- Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968.
- Сапунов В.А., Денисов А.Ю., Савельев Д.В. Опыт разработки Оверхаузеровского компонентного магнитометра // Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока / Сб. докл. школы-семинара (с. Паратунка Камчатской обл., 11-16 августа 2003 г.). – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2003. – С. 30-47.
- Скротский Г.В., Степанов А.П., Стоцкий В.М., Филатов А.И. Применение динамической поляризации ядер для увеличения чувствительности и быстродействия ядерных прецессионных магнитометров. – Геофизическая аппаратура, N42. – Л.: Недра, 1970.
- Солнечная и солнечно-земная физика / Под ред. А. Бруцена и Ш. Дюрана. – М.: Мир, 1980.
- Справочник по переменному магнитному полю СССР / Под ред. В.И. Афанасьевой. – Л., 1954.
- Яковлев Н.И. Особенности работы феррозондового датчика в резонансном режиме. – Геофизическая аппаратура, N35. – Л.: Недра, 1968.
- Яновский Б.М. Морфология и теория магнитного поля Земли и его вариаций. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1964.
- INTERMAGNET. Technical Reference Manual. Ver. 4.0, Denver Federal Center, 1999.
- Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. Published by IAGA, Warszawa, Poland, 1996.

Приложение 1

**Техническое задание
на разработку программного обеспечения первичной обработки
цифровых данных магнитной обсерватории**

ПРОГРАММА

первичной обработки данных цифровой магнитовариационной станции

Программа первичной обработки данных магнитовариационной станции предназначена для создания суточных файлов минутных значений вариаций геомагнитного поля из исходного суточного файла мгновенных значений АЦП при ежедневной обработке информации цифровых магнитовариационных станций.

Программа первичной обработки данных должна строиться по принципу последовательной обработки исходного суточного файла мгновенных значений с возможностью остановки процесса после завершения очередной операции, просмотра данных в графическом виде и сохранения результатов в виде завершеного файла. Такой режим позволяет использовать промежуточные результаты для редактирования данных и уточнения коэффициентов преобразования датчиков (цен делений), поправочных коэффициентов и базисных значений вариационных станций.

Программа первичной обработки данных должна запускаться из пользовательского меню комплекта программ обработки и анализа данных геомагнитных измерений.

Подпрограмма 1. Подготовка суточного файла мгновенных значений

В зависимости от типа АЦП и программного обеспечения считывания данных суточный файл мгновенных значений имеет данные через каждую секунду или через несколько секунд. Единого стандарта для исходных данных нет. Файл мгновенных значений – это текстовый файл ASCII, содержащий колонки с датой, временем и данными мгновенных значений в милливольтх 4-х каналов АЦП. Первичный файл секундных данных сохраняется под именем даты с добавлением буквы условного обозначения вариационной станции и с расширением «.mV».

Операция 1.1. Проверка и редакция первичных данных.

Канал времени в исходном файле подлежит проверке на последовательность всех значений времени и на число отсчетов АЦП за сутки для определения сбоев и потерь данных. Пропущенные значения в канале времени автоматически заполнить до следующего зафиксированного отсчета времени, обеспечив тем самым постоянное число строк в каждом файле мгновенных значений. Пропущенные данные информационных каналов заполнить числом «99999».

Одиночные секундные значения информационных каналов, которые по амплитуде резко отличаются от предыдущего и последующего значений можно отнести к случайным сбойным значениям, которые подлежат корректировке. Для этого нужно вычислить разности последовательных значений $(U_i - U_{i+1})$ и проверить выполнение условия:

$$|(U_{i-1} - U_i) - (U_i - U_{i+1})| \geq 3 \cdot U_s,$$

где U_s – среднее квадратическое значение шума каждого измерительного канала.

Если условие выполняется, то такое значение U_i принимается за ошибочное (сбой в данных) и вместо него записывается среднее двух соседних значений:

$$U_i = (U_{i-1} + U_{i+1})/2$$

Значения U_s должны храниться в файле констант вариационной станции.

Информацию о потерях и сбоях в канале времени необходимо выводить в виде протокола внесенных изменений, напр., в файле ERROR_m.txt. Здесь буква m – условное обозначение вариационной станции.

Подпрограмма 2. Создание суточного файла мгновенных данных в единицах измерения геомагнитного поля и температуры

Операция 2.1. Редуцирование.

Операция редуцирования, – это преобразование данных из единиц измерения напряжения сигналов датчиков (мВ) в единицы измерения геомагнитного поля (нТл) и температуры (°С).

Секундные значения всех информационных каналов в мВ умножаются на соответствующие коэффициенты преобразования измерительных каналов D, H, Z :

$$G_D (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_H (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_Z (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_t (0.1 \text{ } ^\circ\text{С/мВ})$$

или каналов X, Y, Z :

$$G_X (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_Y (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_Z (0.1 \text{ нТл/мВ}), G_t (0.1 \text{ } ^\circ\text{С/мВ})$$

В результате редуцирования данные вариаций геомагнитного поля и температуры представлены в десятых долях нТл и °С с точностью до единицы:

$$\Delta D (0.1 \text{ нТл}), \Delta H (0.1 \text{ нТл}), \Delta Z (0.1 \text{ нТл}), \Delta t (0.1 \text{ } ^\circ\text{С})$$

$$\Delta X (0.1 \text{ нТл}), \Delta Y (0.1 \text{ нТл}), \Delta Z (0.1 \text{ нТл}), \Delta t (0.1 \text{ } ^\circ\text{С})$$

Операция 2.2. Ввод поправки на неортогональность положения датчиков.

Из-за неточной установки вариометров по отношению к магнитному меридиану в процессе анализа данных может выявиться зависимость измеренных вариаций горизонтальных элементов друг от друга с коэффициентами G_{DH} и G_{HD} , значения которых заносятся в файл констант станции. При обработке файла вариаций программа должна учитывать необходимость ввода поправки на «неортогональность» магнитных осей кварцевых датчиков или блока вариометров феррозондовой вариационной станции:

$$\Delta D_{\perp} = G_{DH} \cdot \Delta H \text{ и } \Delta H_{\perp} = G_{HD} \cdot \Delta D$$

$$\Delta X_{\perp} = G_{XY} \cdot \Delta Y + G_{XZ} \cdot \Delta Z$$

$$\Delta Y_{\perp} = G_{YX} \cdot \Delta X + G_{YZ} \cdot \Delta Z$$

$$\Delta Z_{\perp} = G_{ZX} \cdot \Delta X + G_{ZY} \cdot \Delta Y$$

Поправочные коэффициенты находятся в файле констант вариационной станции.

Операция 2.3. Ввод поправки на смещение нуля температурного канала.

Данные температурного канала могут не совпадать с показаниями образцового термометра из-за смещения нуля электронного датчика температуры. Поправка «нуля» t_0 также находится в файле констант температурного канала.

Операция 2.4. Ввод поправки на температуру.

Как правило, вариометры с блоком усилителей имеют некоторые температурные коэффициенты μ , которые заносятся в файл констант вариометров. Температурные поправки вводятся по формулам:

$$\Delta B_t = \mu_B \cdot (t + t_0 - t_m),$$

где: ΔB – одна из компонент геомагнитного поля,

μ_B – соответствующий температурный коэффициент датчика,

t_0 – поправка на смещенный ноль температурного канала,

t_m – температура приведения, которая обычно принимается около среднегодовой температуры в кабинах вариационного павильона (+15, +18 или +20 °С).

Файлы мгновенных значений вариаций компонент геомагнитного поля сохраняются под именем даты и условным обозначением вариационной станции. Эти данные используются при определении базисных значений вариометров в процессе обработки абсолютных наблюдений и в качестве базы данных быстрых магнитных возмущений.

Подпрограмма 3. Создание суточного файла минутных данных

Операция 3.1 Фильтрация мгновенных значений.

При регистрации длиннопериодных вариаций геомагнитного поля обсерваториям достаточно получать данные через каждые 5 или 10 секунд. При создании минутных значений из секундных данных необходимо осуществить цифровую фильтрацию этих данных. Можно применить универсальный метод, при котором исходные секундные значения сначала усредняются до пятисекундных или десятисекундных значений, которые затем с помощью цифрового фильтра объединяются в минутные данные суточного файла. В моменты времени, кратные 5 или 10 с, создаются средние значения из секундных данных.

Примечание. Пропущенные данные (значения «99999») не должны участвовать в операциях подсчета средних 5-ти или 10-ти секундных значений.

ИНТЕРМАГНЕТ рекомендует для создания файла минутных данных использовать 5-секундные данные, применяя 19-точечный цифровой фильтр Гаусса. Значения информационных каналов на каждую полную минуту создаются с помощью весовых коэффициентов по следующей формуле:

$$U_{xx} = C_{10} \cdot (\Delta B_{-45} + \Delta B_{+45}) + C_9 \cdot (\Delta B_{-40} + \Delta B_{+40}) + C_8 \cdot (\Delta B_{-35} + \Delta B_{+35}) + C_7 \cdot (\Delta B_{-30} + \Delta B_{+30}) +$$

$$+ C_6 \cdot (\Delta B_{-25} + \Delta B_{+25}) + C_5 \cdot (\Delta B_{-20} + \Delta B_{+20}) + C_4 \cdot (\Delta B_{-15} + \Delta B_{+15}) +$$

$$+ C_3 \cdot (\Delta B_{-10} + \Delta B_{+10}) + C_2 \cdot (\Delta B_{-5} + \Delta B_{+5}) + C_0 \cdot \Delta B_0,$$

где: $C_0 = 0,12578865$; $C_1 = 0,11972085$; $C_2 = 0,10321785$; $C_3 = 0,08061140$; $C_4 = 0,05702885$; $C_5 = 0,03654680$; $C_6 = 0,02121585$; $C_7 = 0,01115655$; $C_8 = 0,00531440$; $C_9 = 0,00229315$.

Для создания файла минутных данных из десятисекундных значений следует применить девятиточечный цифровой фильтр Гаусса. Значения информационных каналов на каждую полную минуту создаются с помощью весовых коэффициентов по следующей формуле:

$$\Delta B_{xx} = 0,0031628 \cdot (\Delta B_{-40} + \Delta B_{+40}) + 0,02321702 \cdot (\Delta B_{-30} + \Delta B_{+30}) +$$

$$+ 0,09642526 \cdot (\Delta B_{-20} + \Delta B_{+20}) + 0,22657992 \cdot (\Delta B_{-10} + \Delta B_{+10}) + 0,30123004 \cdot \Delta B_0,$$

где: ΔB_{xx} – значение информационного канала в полную минуту,

$\Delta B_{\pm k}$ – десятисекундные значения информационных каналов.

Допускается первую минуту суток (в 00:00:00 и в 23:59:59) создавать из пяти первых значений текущего файла с двойным счетом четырех значений, если отсутствует доступ к файлам предыдущих и последующих суток:

$$\Delta B_{00} = 0.0031628 \cdot 2\Delta B_{+40} + 0.02321702 \cdot 2\Delta B_{+30} + 0.09642526 \cdot 2\Delta B_{+20} + 0.22657992 \cdot 2\Delta B_{+10} + 0.30123004 \cdot \Delta B_0$$

Операция 3.2. Вычисление элементов геомагнитного поля.

Для создания абсолютных значений геомагнитного поля к вариациям необходимо прибавить значения базисных уровней вариометров, принятые по результатам абсолютных наблюдений и введенных в файл констант.

Для вариационных станций, установленных по геомагнитному меридиану горизонтальная компонента H в десятых долях нТл вычисляется по приведенной ниже формуле и результат округляется до целых единиц:

$$H = [(\Delta H + 10 \cdot H_0)^2 + \Delta D^2]^{1/2},$$

где H_0 (нТл) – принятое значение базисного уровня горизонтальной компоненты, нТл,

ΔH , ΔD – вариации горизонтальных компонент в десятых долях нТл.

Склонение D вычисляется в сотых долях угловой минуты по приведенной ниже формуле и результат округляется до целых единиц:

$$D = [(180 \cdot 6000 / \pi) \cdot \arctg(\Delta D / H)] + 100 \cdot D_0,$$

где D_0 (угл. мин.) – принятое значение базисного уровня склонения из файла констант.

Для вариационных станций, установленных по географическому меридиану, компоненты X , Y , Z к значениям вариаций в десятых долях нТл прибавляются соответствующие базисные значения: $X = \Delta X + 10 \cdot X_0$, $Y = \Delta Y + 10 \cdot Y_0$, $Z = \Delta Z + 10 \cdot Z_0$,

где X_0 , Y_0 , Z_0 (нТл) – принятые значения базисных уровней компонент из файла констант.

Операция 3.3. Вычисление полного вектора F .

Полный вектор F в десятых долях нТл вычисляется на каждую минуту с помощью элементов поля H и Z по известной формуле с округлением результатов до целых единиц:

$$F = (H^2 + Z^2)^{1/2}, \text{ или } F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$

Примечание. Операция вычисления F должна осуществляться после любой последующей редакторской правки суточного файла минутных данных.

Формат суточного файла минутных данных

Первые две строки текстового суточного файла минутных значений предназначены для служебной информации. Для удобства чтения и загрузки файла в электронные таблицы вся информация в файле должна быть расположена в виде колонок.

Т.к. обсерватория может иметь две цифровые магнитовариационные станции, то им обычно присваивают условные имена, напр., MVS, BVS. В первой строке первой колонки необходимо ввести имя станции. Следующие две позиции оставить свободными для последующей автоматической записи числа редакторских правок данных. В третьей колонке первой строки записывается дата, напр., 24.09.04. Принятые коэффициенты преобразования и коэффициенты поправок вводятся в последующие колонки

этой строки по мере выполнения операций обработки данных. Такой способ заполнения первой служебной строки позволяет защитить данные от случайной попытки повторения операций при нестандартном режиме обработки данных.

Третья, четвертая и пятая колонка второй строки предназначены для записи принятых значений базисных уровней, которые заполняются при выполнении операции 3.2.

Третья строка заполняется при выполнении операций подпрограммы 2 и имеет постоянный формат заголовков колонок данных, которые упрощают построение графиков в электронных таблицах:

h m D H Z t F

Колонка часов заполняется числами от 00 до 23, а колонка минут – повторяющимися блоками от 00 до 59.

Колонки данных геомагнитного поля должны иметь по 6 позиций для цифр и знаков, колонка температуры – 4 позиции. Между колонками должно быть по одному пробелу.

Например:

00 00 -15002 189939 572442 156 603131

00 01 -14995 189937 572441 156 603130

Суточные файлы минутных данных под именем даты и условным обозначением вариационной станции должны располагаться в подкаталоге данных этой станции (напр. 041121m.txt в подкаталоге MVS каталога GEOMAG).

Файл констант

Текстовый файл констант вариационных станций используется программами первичной обработки данных для создания суточных файлов минутных значений, графических материалов, оперативной информации К-индексов. Данный файл может находиться в каталоге геомагнитных данных GEOMAG.

Пример файла констант const.txt:

N	Канал	Us mV	G nT/mV	G _⊥ nT/mV	μ nT/°C	t _m °C	t _o °C	B ₀ min/ nT	B _{go} 0.01/ 0.1nT
1	D_mvs	100	-0.077	0	0.21	15		-135.3	-16000
2	H_mvs	100	-0.075	0	0.54	15		19013.2	189000
3	Z_mvs	100	-0.073		1.25	15		57190.5	571000
4	t_mvs	20	0.051				-2.5		10

Первая колонка обозначает номера задействованных каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) двух магнитовариационных станций.

Вторая колонка – перечень датчиков станции MVS и станции BVS, подключенных к АЦП.

Колонка Us – «ворота» для выявления импульсной помехи в секундных данных.

Колонка G – коэффициенты преобразования вариометров и температурных датчиков.

Колонка G_⊥ – коэффициенты поправок за неортогональность датчиков.

Колонка μ – температурные коэффициенты вариометров.

Колонка t_m – температура приведения.

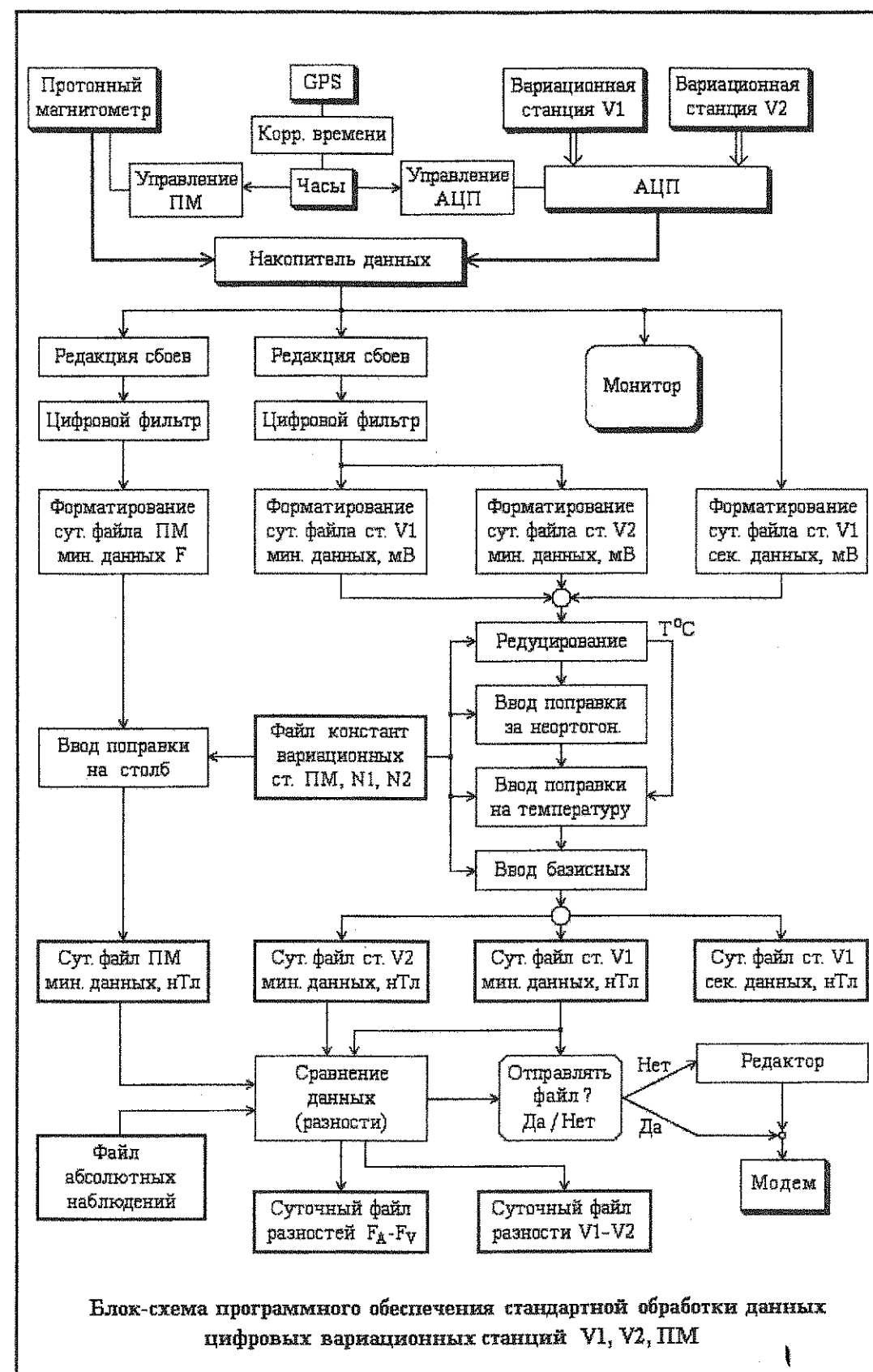
Колонка B_0 – значения базисных уровней вариометров и датчика температуры.

Колонка B_{go} – значения нулевых уровней графических магнитограмм.

Редакция файла констант производится через пользовательское меню при сохранении старого файла с порядковым номером очередной редакции в имени файла. Базисные значения обычно редактируются ежемесячно, а при значительном дрейфе вариометров – через несколько дней. Остальные значения в файле констант изменяются значительно реже, – обычно после проведения специальных измерений, анализа квартальных данных или проведения ремонтно-наладочных работ.

Блок-схема предлагаемого варианта оперативной обработки данных представлена на рис. 1 настоящего Приложения 1.

Несколько отличаются методы обработки и подготовки данных, принятые на магнитной обсерватории «Ключи» (Новосибирск). Материал по работе обсерватории любезно предоставил ее руководитель к.ф.м.н. С.Ю. Хомутов (см. Приложение 2).



Геомагнитные наблюдения в Новосибирске (Геофизическая обсерватория "Ключи")

1. Введение

Новосибирская комплексная магнитно-ионосферная станция (Геофизическая обсерватория) организована по Постановлению Бюро Президиума АН СССР от 20/26 апреля 1962 г. Первая очередь строительства была завершена в 1964 г. около пос. Ключи в 10 км от Новосибирского научного центра. Для проведения магнитных измерений на удалении около 400 м от главного здания обсерватории были построены три типовых павильона. Регулярные измерения по стандарту IAGA (код обсерватории NVS) были начаты в 1967 г. Регистрация вариаций геомагнитного поля (ГМП) осуществлялась тремя сериями кварцевых вариометров Боброва с фоторегистрацией, причем основная серия используется до настоящего времени. Для абсолютных наблюдений использовались как типовые кварцевые магнитометры QHM и протонные магнитометры, так и нестандартные инструменты, в том числе собственной разработки (протонный магнитометр АКМ и феррозондовые DI-магнитометры).

В 2003 г. обсерватория осуществила переход на цифровые методы регистрации и обработки данных геомагнитных наблюдений. Были установлены трехкомпонентный феррозондовый вариационный магнитометр LEMI-008 (ЛЦ ИКИ, г. Львов) и оверхаузеровский протонный магнитометр POS-1 (УГТУ, г. Екатеринбург). Расположение аппаратуры в магнитных павильонах схематически показано на рис. 1.

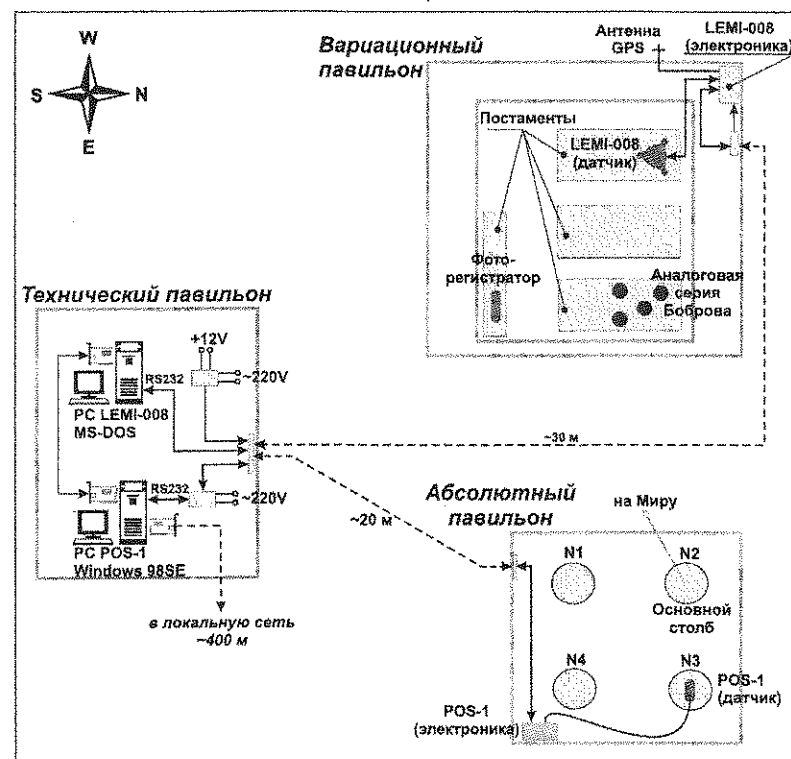


Рис. 1. Схема размещения аппаратуры в павильонах магнитной обсерватории «Ключи».

В итоге проведенной модернизации обсерватория "Ключи" в 2004 г. получила официальный статус магнитной обсерватории международной сети INTERMAGNET.

2. Абсолютные наблюдения

Абсолютный павильон размером 3×3 м из бруса под шиферной крышей имеет 4 приборных столба, причем основной постамент изготовлен из силикатного кирпича с мраморной столешницей. Около абсолютного павильона построен внешний постамент из стеклоблоков, используемый для контрольных наблюдений. Астрономическая мира в виде стального швеллера высотой 2 м на бетонном основании находится на расстоянии около 400 м от павильона. Азимут миры через два-три года переопределяется по астрономическим наблюдениям Солнца, видимого на закате через окно с основного столба.

В настоящее время для абсолютных наблюдений обсерватория "Ключи" использует феррозондовые DI-магнитометры на базе немагнитных теодолитов Theo020B и 3T2KP, устанавливаемых для измерений на основной столб, и протонный магнитометр POS-1, датчик которого постоянно размещен на столбе N3 в специальной оправке, которая обеспечивает его точное положение для сохранения неизменной градиентной поправки «на столб».

Методика наблюдений склонения D и наклона I стандартная и достаточно подробно изложена в разделе 4.3 настоящего «Руководства». Моменты наведения по магнитному полю при измерениях склонения D и наклона I фиксируются световыми отметками на магнитограммах и записываются с точностью до 1 с в журнале наблюдений.

Протонный магнитометр POS-1 непрерывно с дискретностью 5 с измеряет модуль индукции F и регистрирует параметр качества сигнала QMC, отражающий величину отношения «сигнал/шум» и длительность сигнала прецессии. Управление и передача данных в регистрирующий компьютер осуществляется по подземному кабелю длиной около 25 м. Питание 12 В обеспечивается от сетевого преобразователя, установленного в техническом павильоне.

Абсолютные наблюдения выполняются двумя магнитологами два-три раза в неделю. Каждое наблюдение состоит минимум из трех серий измерений склонения и наклона двумя DI-магнитометрами. Обработка результатов абсолютных наблюдений и вычисление базисных значений выполняется непосредственно после окончания измерений.

3. Вариационные измерения

Вариационный павильон размером около 6×6 м из силикатного кирпича с шиферной крышей имеет внутри деревянное термоизолирующее помещение с постаментами, на которых в настоящее время установлены две вариационные станции.

Серия DHZF кварцевых вариометров Боброва аналоговой станции с лентопротяжным электроприводным регистратором установлены на отдельных постаментах и работают в обычном режиме световой записи на фотобумажной ленте.

Цифровая феррозондовая станция LEMI-008 имеет XYZ-ориентацию магнитных осей блока датчиков, установленного на отдельном постаменте в трех метрах от кварцевых вариометров. Частота измерений цифровой

станции 1 Гц с привязкой шкалы времени по сигналам встроенного GPS-приемника, антенна которого вынесена на крышу павильона. Передача цифровых данных в текстовом формате осуществляется через штатный порт RS232 по подземному кабелю длиной около 30 м. Бесперебойное питание обеспечивается сетевым преобразователем 220/12 В и резервным аккумулятором, которые размещены в техническом павильоне.

Данные LEMI-008 регистрируются на персональном компьютере с операционной системой DOS 6.22, данные POS-1 – на PC с ОС Windows 98. Регистрирующие компьютеры объединены в локальную сеть, которая, в свою очередь, подключена к локальной сети обсерватории по витой паре длиной около 400 м. Автономная работа станций в течение 1 часа обеспечивается источниками бесперебойного питания. В случае аварийной перезагрузки компьютеров выполняется автоматический запуск программ регистрации. Все устройства в техническом павильоне заземлены в общей точке на шине заземления.

Данные GPS канала времени вариационной станции LEMI-008 используются для ежечасной автоматической коррекции внутреннего таймера PC LEMI, а также для ручной коррекции таймера PC POS, который тем самым обеспечивает синхронизацию таймера протонного магнитометра POS-1 с погрешностью около 1 с.

Программы сбора и управления обоими магнитометрами функционально подобны и разработаны на языке C как DOS-приложения. Результаты измерений записываются в текстовом формате в часовые файлы с именами типа Sdd_hhmm.mon, где S – код магнитометра ("L" – LEMI-008, "F" – POS-1), dd, hh, mm – день, час и минута UT начала записи, расширение файла mon – месяц создания файла. Сохранение секундных данных часовыми фрагментами позволяет уменьшить потери информации при аварийных ситуациях и обеспечивает достаточно оперативный доступ к текущим данным регистрации вариаций ГМП. Часовые файлы LEMI-008 и POS-1 в архивированном виде записываются на дискеты и дублируются на локальных и сетевых жестких дисках.

4. Обработка результатов измерений

Основной принцип, заложенный в программное обеспечение оперативной обработки результатов измерений, заключается в максимальном программном и визуальном контроле данных на каждом этапе обработки с выявлением ошибок и ведением детального протокола выполненных операций. Все программное обеспечение подготовлено средствами математического пакета MatLab.

Процесс оперативной обработки данных вариаций поля и абсолютных наблюдений состоит из нескольких этапов, представленных в виде блок-схемы на рис. 2.

• После копирования оператором исходных часовых файлов секундных данных вариационной станции LEMI-008 и пятисекундных данных протонного магнитометра POS-1 с сетевого диска или с дискет регистрирующих компьютеров на рабочий компьютер осуществляется предварительная оценка полученных данных. Программно выполняется контроль структуры записи в часовых файлах, отслеживаются сбои таймера, фиксируются коды ошибок, отмечаются пропуски, отказы аппаратуры, перезапуски компьютеров.

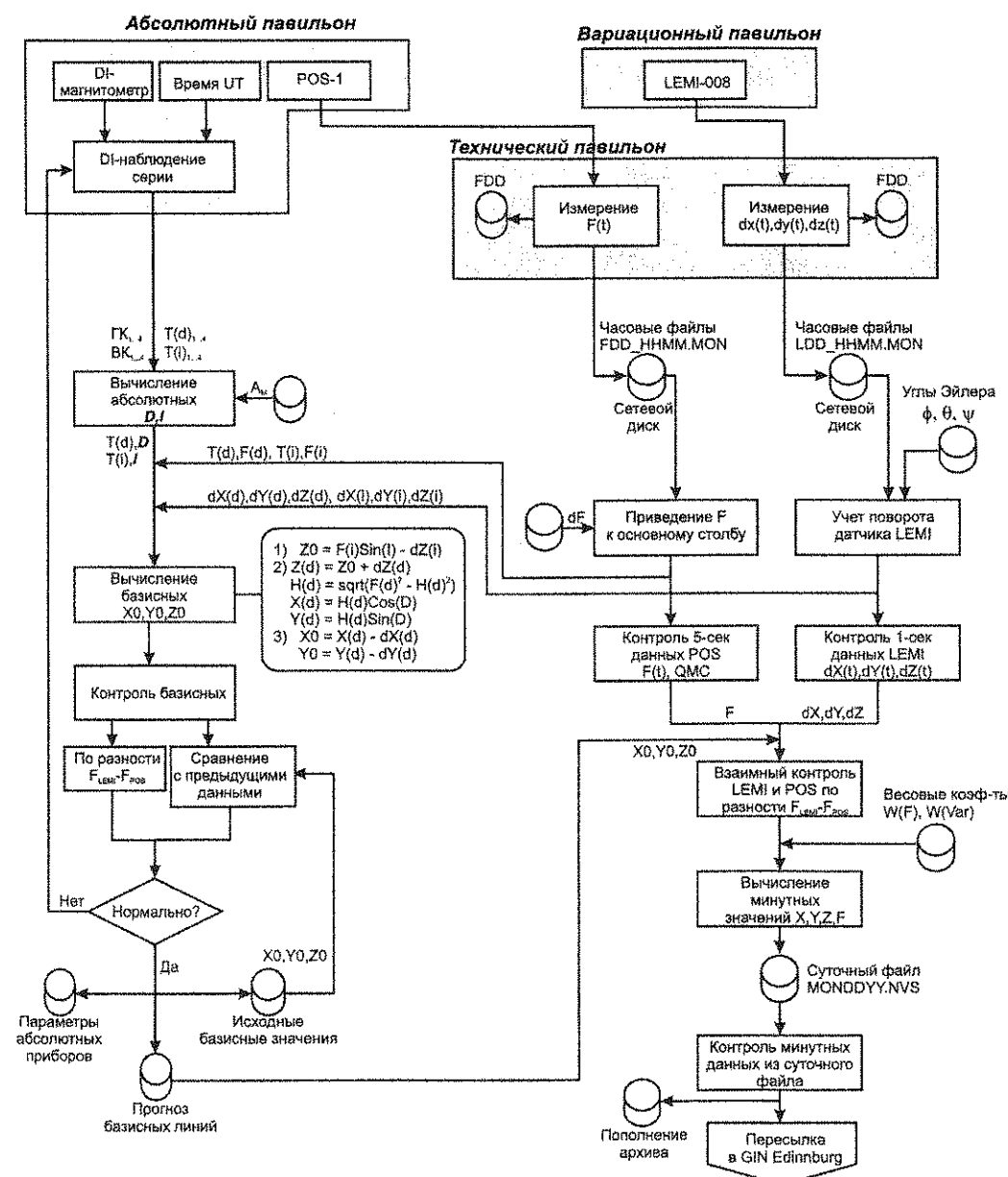


Рис. 2. Функциональная схема оперативной обработки геомагнитных наблюдений.

• В данные POS-1 вводится поправка $dF_{ст}$ приведения к основному столбу абсолютного павильона, а данные dX, dY, dZ трехкомпонентной станции LEMI-008 корректируются с помощью углов Эйлера (ϕ, θ, ψ) для исправления погрешностей из-за неточной ориентации магнитных осей датчиков относительно вертикали и направления географического меридиана.

• Часовые файлы собираются в суточные ZIP-архивы и помещаются в каталоги, имеющие жесткую структуру подкаталогов, – магнитометр/год/месяц (например, LEMI/2006/2006_09/LEMI0903.zip). Во всех дальнейших процедурах обработки выполняется автоматическое обращение к этим архивам. Суточные ряды значений LEMI-008 и POS-1 визуализируются для оценки условий регистрации вариаций ГМП (рис. 3) и уровня помех (рис. 4).

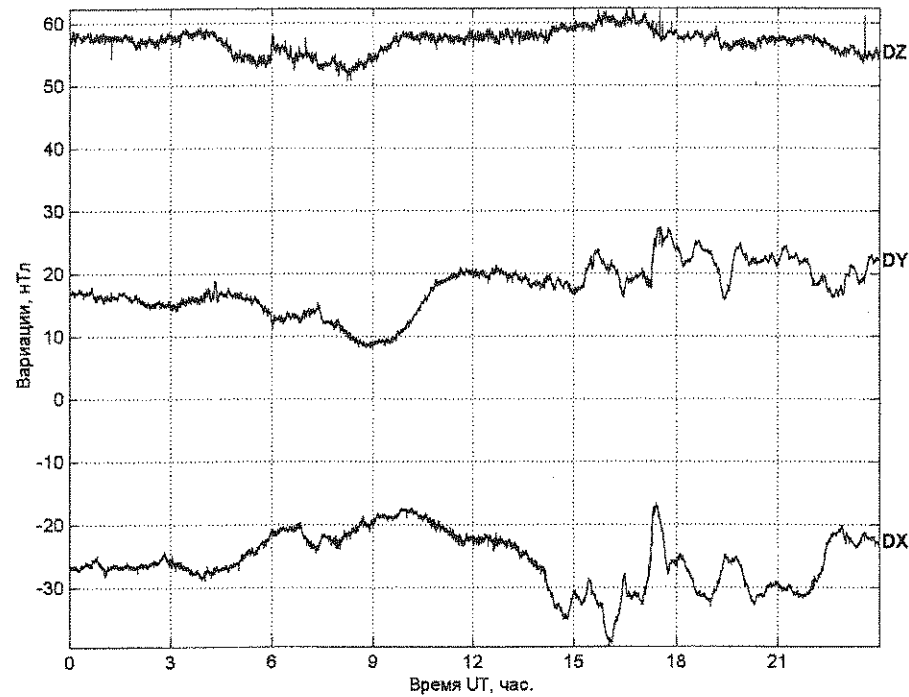


Рис. 3. Графическое представление суточных вариаций XYZ цифровой станции LEMI-008.

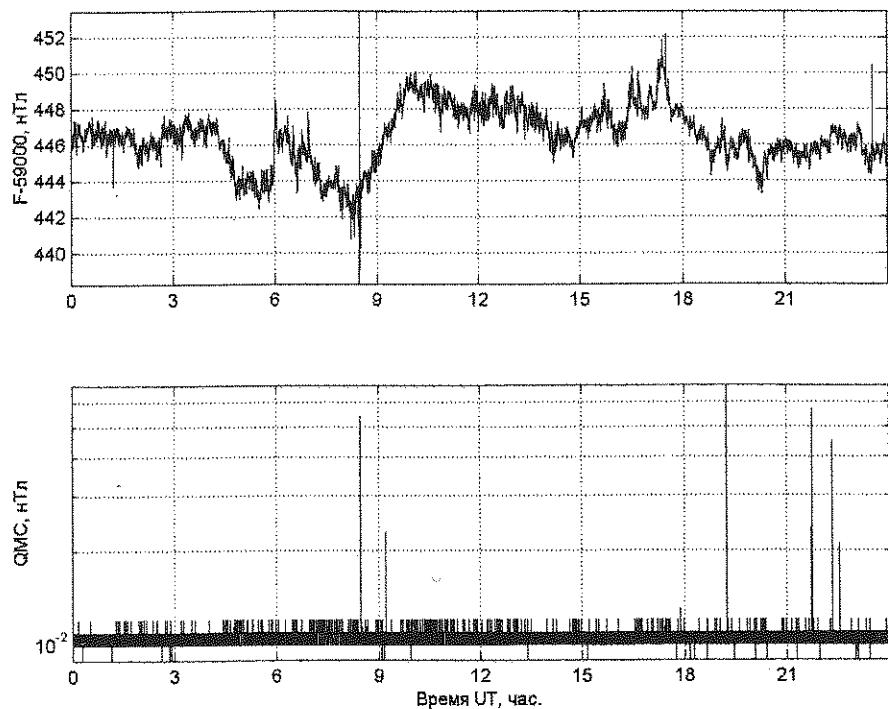


Рис. 4. Графическое представление суточной вариации F магнитометра POS-1 и параметра QMS качества сигнала прецессии.

• Вычисляются значения компонент с учетом принятых базисных значений X_0, Y_0, Z_0 : $X=X_0+dX, Y=Y_0+dY, Z=Z_0+dZ$. Затем вычисляются значения полного вектора F_{LEMI} и разности $dF=F_{LEMI}-F_{POS}$, которые являются хорошим индикатором уровня помех, несинхронности таймеров станции LEMI-008 и магнитометра POS-1, правильности принятия базисных значений и стабильности вариометров. Все эти факторы можно обнаружить на графике суточной разности (рис. 5).

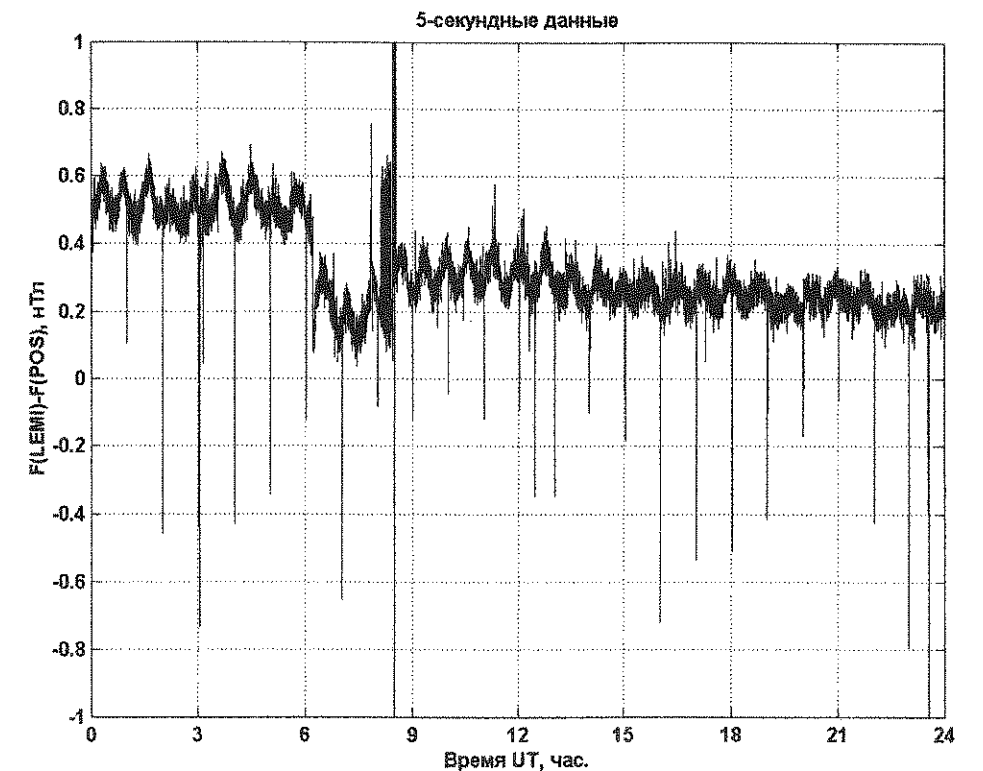


Рис. 5. График суточной разности пятисекундных данных F_{POS} и расчетных значений F_{LEMI} .

Для сравнения данных LEMI-008 с записями D, H, F на магнитограммах аналоговой серии вариометров вычисляются значения склонения D и горизонтальной составляющей H . После просмотра исходных данных оператор может внести исправления сбойных значений в файлах с обязательной записью своих действий в журнал обработки.

• На заключительном этапе оперативной обработки ежесуточных данных вычисляются среднееминутные значения X, Y, Z с применением коэффициентов цифрового фильтра в соответствии со стандартом INTERMAGNET и выбираются мгновенные значения F_{POS} для нулевой секунды каждой минуты с формированием часовых блоков данных по формату IMFV1.22. Здесь также на экране монитора визуализируются все часовые данные (исходные и минутные) и разности $dF=F_{LEMI}-F_{POS}$. Часовые блоки среднееминутных значений "сшиваются" в стандартный суточный файл минутных данных. Полученный файл проверяется оператором и электронной почтой посылается на сервер обсерватории, где выполняется дублирующий контроль корректности структуры файла и отправка его в

GIN (Эдинбург). Одновременно производится вычисление К-индексов для оценки уровня геомагнитных возмущений, пополнение базы данных на сервере и обновление графиков вариаций поля за прошедшие сутки (<http://www.gs.nsc.ru/russian/ionka>). Оперативная обработка данных завершается проверкой поступления суточного файла в GIN.

Описанные процедуры отработаны и надежно работают в стандартном режиме оперативной подготовки данных. Однако в нестандартных ситуациях, когда данные теряются или удаляются из-за наличия большого уровня помех, выполняются дополнительные операции, например, заполнение пропусков оцифрованными данными аналоговой серии кварцевых вариометров Боброва.

- При обработке абсолютных наблюдений результаты DI-измерений из журнала наблюдений вводятся оператором в текстовый файл, содержащий код инструмента, код наблюдателя, отсчеты наведения на мир, время отсчетов при измерении склонения и наклонения, соответствующие отсчеты горизонтального круга (ГК) и вертикального круга (ВК). Вычисляются абсолютные значения склонения D и наклонения I , контрольные параметры DI-магнитометра, проводится графический и текстовый контроль исходных данных на наличие ошибочных измерений и невязок наведений на мир.

- Вычисляются базисные значения X_0 , Y_0 , Z_0 по абсолютным измерениям D и I и данным вариаций модуля F и компонент dX , dY , dZ , программно извлекаемых из файлов 5-секундных данных POS-1 и секундных данных LEMI-008. Состояние магнитной обстановки в абсолютном павильоне во время наблюдений оценивается по разностям $dF = F_{LEMI} - F_{POS}$, а правильности ввода времени в файлы исходных данных – по отметкам выбираемых значений вариационной станции и протонного магнитометра.

- Производится дозапись полученных результатов в текстовые файлы абсолютных наблюдений. Компонентные базисные значения вариационной станции и контрольные параметры DI-магнитометров за длительный период наблюдений представляются в графическом виде. Аппроксимацией средних базисных значений за последние 90 суток выдается прогноз базисных уровней X_0 , Y_0 , Z_0 , используемых в дальнейшем при оперативной обработке вариационных данных.

Все исходные данные, файлы с результатами обработки, файлы параметров, электронные журналы и программное обеспечение ежегодно записываются на CD-ROM

5. Дополнительные измерения

Важной задачей обсерваторской работы является контроль магнитной обстановки на территории около павильонов и внутри этих зданий. Наличие цифрового протонного магнитометра POS-1 сделало достаточной простой процедуру измерения пространственного распределения геомагнитного поля F . В качестве примера на рис. 6 представлено распределение F в абсолютном павильоне при съемке на высоте 0,5 и 1 м от уровня пола. Для наглядности на рисунке поверхности измеренных значений градиентов поля смещены по оси dF . По горизонтальным осям отложено расстояние в метрах. Стрелками показаны места расположения приборных постаментов в павильоне. Как видно из рисунка, в пределах помещения на высоте 1 м поле изменяется от 2 до 6 нТл. Заметная аномалия в углу комнаты связана с местом ввода в нее силовых кабелей.

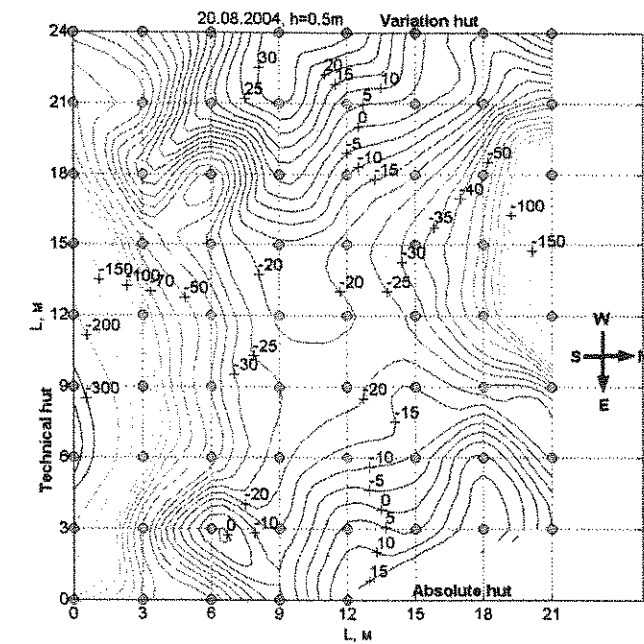


Рис. 6. Распределение градиентов геомагнитного поля в абсолютном павильоне на высотах 0.5 и 1 м от уровня пола.

Еще одним примером может служить пространственное распределение F на территории между магнитными павильонами, показанное на рис. 7 в виде изолиний. Точками отмечены места измерения F по площади на высоте 0,5 м от земли, по осям – расстояние в метрах. Большие градиенты поля наблюдаются вблизи технического павильона и на северной стороне рассматриваемого участка, где расположен кабельный колодец. На основе результатов магнитной микросъемки было выбрано место с наиболее спокойным полем для строительства внешнего постаментов контрольных абсолютных измерений.

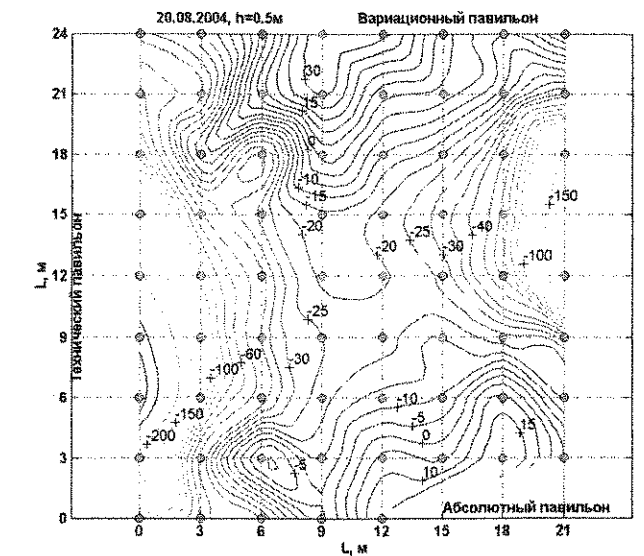


Рис. 7. Карта местной градиентной магнитной съемки с шагом 3 м в районе павильонов.

6. Заключение

Несмотря на более чем 35-летнюю историю Геофизической обсерватории "Ключи", остаются нерешенными ряд существенных проблем.

После внедрения цифровых методов магнитных измерений и проведения специальных исследований было обнаружено, что на обсерватории имеется достаточно большой уровень техногенного шума амплитудой до 1–2 нТл с наложением импульсных помех амплитудой до 4–5 нТл. Эти помехи регистрируются всеми магнитометрами, т.к. в условии точной временной синхронизации амплитуда разности $dF = F_{\text{LEMI}} - F_{\text{POS}}$ не превышает 0,1–0,2 нТл. Возможным источником магнитного шума являются распределенные земные токи от электрифицированной железной дороги, которая проходит на расстоянии около 12 км к западу от обсерватории.

Магнитная микросъемка территории в районе павильонов выявила не очень удовлетворительную картину для стационарных геомагнитных наблюдений. Необходимо более детальные измерения для локализации источников аномалий.

В настоящее время ставится задача по оснащению обсерватории дублирующим цифровым вариометром. Пока не решен вопрос по обеспечению всех измерительных систем точным единым временем и независимым бесперебойным питанием.

Перечисленные проблемы, за исключением первой, вполне решаемы, и сотрудники магнитной обсерватории прилагают усилия для повышения точности производимых наблюдений и уменьшения потерь данных при регистрации вариаций ГМП.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	3
2. Описание геомагнитного поля	7
2.1. Элементы геомагнитного поля	7
2.2. Главное поле Земли	9
2.3. Вековые вариации	11
2.4. Переменное магнитное поле Земли	13
2.5. Магнитные возмущения	16
2.6. Прикладные аспекты геомагнитных возмущений	20
3. Территория и здания магнитной обсерватории	22
3.1. Выбор места для магнитной обсерватории	22
3.2. Территория магнитной обсерватории	23
3.3. Устройство фундаментов и приборных постаментов	25
3.4. Немагнитные здания	27
3.5. Электрообеспечение павильонов	31
3.6. Астрономическая мира	31
3.7. Определение азимута мира	32
4. Абсолютные измерения геомагнитного поля	35
4.1. Протонный прецессионный магнитометр	35
4.1.1. Принцип действия протонного магнитометра	35
4.1.2. Методика измерений модуля F геомагнитного поля	38
4.2. Компонентные измерения протонным магнитометром	39
4.2.1. Колечная установка	39
4.2.2. Погрешности компонентных измерений методом компенсации	41
4.2.3. Подготовка колечной установки к наблюдениям	44
4.2.4. Методика проведения наблюдений методом компенсации	45
4.2.5. Погрешности измерений методом дополнительного поля	46
4.2.6. Методика проведения наблюдений методом дополнительного поля	48
4.3. Феррозондовый деклинометр/инклинометр	49
4.3.1. Принцип действия феррозонда	50
4.3.2. Диаграмма направленности феррозонда	52
4.3.3. Блок электроники феррозондового магнитометра	53
4.3.4. Феррозондовый магнитометр LEMI-203	55
4.3.5. Измерения склонения феррозондовым деклинометром	56
4.3.6. Методика проведения наблюдений склонения	59
4.3.7. Измерения наклона феррозондовым инклинометром	61
4.3.8. Методика проведения наблюдений наклона	63
4.4. Кварцевый магнитометр QHM	65
4.4.1. Измерения склонения D и горизонтальной компоненты H	66
4.4.2. Методика проведения наблюдений D и H	67
4.5. Рекомендации по абсолютным наблюдениям	69
4.5.1. Прямые и косвенные измерения	69
4.5.2. Рекомендации наблюдателю	71
5. Регистрация вариаций геомагнитного поля	74
5.1. Кварцевые вариометры Боброва	74
5.1.1. Аналоговая магнитовариационная станция с фотозаписью	78
5.1.2. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем	83
5.1.3. Цифровая вариационная станция Кварц-ЗЕМ	87
5.2. Феррозондовая магнитовариационная станция	90
5.3. Вариационная станция с протонным магнитометром	94
5.4. Дополнительное оборудование вариационных станций	95

6. Обработка и контроль наблюдений геомагнитного поля	98
6.1. Результаты абсолютных наблюдений	98
6.2. Обработка магнитограмм	106
6.3. Первичная обработка цифровых данных вариометров	108
6.4. Стандартная подготовка цифровых минутных данных	110
6.5. Подготовка дополнительных материалов по вариациям ГМП	113
6.6. Архивные материалы	118
7. Основные требования к обсерваториям сети ИНТЕРМАГNET	120
Литература	122
Приложение 1. Техническое задание на разработку программного первичной обработки обеспечения цифровых данных магнитной обсерватории	123
Приложение 2. Геомагнитные наблюдения в Новосибирске (Геофизическая обсерватория "Ключи")	130

Тематический план выпуска изданий СО РАН на 2006 г., № 81

Научное издание

Нечаев Станислав Алексеевич

**РУКОВОДСТВО
ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Технический редактор *А.И. Шеховцов*
Компьютерная верстка, дизайн *И.М. Батова*

Подписано в печать 10.07.2006 г. Формат 60x90/8
Гарнитура Arial. Бумага Ballet. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 11,5. Усл. печ. л. 16,2. Тираж 250 экз.
Заказ 350.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1