

ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ СО РАН

РУКОВОДСТВО

для стационарных геомагнитных наблюдений

С. А. Нечаев

Редактор Жан Л. Рассон

Работа выполнена в рамках программы INTAS IA 01-01

ИРКУТСК 2003 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	4
2. Описание геомагнитного поля	
2.1. Элементы геомагнитного поля.....	7
2.2. Главное поле Земли.....	8
2.3. Вековые вариации.....	10
2.4. Переменное магнитное поле Земли.....	11
2.5. Магнитные возмущения.....	14
2.6. Прикладные аспекты геомагнитных возмущений.....	17
3. Территория и здания магнитной обсерватории	
3.1. Выбор места для магнитной обсерватории.....	18
3.2. Территория магнитной обсерватории.....	19
3.3. Устройство фундаментов и приборных постаментов.....	20
3.4. Немагнитные здания.....	21
3.5. Электрообеспечение павильонов.....	23
3.6. Астрономическая мира.....	23
3.7. Определение азимута мира.....	24
4. Абсолютные измерения геомагнитного поля	
4.1. Протонный прецессионный магнитометр.....	26
4.1.1. Принцип действия протонного магнитометра.....	26
4.1.2. Методика измерений модуля F геомагнитного поля.....	28
4.2. Векторные измерения протонным магнитометром.....	29
4.2.1. Колечная установка.....	29
4.2.2. Погрешности компонентных измерений методом компенсации.....	30
4.2.3. Подготовка колечной установки к наблюдениям.....	32
4.2.4. Методика проведения наблюдений методом компенсации.....	33
4.2.5. Погрешности измерений методом дополнительного поля.....	34
4.2.6. Методика проведения наблюдений методом дополнительного поля.....	35
4.3. Феррозондовый деклинометр/инклинометр.....	36
4.3.1. Принцип действия феррозонда.....	37
4.3.2. Диаграмма направленности феррозонда.....	38
4.3.3. Блок электроники феррозондового магнитометра.....	39
4.3.4. Феррозондовый магнитометр LEMI-203.....	40
4.3.5. Измерения склонения феррозондовым деклинометром.....	41
4.3.6. Методика проведения наблюдений склонения.....	42
4.3.7. Измерения наклонения феррозондовым инклинометром.....	44
4.3.8. Методика проведения наблюдений наклонения.....	45
4.4. Кварцевый магнитометр QHM.....	47
4.4.1. Измерения склонения и горизонтальной компоненты.....	48
4.4.2. Методика проведения наблюдений D и H.....	49
4.5. Рекомендации по абсолютным наблюдениям.....	50
4.5.1. Прямые и косвенные измерения.....	50
4.5.2. Рекомендации наблюдателю.....	52
5. Регистрация вариаций геомагнитного поля	
5.1. Кварцевые вариометры Боброва.....	54
5.1.1. Магнитовариационная станция с фотозаписью.....	57
5.1.2. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем НВС.....	61

5.1.3. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем Кварц-ЗЕМ.....	64
5.2. Феррозондовая магнитовариационная станция.....	65
5.3. Магнитовариационная станция с протонным магнитометром.....	67
5.4. Дополнительное оборудование вариационных станций.....	68
6. Обработка и контроль наблюдений геомагнитного поля	
6.1. Результаты абсолютных наблюдений.....	70
6.2. Обработка магнитограмм.....	76
6.3. Первичная обработка цифровых данных вариометров.....	77
6.4. Стандартная подготовка цифровых минутных данных.....	78
6.5. Подготовка дополнительных материалов по вариациям поля.....	81
6.6. Архивные материалы.....	86
7. Основные требования к обсерваториям сети ИНТЕРМАГНЕТ.....	88
8. Литература.....	90
9. Приложение1 Блок-схема ПО ЦМВС.....	91

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 изготовлению чувствительных магнитометров и проведению многочисленных тщательных измерений. 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 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 (изогонами) или наклонения (изоклинами). Изолинии остальных компонент геомагнитного поля имеют общее название – изодинамы. Сеть постоянных точек наблюдений на земной поверхности чрезвычайно редка. Поэтому 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 съемки проводятся на ограниченной территории при поисках полезных ископаемых методом обследования местных магнитных аномалий. Палеомагнитные измерения преследуют цель воссоздания истории изменений планеты, произошедших тысячи и миллионы лет назад. Кроме того, при выполнении комплексных научных программ проводятся специальные измерения геомагнитного поля на сети временных пунктов.

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 Гумбольту. 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 Гумбольтом и Гауссом, стал первым крупным международным проектом в истории геомагнетизма. С 1836 по 1841 г. 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 данных. Основным исходным материалом обсерваторий более 100 лет были магнитограммы, - фотозаписи вариаций элементов геомагнитного поля. В последние десятилетия большинство обсерваторий перешло на цифровую систему получения и обработки данных, при которой основной продукцией являются ежесуточные файлы минутных значений вариаций геомагнитного поля с привязкой 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 геомагнитного поля в пределах 5-10 нТл (0.015%), то сейчас в связи с развитием спутниковых измерений перед магнитными обсерваториями ставится задача обеспечения погрешности наблюдений 0.2-0.5 нТл (не хуже 0.001%). Следовательно, максимально возможная точность измерений геомагнитного поля является главной целью каждой магнитной обсерватории. Для ведущих обсерваторий разных стран с опытными наблюдателями и научными сотрудниками усилия в достижении этой цели всегда являлись традиционными.

Второй важной задачей обсерваторий является обеспечение непрерывности регистрации вариаций геомагнитного поля. Пропуски в данных являются безвозвратными и могут привести к потере особо важной информации при неожиданных геофизических явлениях или техногенных катастрофах, связанных, например, с нарушением радиосвязи. Обсерватории являются источником оперативной информации о состоянии геомагнитного поля, 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 создавать теорию внутреннего строения планеты. При этом магнитные обсерватории являются хранителем уровней элементов геомагнитного поля, по которым производится сравнение рабочих магнитометров и буссолей.

Для координации деятельности мировой сети обсерваторий существует Международная ассоциация геомагнетизма и аэронавтики 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 акад. 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. Доцент Казанского университета И.Н. Смирнов осуществил в 1871-78 г.г. планомерную магнитную съемку европейской части России и обнаружил знаменитую Курскую аномалию. В том же 1878 г. под руководством акад. Г.И. Вильда была создана первоклассная обсерватория в Павловске, а через несколько лет были построены обсерватории в Тбилиси, Екатеринбурге, Иркутске.

Мнение Государственного Совета от 27 ноября 1884 г. об учреждении магнитно-метеорологических обсерваторий в Екатеринбурге и в 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, который после окончания Дерптского университета приобрел опыт по созданию метеостанций в Шлиссельбурге, Новой Ладоге и при Валаамском монастыре. Летом 1886 г. на окраине Иркутска были построены главные здания обсерватории и с января 1887 г. начаты регулярные «ежечасные наблюдения склонения, горизонтальной и вертикальной составляющих, наклонения и полной силы земного магнетизма».

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 его же инициативе в 1932 г. был создан Институт земного магнетизма, который с 1940 г. стал в стране головным учреждением (ИЗМИР АН СССР) по организации и обеспечению магнитных измерений. При подготовке нашей страны к участию в программе «Второй полярный год» (1932-1933 г.г.) были построены обсерватории в ряде северных пунктов от Земли Франца Иосифа до Берингова пролива.

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. Московский завод «Геофизприбор» взял заказ по выпуску кварцевых магнитометров QHM и протонных магнитометров ПМ-1, а мастерские ИЗМИРАН осуществили выпуск кварцевых вариометров конструкции Боброва для оснащения всех обсерваторий однотипными инструментами. С целью проведения магнитных съемок в океанах была построена уникальная немагнитная шхуна «Заря». Впервые были разработаны 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.

В этот период в ИЗМИРАНе была поставлена задача по созданию «Руководства по ведению работы в магнитных обсерваториях». В полном объеме она не была выполнена, но были разработаны и разосланы по сети советских магнитных обсерваторий 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, изменились принципы получения и обработки данных. Настоящее «Руководство» предназначено для наблюдателей обсерваторий, которые переходят на цифровые системы сбора и обработки информации и применяют современные магнитометры. Особое внимание уделено методам обеспечения максимальной точности измерений геомагнитного поля и способам контроля данных. Дополнительная информация о принципах работы магнитометров позволит сотрудникам обсерваторий самим искать пути повышения качества наблюдений и может оказать некоторую помощь в ремонте и настройке инструментов.

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

В данном «Руководстве» не рассматривается специальное оборудование, предназначенное для метрологических испытаний и настройки магнитометров, которыми располагают некоторые обсерватории. К такому оборудованию можно отнести экранирующие камеры и компенсационные колечные системы нулевого магнитного поля, большие метрологические колечные установки, немагнитные термокамеры, градиентометры и т.д. Специализированные средства поверки магнитометров дают определенную гарантию обеспечения повышенной точности наблюдений и регистрации вариаций геомагнитного поля с одновременным расширением технических возможностей обсерватории, 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 постоянно действующую наблюдательную точку с минимальным комплектом инструментов. Такие обсерватории не занимаются обработкой материалов, передавая всю первичную информацию по каналам связи в свои головные учреждения. Как правило, при этом резко снижается квалификация наблюдателей, вследствие чего падает 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 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.

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 веков раньше. В Европе первое достоверное сообщение о магнитном компасе, который вошел в практику мореплавания, появилось в сочинении английского монаха Александра Некхэма 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 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 в определении склонения и нанесении его значений на географические карты. В 1581 г. английский гидрограф Роберт Норман опубликовал результаты своих наблюдений наклонения, - угла отклонения магнита от горизонтальной плоскости. До конца XVII века все наблюдения земного магнетизма ограничивались измерениями углов магнитной оси стрелки, - склонения и наклонения. 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 компоненты H геомагнитного поля. В 1838 г. профессор астрономии Гаусс опубликовал большую книгу, посвященную общей теории геомагнетизма. Он произвел сферический гармонический анализ магнитного поля Земли. Гаусс дал теоретические основания для измерения горизонтальной компоненты в абсолютных единицах и разработал методику наблюдений H , 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 наклонением 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.

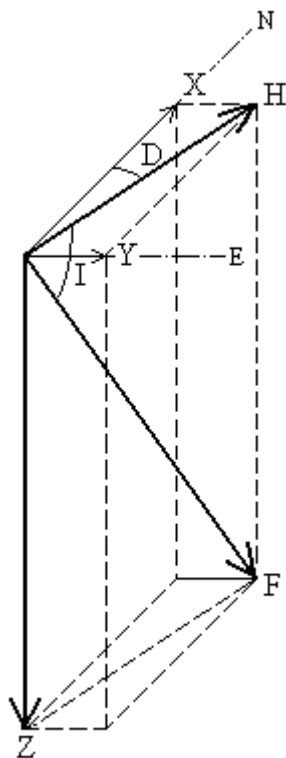


Рис. 2.1

Например, в Иркутске в 1887 г. склонение было восточным $+2^{\circ} 24'$. В результате вековой вариации оно в 1934 г. прошло через нулевое положение. Некоторое время магнитный меридиан совпадал с географическим и компас в Иркутске показывал точно на истинный север. Постепенно склонение продолжало изменяться в западном направлении и в 2001 г. оно достигло значения $-2^{\circ} 24'$.

Элементы D и I обычно измеряются в угловых градусах, минутах и десятых долях минуты. Вариации склонения можно измерять в нанотеслах, если рассматривать ΔD как векторную

компоненту, которая воздействует по нормали на вектор горизонтальной компоненты H . Обычно окончательная информация о вариациях склонения дается в угловых минутах или в сотых долях минут. Остальные элементы и полный вектор F выражаются в наноТеслах или в десятых долях нТл.

Справка:

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 : $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \approx 1257 \gamma$.

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

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

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 для каждой точки 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: $\theta_m = 90^\circ - \varphi_m$.

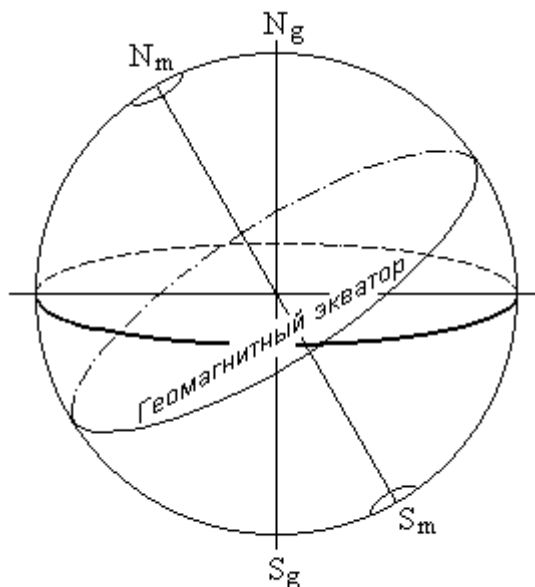


Рис 2.2

За нулевой магнитный меридиан (в отличие от географического гринвичского меридиана) принят большой круг, проходящий через геомагнитные полюса и южный географический полюс. По формулам сферической геометрии можно в первом приближении вычислить геомагнитные координаты любой точки планеты на 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 наклона ($I = \pm 90^\circ$), в точности не совпадают с расчетными координатами геомагнитных полюсов. Геомагнитный экватор лишь приближенно 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 Восточно-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 поверхности ядра Земли, то для создания на земной поверхности реального поля необходимо иметь 14 радиальных диполей. Стандартное приближение главного магнитного поля называется Международным эталонным геомагнитным полем МЭГП (IGRF), которое уточняется каждые пять лет.

На главное поле накладываются локальные поля, которые в некоторых районах земной поверхности могут достигать значений, соизмеримых с главным полем. Если на суше магнитные аномалии имеют сложную форму, то 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. На расстоянии шести земных радиусов (38220 км) главное

поле составляет около 200 нТл. Зато на таких расстояниях 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, 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 $+2^\circ$ до -2° с переменной скоростью от 0 до 10 угл. 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 периодом 50 лет.

Было проведено много исследований, посвященных периодичности вековых вариаций, но длина ряда регулярных наблюдений в 150-300 лет недостаточна для получения надежных выводов. Выявляются колебания геомагнитного поля с периодом 58 лет, а по археомагнитным данным можно указать на 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 вызван тем обстоятельством, что внутри земного шара имеется концентрическая сфера, которая 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 вероятно имеется внутреннее твердое ядро. Температура жидкого ядра составляет 3000 - 4000°C при огромном внутреннем давлении $3.5 \cdot 10^{12}$ дин/см². В жидком ядре вследствие температурных градиентов возникает вихревое движение металлических масс, которые при наличии слабого первичного магнитного поля создает эффект динамо-машины. Впервые гипотезу гидромагнитного динамо для генерации магнитного поля на Солнце высказал Д. Лармор в 1919 г. Сведения о жидком состоянии вещества в ядре Земли привели разных исследователей к различным вариантам применения динамоэффекта в решении проблемы возникновения геомагнитного поля. Модель земного динамо Э. Булларда основана на предположении более медленного

вращения вокруг общей оси жидкой части ядра 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. Математическое обоснование этой модели, основанной на динамоэффекте, заключается в применении уравнений магнитной гидродинамики. Не исключено, что причиной западного дрейфа могут быть свободные гидромагнитные колебания в жидком ядре.

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 два 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 чувствительный компас и точно установил наличие малых суточных вариаций склонения, а также случаи больших хаотических отклонений стрелки (во время 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 показали 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. Переменное поле вызвано геофизическими процессами в верхней атмосфере. 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 на магнитограммах показывают, что в одни дни вариации имеют плавный характер и 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, но их можно выделить статистическими методами. Нерегулярные вариации относят к возмущенному полю. Часто возмущения имеют небольшую амплитуду, которые накладываются на спокойную солнечно-суточную вариацию. Иногда нерегулярные вариации столь велики, что суточную вариацию на их фоне практически не удастся 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 геомагнитным полем происходит существенное изменение картины магнитно-

го поля Земли. 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. 2.3).

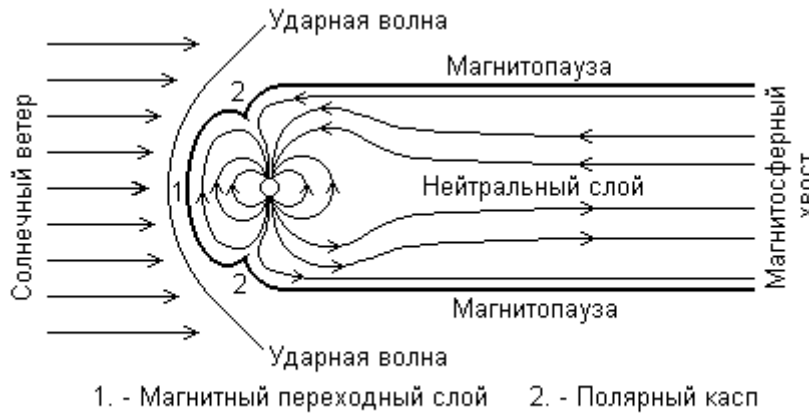


Рис. 2.3

ветра силовые линии геомагнитного поля в районе этой широты могут либо замыкаться на подсолнечной стороне земного шара, либо перебрасываться в хвост магнитосферы. Две области магнитосферы, напоминающие воронки над полярными шапками называются полярным каспом. 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 колышущегося занавеса с преобладанием красного и зеленого света. Кольцевая зона на

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° оказываются в области магнитопаузы. В зависимости от изменяющихся параметров солнечного

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. 2.4) дает представление о спокойной суточной вариации.

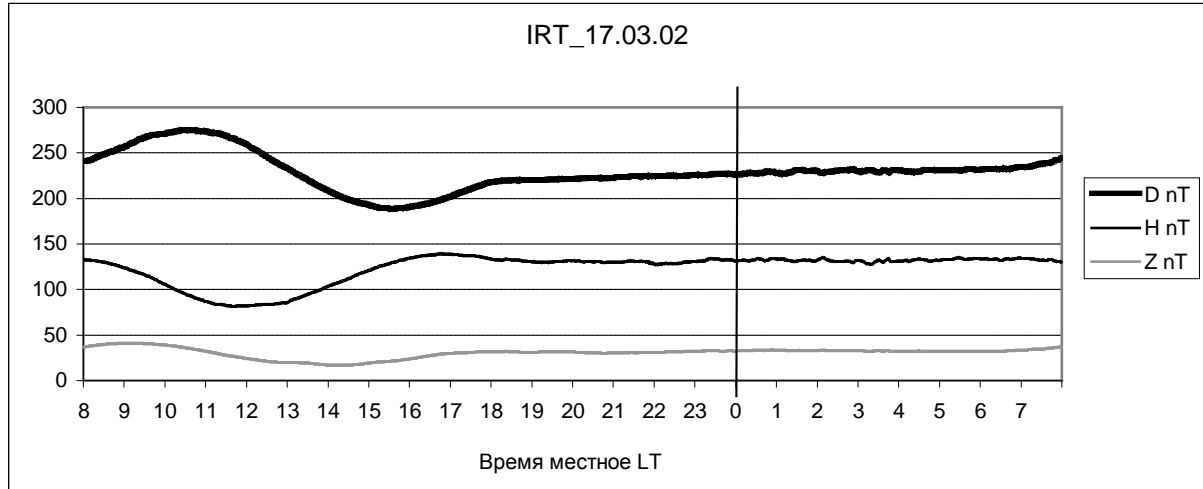


Рис. 2.4. Спокойные суточные вариации 17 марта 2003 г. Иркутская МО.

Основную часть этой вариации составляет спокойная солнечносуточная вариация и малую часть (в единицы нанотесл) – лунносуточная вариация. В зимние месяцы амплитуда спокойных суточных вариаций в средних широтах составляет 10-20 нТл, в летние, - увеличивается до 50-100 нТл. Анализ солнечносуточных S_q -вариаций обычно осуществляется по пяти международным магнитоспокойным дням каждого месяца. 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. Особенностью S_q -вариации является резкое возрастание ее амплитуды вдоль магнитного экватора. Поскольку ионосфера представляет собой проводящий слой, ее ветровые и приливные движения индуцируют электродвижущую силу ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$). 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. 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. 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. Магнитный экватор действует как узкий проводящий канал, по которому на дневной стороне Земли течет ток в восточном направлении. Этот токовый пояс Чепмен назвал экваториальной электроструей. Изучение ионосферы с помощью ракет подтвердило существование этого тока. Обратный ток электроструи распределен на магнитных широтах $\pm 20^\circ$ и там снижает амплитуду S_q -вариации. Высокоширотные суточные вариации имеют более сложную структуру и условия возникновения такого 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 в 20 раз меньшую амплитуду. Лунносуточные вариации также имеют годичный ход. Во время

летнего солнцестояния амплитуды лунносуточных вариаций достигают максимальных значений в северном полушарии. Источником этих вариаций служат приливные ветры на высоте Е-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 магнитосферу 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 ведется с 9 ноября 1853 г.

Регулярно наблюдается полугодовая периодичность уровня возмущенности геомагнитного поля, который 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. Четкого критерия, какие возмущения следует относить к магнитной буре, пока не существует. Ни одна буря не повторяет другую, но некоторые общие черты бурь можно выделить. Классического вида бури бывают в среднем один-два раза в месяц. Намного чаще на 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. 2.5). 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.

Но 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.

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_i - вариации.

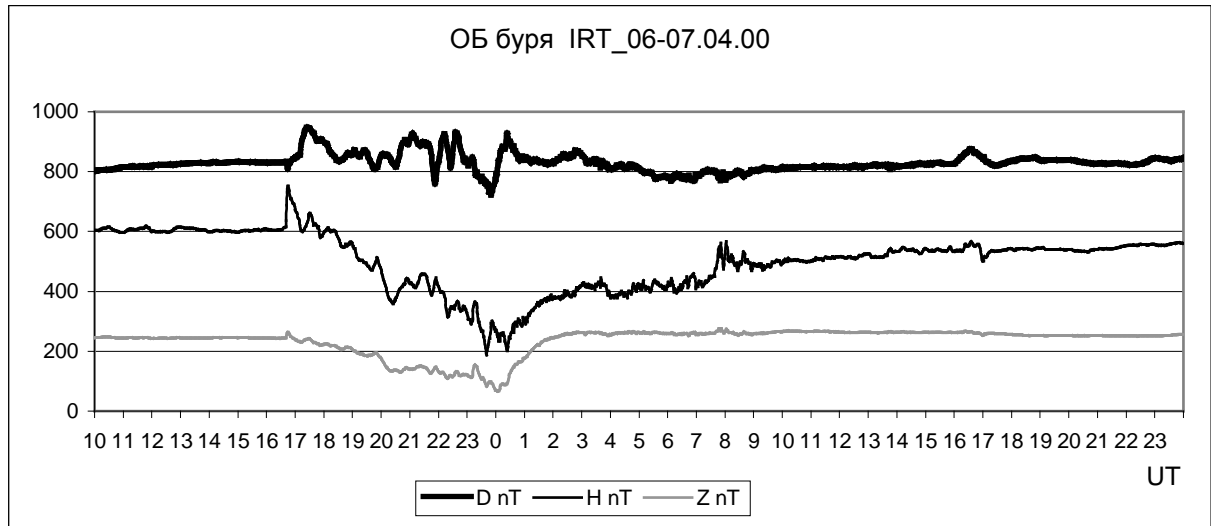


Рис 2.5. Очень большая буря с внезапным началом 6-7 марта 2000 г. Иркутская МО.

Бури по амплитуде принято 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 индекса $K > 5$. 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 во мнениях 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 авроральных зон, что вызывает ионизацию и необычно высокую проводимость вдоль аврорального овала, возбуждение молекул воздуха верхней атмосферы и возникно-

вление 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 вспрыскивается 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 -потокками Бартелеса, которые ответственны за появление геомагнитных возмущений при отсутствии заметных явлений на Солнце.

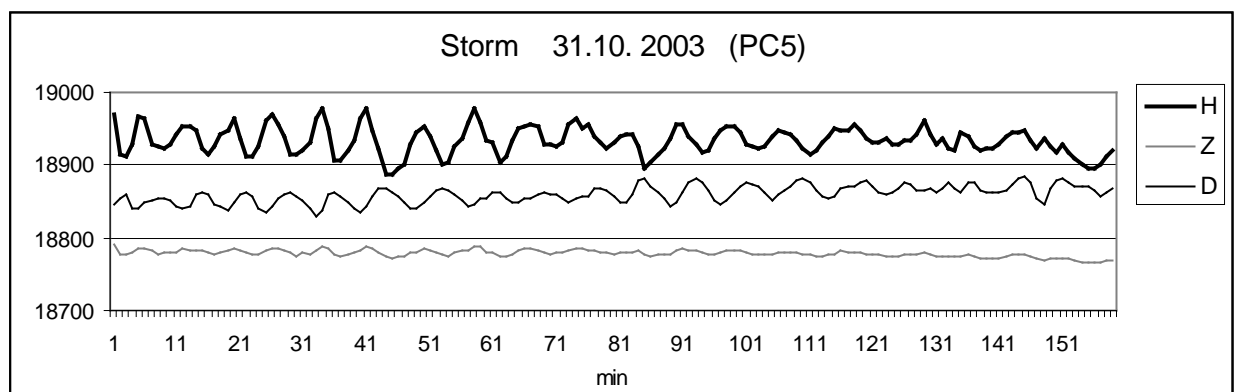


Рис. 2.6. Гигантские пульсации PC-5 в фазе восстановления ОБ бури.

Особо выделяют быстрые почти синусоидальные вариации, которые называются геомагнитными пульсациями. Они хорошо регистрируются высокочастотными и чувстви-

тельными вариометрами. Встречаются пульсации с почти постоянной или плавно изменяющейся амплитудой, которые относят к классу Pc1 – Pc6 в зависимости от периода колебаний (Рис. 2.6). 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 вариации с использованием низкочастотных фильтров, имеющих частоту среза 0.08 Гц и подавляющих большую часть короткопериодных колебаний. Для регистрации пульсаций обычно применяются индукционные датчики с быстродействующими АЦП, которые устанавливаются в тех пунктах, где имеется малый уровень электромагнитных помех.

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 представляло интерес прежде всего для средств навигации и решения проблем нарушения радиосвязи. Сейчас с появлением спутниковых навигационных систем акцент в исследованиях возмущений 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 и используются данные по вариациям геомагнитного поля, которые регистрируются магнитными обсерваториями и стационарными 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 экстратоков в линиях электропередач и трубопроводах, которые приводят к техногенным авариям. Существует воздействие и на биосферу, в том числе на людей, находящихся в экстремальной ситуации, или имеющих отклонения в здоровье. Не исключено, что в будущем в медицине могут появиться методы магнитотерапии. По мере освоения северных территорий и создания разветвленных технологических систем было обнаружено, что часть аварийных ситуаций была определено связана с индукционными эффектами во время геомагнитных бурь не только в линиях электропередач, но и в кабельных сигнальных линиях и в системах контроля газопроводов.

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 observa-

торий, имеющих цифровые вариационные станции, вошла в мировую сеть ИНТЕРМАГ-НЕТ, одной из основных функций которой является сбор и обмен геомагнитной информацией в квазиреальном времени.

3. Территория и здания магнитной обсерватории

Отличительной особенностью измерений геомагнитного поля от большинства технических измерений заключается в том, 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, электрифицированными железными дорогами 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 и нарушения в правилах строительства павильонов обсерватории могут существенно исказить результаты измерений самых 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 и трамвайные дороги, которые должны быть на расстоянии не менее 10 км от обсерватории. Несмотря на необходимость строительства магнитной обсерватории вдали от цивилизации, следует учитывать необходимость обеспечения современной обсерватории электроэнергией и системой связи. Также должны быть учтены жилищно-бытовые условия сотрудников обсерватории.

Отвод земли под территорию магнитной обсерватории, утверждение охранный 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 необходимо 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 в центре предполагаемой строительной площадки. На территории обсерватории производят детальную магнитную съемку через каждые 10 м. Градиенты магнитного поля не должны превышать 5 нТл/м, а непосредственно на площадке строительства абсолютного и вариационного павильонов — не более 2 нТл/м. Дополнительно рекомендуется проверить влияние индуктивной намагниченности коренных пород на амплитуду ва-

риаций геомагнитного поля. Для этого в радиусе 10–20 км устанавливают на временную регистрацию вариаций полевые вариационные станции. Разность в амплитудах вариаций не должна превышать единиц нТл.

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, гостиницы и строений хозяйственно-бытового назначения. В этой части территории при строительстве зданий можно применять в ограниченном количестве магнитные материалы, размещать электрическую подстанцию, строить подъездную дорогу и трубопроводную систему. В главном техническом здании обычно предусматриваются следующие помещения: аппаратная и лаборантская комнаты, фотокомната, архив, мастерская, кабинеты. Еще недавно обязательное во всех магнитных обсерваториях помещение для фотообработки магнитограмм будет окончательно упразднено в связи с переходом на цифровые методы сбора и обработки данных.

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 постами 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 или автобус на расстоянии 80 м дают магнитную помеху около 1 нТл.

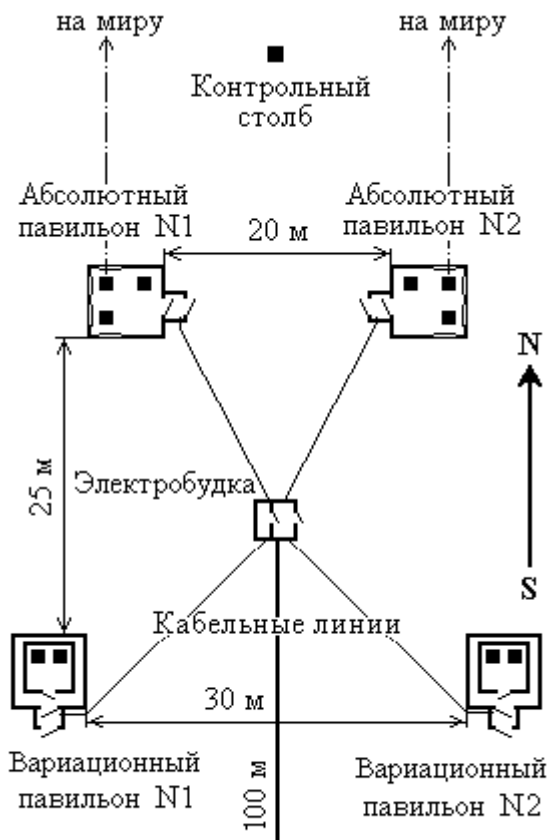


Рис. 3.1

При строительстве магнитной обсерватории можно ограничиться минимальным числом павильонов, - одним для абсолютных наблюдений и одним для регистрации вариаций геомагнитного поля. 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 павильонах, а также появляется возможность быстрого обнаружения изменения магнитной обстановки на территории обсерватории.

Современные магнитометры достаточно малогабаритны и вместе с электронными блоками могут размещаться на площади около 2 м². Но работать наблюдателям удобней в большом помещении, в котором можно на достаточном удалении от рабочих магнитометров установить дополнительную аппаратуру с магнитными деталями, хранить запасные магнитометры, вносить приборы

или инструменты, необходимые для настройки. Рекомендуется строить павильоны площадью около 25 м² на расстоянии 20-30 м друг от друга и на расстоянии около 100 м от

технических зданий (рис. 3.1). Если павильоны будут иметь минимальные размеры, то между ними нужно построить утепленную будку размером $3 \times 4 \text{ м}^2$, предназначенную для установки распределительных силовых щитков, которые обычно имеют магнитные детали, и для размещения аккумуляторов. 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 разделочным контрольным колодкам, установленным в электробудке. Если применяются оптоволоконные кабели передачи цифровой информации, то их необходимо проложить от вариационных павильонов непосредственно в аппаратную комнату технического здания.

На расстоянии 30–50 м от павильонов выделяются площадки для устройства двух внешних контрольных постаментов, предназначенных для 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. Перед началом строительных работ необходимо произвести детальную компонентную магнитную съемку строительных площадок (кварцевым магнитометром QHM или феррозондовым инклинмометром и протонным магнитометром) с привязкой данных к главному выносному 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 деклинметра или на датчик протонного магнитометра с расстояния 0.3–0.5 метра. Как правило, подходящими материалами для устройства фундаментов являются: песчаник, белый мрамор, 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 шаровых мельниц часто приобретает остаточную намагниченность от воздействия геомагнитного поля. 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 укладывается 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 1–1.2 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 учи-

тывать, что деревянные столбы имеют склонность к эффекту сезонного вращения вдоль своей оси от воздействия влажности окружающей среды. 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 пенопластом или пакетами стекловаты (рис. 3.2).

Долговременная устойчивость положения постаментов вариационных павильонов в значительной степени определяет стабильность базисных уровней вариометров. Стабильность и немагнитность приборных постаментов абсолютных павильонов обеспечивают высокую точность компонентных наблюдений.

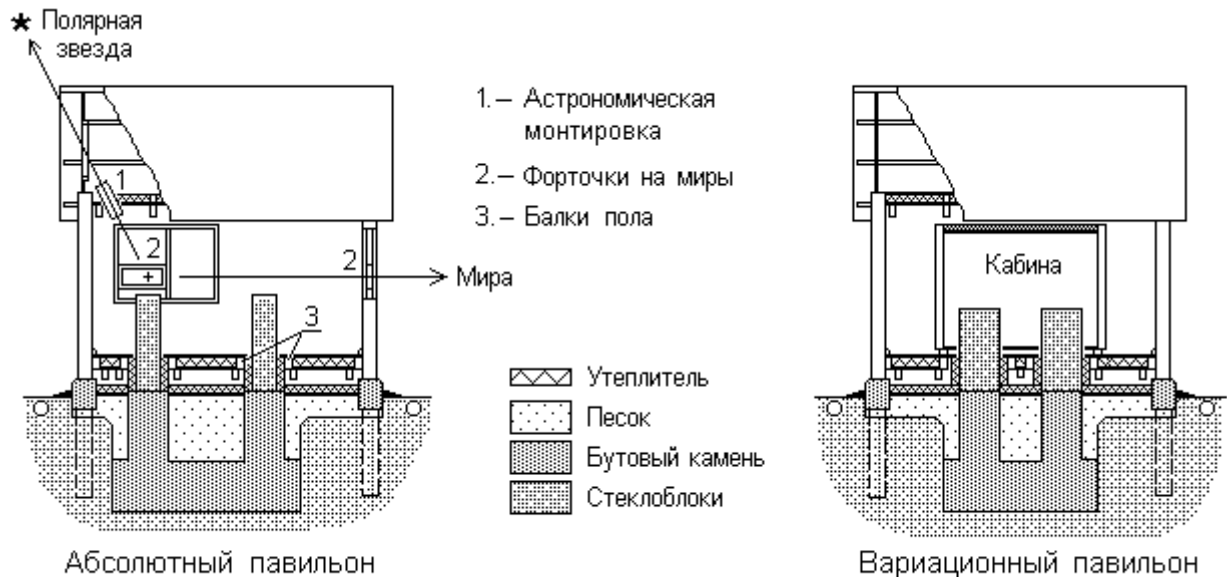


Рис. 3.2

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

С помощью астрономических наблюдений (по полярной звезде или по Солнцу) на постаментах вариационного павильона проводят линии географического меридиана, которые служат ориентиром для правильной ориентации блока X, Y-вариометров.

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 250x150 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 стоит более сотни лет. Можно применить вариант кар-

касной 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 этих материалов на немагнитность.

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 не остается постоянным. Изменения температуры и влажности, подвижки почвы и коробление конструкций, ветровые нагрузки неминуемо приводят к изменению этого воздействия, что проявляется в нестабильности базисных уровней вариометров, а значит, к снижению точности измерения вариаций геомагнитного поля.

Балки пола павильонов устанавливаются с таким расчетом, чтобы они проходили в 100 мм от боковых поверхностей приборных постаментов. Это позволит настилать 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 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 обшивки панелями, 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.

Абсолютный павильон требует хорошего освещения при наблюдениях на теодолитах феррозондовых деklinометров/инклинометров и кварцевых магнитометрах QHM. Поэтому в этом здании предусматриваются широкие окна и немагнитные светильники непосредственно над приборными постаментами. В окнах на линии оптической оси «теодолит – мира» предусматриваются форточки для наведения оптической трубы теодолита на астрономическую миру при измерениях магнитного склонения.

Определение азимута миры непосредственно с приборного постамента всегда точнее, чем косвенные измерения с наружного столба. Для производства таких астрономических наблюдений необходимо предусмотреть специальные отверстия в потолке и крыше

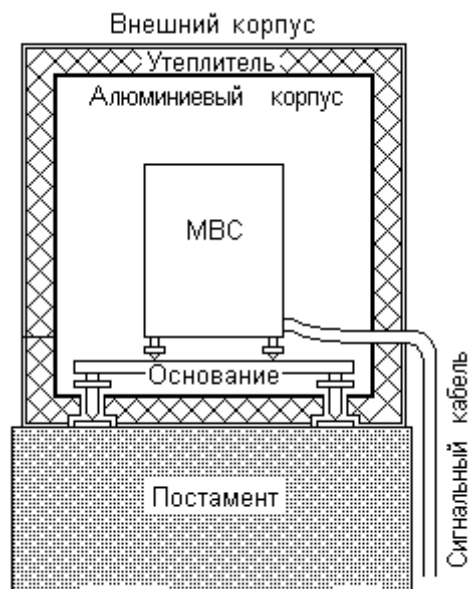


Рис. 3.3

абсолютного павильона для установки оптической монтировки. При строительстве абсолютного павильона на постамент, предназначенный для деklinометра, нужно временно поставить астрономический теодолит и произвести наводку на полярную звезду. С помощью нитей, натянутых между балками потолка, обозначить центр отверстия в потолке для астрономических наблюдений. Оптическая монтировка может быть изготовлена из полиэтиленовой трубы диаметром около 300 мм с подвижной крышкой защиты от атмосферных осадков.

Вариационный павильон может вообще не иметь окон для естественного освещения, но в нем должен поддерживаться стабильный температурный режим вариометров. С этой целью внутри основного

здания вокруг приборных постаментов необходимо смонтировать теплоизоляционную кабину, которую собирают из бруса или пенопластовых панелей с зазором 200 мм над полом павильона для обеспечения кругового обогрева кабины теплым 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. 3.3) из теплопроводящего материала (лист АМГ - $\delta 2$ мм) снижает градиенты температуры в объеме магнитовариационной станции МВС. Верхнюю часть корпуса делают съемной для обеспечения доступа к элементам юстировки станции.

Некоторые магнитные обсерватории (Душети, Одесса) строили 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.

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 деталях датчиков или в положении приборного постамента. Абсолютные магнитометры в таких случаях могут изменить некоторые 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 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 магнитной 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 16–17 °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 специальный маломощный осветитель, предназначенный для подсветки окулярной сетки теодолита при ночных наблюдениях полярной звезды, располагают в непосредственной близости от астрономической монтировки.

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 деklinометром положений магнитного меридиана. Требования к стабильности положения миры зависят от расстояния до нее от приборного постамент 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 $\delta D = 0.1$ угл. минуты при разрешающей способности теодолитов до 1 сек. Следовательно, если миру построить на расстоянии 100 м, то смещение ее положения не должно превышать 3 мм. С такой же точностью необходимо устанавливать деklinометры на приборном постаменте абсолютного павильона. Это достаточно жесткие требования к устройству миры и положению прибора на постаменте. Если расстояние до миры 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 постамент в открытую форточку павильона. На выбранном месте следует вырыть котлован размером 2x2 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 алюминия. 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 угол 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. 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.

Наблюдения азимута миры можно производить непосредственно теодолитом феррозондового деklinометра/инклинометра. Для удобства наведения на Полярную звезду и производства отсчетов горизонтального лимба нужно иметь окулярные призматические насадки, которые обычно входят в комплект астрономических теодолитов. Для исключения коллимационных ошибок теодолита наведения на миру и Полярную 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 Полярной звезды. Т.к. за сутки Полярная описывает круг радиусом около 2° , то сначала необходимо вычислить ее азимут в моменты наблюдений, кото-

рый 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 угловых градусах,

t_s – часовой угол положения Полярной в моменты наведения,

φ – широта места наблюдения в угловых градусах,

δ – азимутальный угол Полярной (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:

$$A = \theta_M - \theta_{gm}, \quad \text{где } \theta_M \text{ – отсчет наведения на миру.}$$

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 гриническом меридиане.

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

Перед наблюдениями азимута миры необходимо 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 Полярную звезду могут возникнуть в холодное время года, когда выходящий через трубу монтировки теплый воздух помещения создает сильный турбулентный поток, приводящий к хаотическим смещениям изображения звезды в зрительной трубе.

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

Таблица 3.1

Азимут миры. Магнитная обсерватория «Иркутск» (п. Патроны)								
Широта $\varphi = 52^\circ 10' = 52,16667$			Долгота $\lambda = 104^\circ 27' = 104,45 \rightarrow 6^h.96333$					
Наблюдатель Нечаев		Дата 29.09.00		Мира N1		Столб N6		Теодолит 2Т2
Данные астрономического ежегодника:								
Звездное время в 0^h UT $S_0 = 00:32:14 = 0.53722$								
Восхождение Полярной звезды (U Mi) $\alpha = 02:33:51 = 2^h.56417$								
Азимутальный угол Полярной (U Mi) $\delta = 89^\circ 15' 46''.2 = 89,26283$								
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 миры	$A = -4^\circ.08476 = -4^\circ 5' 5''$	

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 QНМ. 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 виду того, что на точность протонного магнитометра не влияют условия внешней среды, а сам процесс измерений сводится к измерению частоты сигнала его датчика.

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

С 1967 г. завод «Геологоразведка» для поиска полезных ископаемых освоил серийный выпуск портативных ядерно-прецессионных магнитометров различных модификаций 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 обсерваторских 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 протоно-содержащей жидкостью после воздействия на нее сильного поперечного магнитного поля. Частота прецессии протонов определяется равенством Лармона:

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

где: γ - гиромангнитное отношение протонов (отношение магнитного момента протона μ_p к его механическому моменту P_p); F – модуль индукции геомагнитного поля.

С 1960 г. в практике магнитных измерений принималось значение атомной постоянной $\gamma = 2.67513 \cdot 10^8$ 1/Глс. С 1992 г. IAGA рекомендовал применять уточненное значение постоянной $\gamma = 2.6751525 \cdot 10^8 \pm 40$ 1/Глс. Следовательно, изменился коэффициент преобразования G магнитометров, значение которого сейчас принимается равным

23.48720 нТл/Гц вместо прежних 23.4874 нТл/Гц. (Этот факт следует учитывать при ремонте и настройке протонных магнитометров, 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 сейчас около 0.2 нТл. Реальная приборная погрешность может оказаться большей из-за влияния ферромагнитных примесей в деталях датчика, нестабильности импульсных схем измерения частоты прецессии в блоке электроники и уровня внешних помех.

Датчик (первичный измерительный преобразователь) протонного магнитометра представляет собой сосуд емкостью 200–500 мл с протоносодержащей жидкостью (вода, спирт, керосин), помещенный в катушку с числом витков около 1000, которая выполняет две функции — кратковременного создания сильного магнитного поля в объеме сосуда (около 1–3 мТл) и последующего приема слабого сигнала прецессии протонов жидкости. Сначала в катушку подается постоянный ток поляризации амплитудой 0.5–1 А длительностью около 2 с. За это время происходит переориентация магнитных моментов протонов жидкости по направлению поляризующего магнитного поля. После отключения тока поляризации векторы магнитного момента протонов начинают синхронно прецессировать вокруг силовых линий геомагнитного поля, наводя в обмотке катушки ЭДС амплитудой в несколько микровольт частотой около 2500 Гц. С задержкой на время переходного процесса катушка подключается к усилителю с узкой полосой пропускания для выделения сигнала прецессии, который быстро затухает из-за потери синфазности прецессии ядерных магнитных моментов. Полезное время для измерения частоты прецессии обычно составляет 1–2 с и зависит от величины градиентов геомагнитного поля в объеме датчика, а также от уровня внешних радиочастотных помех.

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

Для снижения воздействия внешних радиопомех датчик обычно имеет незамкнутый экран и дополнительные обмотки, подключенные встречно к измерительной обмотке. 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 сосуд с жидкостью, подтекание которой 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:

$$\tau = G/K, \quad (4.2)$$

где K – коэффициент умножения сигнала прецессии.

Без множителя частоты прецессии ($K=1$) для счета частоты сигнала потребуется время $\tau = G = 23.4872$ с, но сигнал прецессии затухает уже в пределах трех секунд. В протонном магнитометре ММП-201 (с разрешающей способностью 1 нТл) применяется схема умножения частоты прецессии в 64 раза. Поэтому с помощью делителя кварцевого генератора установлено время счета $\tau = 0.3669875$ с. Такой метод преобразования сигнала прецессии достаточно просто реализуется, но при этом возникает возможность генерации ложного сигнала в схеме множителя от любой помехи на его входе. Такие сбойные отсчеты не редкость в протонных магнитометрах и они обычно отбрасываются наблюдателем. В современных магнитометрах функцию отбраковки выполняет 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 нитрозодисульфоната калия (соль Ферми). При диссоциации соли в воде образуются парамагнитные ионы, имеющие сверхтонкую структуру спектра электронного парамагнитного резонанса. Срок жизни этого раствора составляет 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. Кроме того, более сложная схема прибора затрудняет ремонт и настройку магнитометра в обсерваторских условиях.

Современный протонный магнитометр (напр., типа SM90R или POS-1) измеряет период сигнала прецессии без применения схем умножения частоты, а микропроцессор обеспечивает цифровую фильтрацию и предварительную обработку сигнала прецессии, хранит в памяти результаты измерений и обеспечивает удаленную связь с персональным компьютером или с другими устройствами автоматики. Такие модели протонных магнитометров обладают разрешающей способностью 0.1 нТл или 0.01 нТл, что позволяет применять их в качестве однокомпонентных вариационных станций с регистрацией цифровой информации каждые 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 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 (или 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 или с ошибками наблюдателя.

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

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>Вертинпрахова</i>	
N	60000+	Постоянные вариометра F_I : ε_{F_I} нТ/мм= 1.8 $\mu(t)_{F_I}$ нТ/°C= 0	
1	313		
2	313		
3	314		
4	313		
5	312	Данные вариометров: $F_{kv}^*(10 \text{ нТл})$ $F_{nvs}^*(10 \text{ нТл})$ $F_A(\text{мм})$ $t^\circ\text{C}$	
Вычисления:	60313.0	603114	603108 20.3 16.3
Итог:	Дата	День	Время
	7.02.03	38	00:20
	Поле	ΔF_{kv}	ΔF_{nvs}
	60311.0	-0.4	0.2
	F_{0A}	Прибор	
	60274.4	501013	
Макрос закрытия файла.			

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 фоторегистратором, 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).

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, состоящая из колечной системы Гельмгольца или Браунбека, горизонтального теодолитного круга с уровнем и источника стабильного тока. Колечная система 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 за-

висимости от широты расположения магнитной обсерватории колечная система устанавливается на поворотном круге в горизонтальном, либо вертикальном положении.

Колечная установка Иркутской магнитной обсерватории 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.

Источник стабильного тока колечной системы имеет следующие элементы управления:

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

В немагнитном исполнении этот источник тока можно располагать в непосредственной близости от колечной 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 колечной установки (КУ), которые вызваны следующими причинами:

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

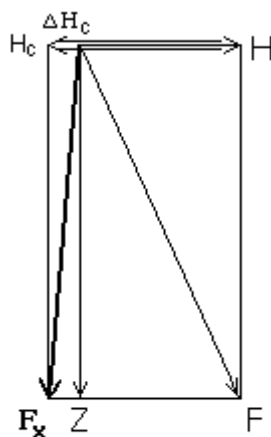


Рис. 4.1

Неточная компенсация горизонтальной компоненты H всегда приводит к завышенным показаниям протонного магнитометра (см. рис. 4.1):

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

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

$$\Delta H_c \approx (2Z \cdot \Delta Z)^{1/2} \quad (4.3)$$

Если погрешность протонного магнитометра составляет 1 нТл, то для Иркутска при $Z=57200$ нТл допускается $\Delta H_c \leq 340$ нТл.

Для магнитометра с погрешностью 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):

$$\Delta I/I = \Delta H_c/H = 110/19000 = 0.006 = 0.6\% .$$

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

Оценим допустимую неточность совмещения магнитной оси колечной системы с направлением магнитного меридиана (рис. 4.2). 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 :

$$\Delta Z_\beta = (H^2/2Z) \cdot \sin^2 \beta \quad (4.4)$$

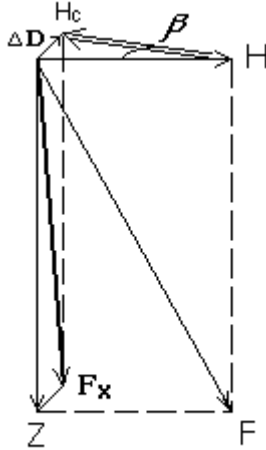


Рис. 4.2

Для магнитометра с погрешностью измерений 1 нТл ($\Delta Z = 1$ нТл) в иркутском магнитном поле ($H=19000$ нТл, $Z=57200$ нТл) допуск угла $\beta \leq 1^\circ$, а при $\Delta Z = 0.1$ нТл - $\beta \leq 0.3^\circ = 20'$.

Эти расчеты показывают, что юстировка колечной системы по магнитному меридиану не представляет проблем, а лимб горизонтального круга может иметь цену деления даже в $10'$.

Таким образом, после настройки колечной установки фактически полностью исключается возможность появления заметных погрешностей из-за влияния первых двух причин (при измерениях в магнитоспокойные дни).

Отклонение магнитной оси колечной системы от горизонтальной плоскости на угол α (рис. 4.3) может внести существенную ошибку в компонентные измерения. В этом случае магнитометр произведет измерение вектора F_x :

$$F_x = Z \pm \Delta Z_\alpha = Z \pm H_c \cdot \sin \alpha \quad (4.5)$$

Из этой формулы можно определить допустимые ошибки в нивелировке колечной системы (предполагая, что $H_c \cong -H$): $\alpha = \arcsin(\Delta Z_\alpha/H) \approx \Delta Z_\alpha/H$ (4.6)

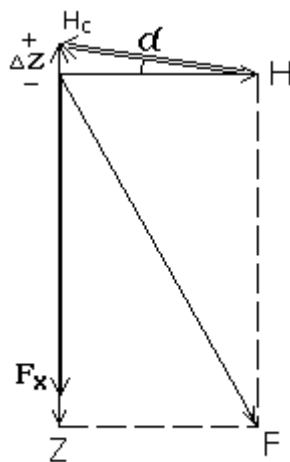


Рис. 4.3

Если производить измерения протонным магнитометром с погрешностью 1 нТл, то угол α не должен превышать 11 угловых секунд для Иркутска. При проведении более точных наблюдений с погрешностью 0.1 нТл угол $\alpha \leq 1''$.

Требуемая точность нивелировки колечной системы представляет очень серьезную проблему. Прежде всего, для колечной установки нужен стабильный фундамент. Кроме того, теодолитный круг не должен иметь люфтов в подвижных соединениях. Наконец, сама колечная установка должна быть изготовлена в виде жесткой конструкции, стабильной к воздействию окружающей среды и иметь уровень или наклонмер с ценой деления в единицы угловых секунд.

Теоретически 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.

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 колечной установке можно выразить единой формулой:

$$F_x = [(Z + H_c \cdot \sin \alpha)^2 + (H - H_c \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (H_c \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha)^2]^{1/2} \quad (4.7)$$

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:

$$\Delta Z \approx 0.5 \cdot [\Delta H^2/Z + (H^2/Z) \cdot (\alpha^2 + \beta^2)] \quad (4.8)$$

Среднеквадратичная погрешность наблюдений методом компенсации:

$$\sigma_Z = (\Delta F^2 + \Delta Z_\alpha^2 + \Delta Z_\beta^2 + \Delta Z_{\Delta H}^2)^{1/2}, \quad (4.9)$$

где ΔF – инструментальная погрешность 0.1 нТл, $\Delta Z_\alpha \approx 0.5$ нТл, $\Delta Z_\beta \approx \Delta Z_{\Delta H} \approx 0.1$ нТл.

Зная инструментальную погрешность протонного магнитометра, можно сделать оценку ожидаемой среднеквадратичной погрешности измерений Z методом компенсации на конкретной обсерватории.

Во время магнитных возмущений трудно измерить Z с погрешностью менее 1 нТл, т.к. вариация δH геомагнитного поля может значительно превышать допустимую неточность компенсации ΔH_c , а вариация δD – допустимое отклонение β магнитной оси коленной 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 коленной установке по известной формуле:

$$H^2 = F^2 - Z^2 \quad (4.10)$$

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 (4.10):

$$\Delta H = |(F/H) \Delta F| + |(Z/H) \Delta Z| \quad (4.11)$$

Если погрешность измерений ΔF и ΔZ оставляет ± 1 нТл, то в Иркутском поле максимальная ошибка при расчете H может достичь ± 6 нТл, что заведомо хуже обсерваторских требований. Так как эта погрешность имеет случайный характер, то ее уменьшают статистикой достаточно большого числа наблюдений.

4.2.3. Подготовка коленной установки к наблюдениям

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

Для настройки коленной установки произведите следующие операции:

- Включите источник тока компенсации и протонный магнитометр на прогрев.
- Проверьте по уровню нивелировку коленной системы.
- Подайте ток в обмотку коленной системы.
- Определите место магнитного меридиана на круге методом отклонений коленной системы в горизонтальной плоскости, используя показания протонного магнитометра. (Измеряемый вектор $F_\beta = [F^2 + H_c \cdot (H_c + 2H \cdot \cos \beta)]^{1/2}$ зависит от угла отклонения β магнитной оси коленной системы от положения магнитного меридиана на круге).
- Зафиксируйте специальными ограничителями вращения коленной системы положения магнитной оси коленной системы на север (N) и юг (S).
- Потенциометром источника двойного тока компенсации 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 коленной 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 коленной системы на 180°.

Настройка колечной установки является ответственным этапом при проведении компонентных измерений протонным магнитометром и выполняется опытным специалистом. При стабильном приборном постаменте повторную юстировку можно производить ежеквартально, а в периоды промерзания/размерзания почвы, когда возможны подвижки постаментов, настройку колечной установки рекомендуется производить ежемесячно.

4.2.4. Методика проведения наблюдений методом компенсации

Измерения в колечной установке методом компенсации проведите 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	Наблюдатель	Вертинпрахова	Вариометры $t^\circ C$ 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/ $^\circ C$:		F_A 0	H_A 0.18	Z_A 0		
Время	F_{kv}	Z_{kv}	H_{kv}	F_{nvs}	Z_{nvs}	H_{nvs}
00:09	603141	3.5	603135	11.3	22.2	18.4
00:10		-0.4	3.1	20.6	10.9	39.0
00:11		-0.5	3.3	20.4	11.0	39.0
00:12	603140	3.9	603134	11.6	22.0	18.4
Итог:	Дата	Поле	K_v	N_{VS}	A	Прибор
H_0	07.02.03	18997.3	18993.9	18986.1	18940.1	КУ-1
Z_0	07.02.03	57244.3	57244.8	57223.8	57150.7	КУ-1
$F_0, \Delta F$	07.02.03	60314.3	0.2	0.8	60274.5	КУ-1

Макрос закрытия файла

Значения вариаций H и Z цифровых станций вводятся в таблицу без их базисных уровней, а значения вариаций с магнитограмм записываются в мм. Можно традиционный способ определения базисных значений вариометров заменить вариантом определения поправок 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):

$$F_N^2 = Z^2 + (H_c + H)^2 \quad (4.12)$$

$$F_S^2 = Z^2 + (H_c - H)^2 \quad (4.13)$$

$$F^2 = Z^2 + H^2$$

Отсюда можно определить величину дополнительного поля в колечной системе:

$$H_c = [0.5 \cdot (F_N^2 + F_S^2) - F^2]^{1/2}, \quad (4.14)$$

и вычислить горизонтальную компоненту геомагнитного поля H :

$$H = 0.25 \cdot (F_N^2 - F_S^2) / H_c \quad (4.15)$$

Если $H_c = -H$, то мы возвращаемся к рассмотренному методу Нельсона компенсации H .

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

Колечная установка вносит 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 (4.13) вычисления H 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 $H_c = C \cdot I$ и любые изменения тока вызывают изменения поля: $\Delta H_c = C \cdot \Delta I$. Из формул измерения F_N и F_S (4.12, 4.13) можно определить допустимую нестабильность дополнительного поля: $\Delta H_c = [F_x / (H_c + H)] \cdot \Delta F_x$. Отсюда определяем необходимые требования к источнику тока колец:

$$\Delta I = [F_x / C(H_c + H)] \cdot \Delta F_x \quad (4.16)$$

Измерения в колечной установке Иркутской МО имеют следующие исходные параметры: $H_c \approx 38000$ нТл, $F_N \approx 80700$ нТл, протонный магнитометр имеет инструментальную погрешность 1 нТл, т.е. $\Delta F_N \approx 1$ нТл. Следовательно, нестабильность тока колец должна быть в пределах $\Delta I \leq 0.0008$ мА, а стабилизатор тока должен быть класса 0.0001 (0.001%). Такие источники тока относятся к прецизионным устройствам. Однако, учитывая сравнительно короткое время, необходимое для проведения цикла измерений (около 5 минут), можно на порядок снизить эти требования.

Произведем оценку допустимого угла отклонения β магнитной оси колечной системы от магнитного меридиана в горизонтальной плоскости (рис. 4.4). Измерения дадут ве-

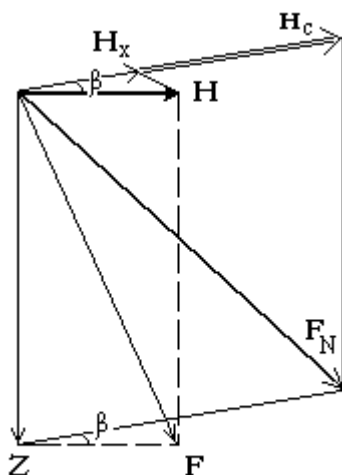


Рис. 4.4

личину проекции H_x горизонтальной компоненты H геомагнитного поля:

$$H_x = H \cdot \cos \beta, \text{ откуда: } \beta = \arccos(1 - \Delta H_\beta / H)$$

При малых угла β можно применять упрощенную формулу: $\beta \approx (2\Delta H_\beta / H)^{1/2}$ (4.17)

В Иркутске при погрешности измерений 1 нТл отклонение магнитной оси кольцевой системы не должно превышать $35'$, а при погрешности 0.1 нТл – не более $11'$.

Требования к юстировке магнитной оси кольцевой системы стали в два раза выше по сравнению с методом компенсации, но остались в доступных пределах для настройки кольцевой установки.

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

$$\Delta H_\alpha = Z \cdot \sin \alpha + H \cdot (\cos \alpha - 1) \approx Z \cdot \sin \alpha \quad (4.18)$$

Отсюда можно оценить требования к нивелировке:

$$\alpha = \arcsin(\Delta H / Z) \approx \Delta H / Z \quad (4.19)$$

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 такую нивелировку невозможно, но дополнительные измерения после поворота кольцевой системы на 180° компенсируют эту ошибку.

Можно оценить итоговую среднеквадратичную погрешность рассмотренного метода компонентных измерений геомагнитного поля. Из формул (4.14 и 1.15) определяем полный дифференциал:

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

- 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 кольцевой системе и в вариациях геомагнитного поля.

Данные наблюдения введите в бланк электронной таблицы 4.3.

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	16.09.2002	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}	F _A	Z _A	H _A
00:14	603111	-3.6	10.4	603110	12.7	5.5	32.0	33.4	21.4
00:15		-3.6	10.1		12.7	5.3		33.4	21.4
00:16		-3.6	10.1		12.7	5.3		33.4	21.2
00:17		-3.6	10.0		12.8	5.3		33.4	21.2
00:18		-3.6	9.9		12.9	5.0		33.4	21.1
00:19	603109	-3.6	9.4	603108	12.8	4.8	32.0	33.4	21.1
Итог:	Дата	Поле		Kv	NVS	A			
H _o	16.09.02	18988.0		18998.8	18993.0	18932.1			
Z _o	16.09.02	57240.0		57244.3	57227.9	57160.5			
F _o , ΔF	16.09.02	60311.0		0.0	0.1	60253.4			
Макрос закрытия файла									

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

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.

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 под-

водных 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.

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. 4.5).

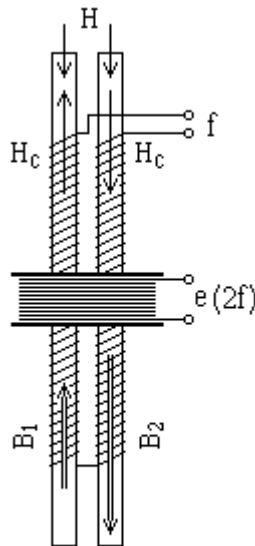


Рис. 4.5

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:

$$e = -S \cdot N_s \cdot d(B_1 + B_2) / dt, \quad (4.20)$$

где S – сечение стержня, N_s – количество витков сигнальной обмотки, t – время, B_1 и B_2 – магнитные индукции в сердечниках.

$$B_1 + B_2 = 2\mu_0 \cdot \mu' \cdot H, \quad (4.21)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная,

μ' – относительная магнитная проницаемость сердечника.

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).

Максимальное значение μ' имеет место при $\omega t = 0$, а минимальное

при $\omega t = \pi/2$ и тогда среднее значение ЭДС сигнала можно выразить:

$$E = (4/\pi) \cdot \eta \cdot \omega \cdot S \cdot N \cdot H \cdot \mu_0 \cdot (\mu'_{\max} - \mu'_{\min}) = GH, \quad (4.22)$$

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:

$$e(\omega t) = 4\omega \cdot S \cdot N \cdot H \cdot \mu_0 \cdot \sum n \cdot \mu_{2n} \cdot \sin(2n\omega t) \quad (4.23)$$

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.

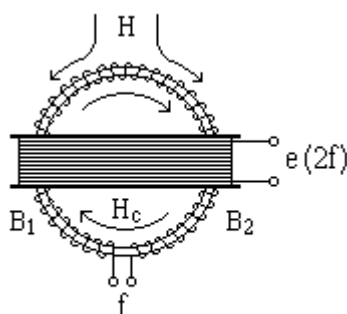


Рис. 4.6

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. 4.6). Для внешнего магнитного поля кольцевой сердечник является разомкнутой системой и

принцип его работы не отличается от стержневого 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.

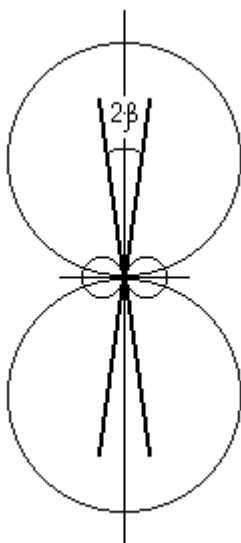


Рис. 4.7

Однако столь высокая угловая чувствительность феррозонда может оказаться нереализованной из-за несовершенства технологии изготовления сердечника. В реальном дифференциальном сердечнике стержни представляют собой тонкие проволочки или полоски толщиной 0.1 мм из пермаллоя, которые трудно установить строго параллельно друг другу (рис. 4.7) 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 квадратурная помеха от поперечного поля H и феррозонд приобретает два дополнительных лепестка диаграммы направленности (рис. 4.7). Такой деклинометр/инклинометр будет иметь пониженную угловую чувствительность, которая зависит как от угла β , так и от величины φ сдвига фаз сигналов каждого сердечника: $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_0 \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi$

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

4.3.3. Блок электроники феррозондового магнитометра

Блок электроники феррозондового магнитометра обычно состоит из следующих основных узлов:

- задающего генератора ЗГ удвоенной частоты возбуждения $2f_g$;
- триггерного делителя Д для создания сигнала возбуждения f_g ;
- 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.

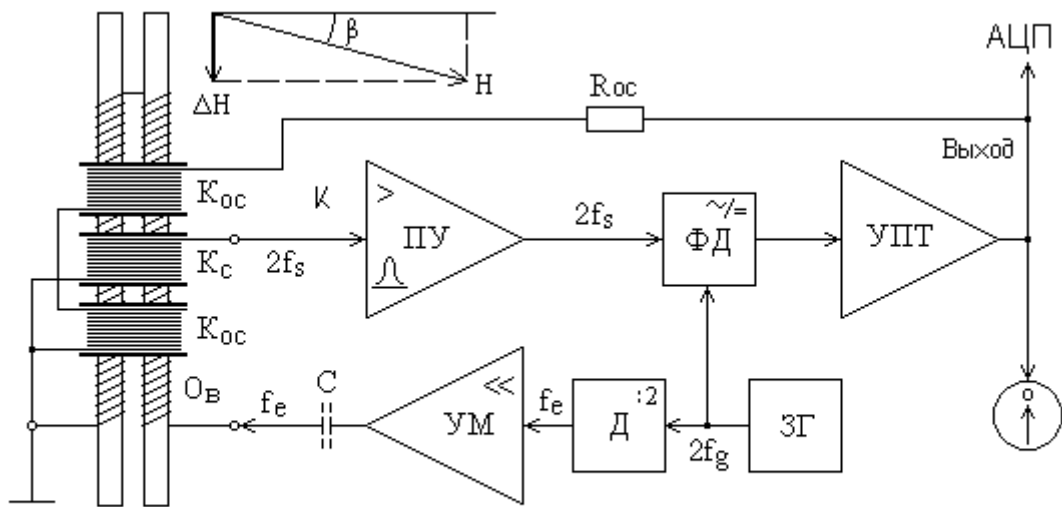


Рис. 4.8

Ток возбуждения частоты f_e может иметь синусоидальную или прямоугольную форму. Достаточно широко применяется метод феррорезонансного возбуждения, при котором емкость C образует с индуктивностью L_0 обмотки возбуждения ОВ цепь последовательного резонанса: $C_2 = 1/(2\pi f_e)^2 L$. 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} применяют преобразователь «напряжение/ток», выполненный на операционном усилителе.

К выходу УПТ обычно подключают цифровой милливольтметр, аналого-цифровой преобразователь АЦП, или стрелочный «нуль-индикатор». Для повышения стабильности

общего коэффициента преобразования G магнитометра обратную связь феррозонда подключают к выходу АЦП.

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

4.3.4. Феррозондовый магнитометр LEMI-203

Феррозондовый магнитометр LEMI-201 Львовского центра Института космических исследований 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.

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, действующего на феррозонд. Аналого-цифровой преобразователь с дисплеем подключен к выходу масштабного усилителя. Одновременно выходной сигнал с УПТ подается на контрольное гнездо Х2 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 Х3.

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, даже небольшой

опыт эксплуатации LEMI-203 Иркутской обсерваторией выявил нестабильность 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 :

$$D = n_m - n_g = n_m - (n_M - A), \quad (4.24)$$

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.

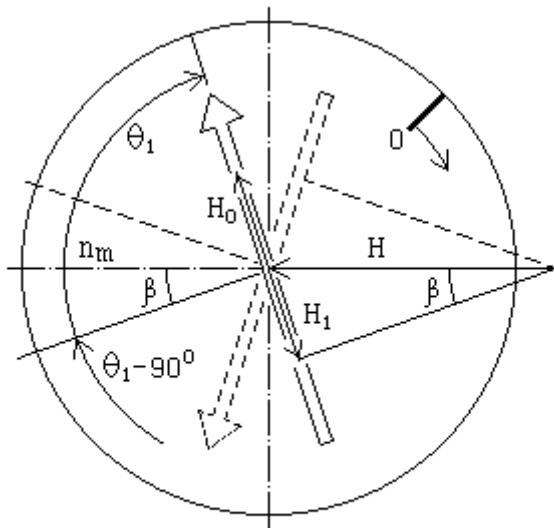


Рис. 4.8

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. 4.8). Нулевые показания на выходе магнитометра будут только при условии компенсации остаточного поля в сердечнике проекцией горизонтальной компоненты геомагнитного поля:

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

где β - угол ошибки одиночного измерения магнитного меридиана.

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:

$$n_m = [(\theta_1 + \theta_2)/2] \pm 90^\circ \quad (4.25)$$

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 деклинометре 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 $H_z = Z$

точным полем H_0 или компенсировать его. Наблюдатель должен развернуть теодолит так, чтобы магнитометр показал нулевой отсчет. Условие нулевых показаний определяется формулой:

$$H_0 \pm Z$$

ном 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 $W \leftrightarrow E$, 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 миря 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 (4.24), которые удобно производить на персональном компьютере в электронных таблицах.

Азимут миря A на приборном столбе является одной из постоянных обсерватории и эпизодически переопределяется с помощью астрономических наблюдений по полярной звезде или по солнцу. Иркутская обсерватория имеет две рабочие миря N1 и N2, которые с учетом погодных условий часто используются одновременно в одном наблюдении магнитного склонения.

В таблице 4.4.1 приведен пример наблюдения склонения феррозондовым деклинометром, изготовленного на базе немагнитного теодолита ТТ-5 с ценой деления горизонтального лимба $0.5'$.

Таблица 4.4.1

Феррозондовый деклинометр ФД1 Н б/н Столб N6					Поправка на прибор		0
Азимут миря (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.)	$\Delta D_{kv}'$	$\Delta D_{nvs}'$	$\Delta D_I(\text{mm})$
	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.							

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

В таблице 4.4.2 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 <i>Бычкова</i>				
Время	Позиция	Град. мин. сек.			ΔD nT	Отсчет в мин.		Вариометры D			
	Мира 1 ↓	0	7	26		7.433					
	Мира 1 ↑	5	20	3		320.05		D_{kv}'	D_{nvs}'	D_A mm	
00:20	Восток ↑	271	6	54	0.5	16266.8		-20.9	2.8	-3.6	
00:21	Запад ↑	92	16	19	0.5	5536.33		-20.8	2.9	-3.8	
00:23	Восток ↓	92	17	49	0.2	5537.82		-22.2	1.5	-5.5	
00:24	Запад ↓	271	13	48	0.4	16273.8		-21.0	2.7	-4.2	
	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	$D_o - Kv$		$D_o - NVS$		$D_o - A$	Прибор			
	D_o	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) определяется 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) определяется по формуле:

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

Разброс значений углов коллимации 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 меридиана и повернуть ее вокруг горизонтальной оси до совмещения нормали датчика с направлением полного вектора F . Это положение определяется по нулевым показаниям магнитометра (рис. 4.9). Возможная ошибка измерения угла наклона ΔI , вызванная смещением нуля магнитометра, определяется по формуле: $\Delta I \approx H_o / F$. Эта ошибка компенсируется проведением двух из-

мерений с вращением зрительной трубы вокруг горизонтальной оси при направлении трубы на Север ($N\uparrow$) и Юг ($S\downarrow$).

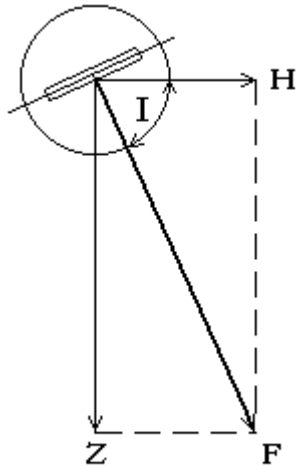


Рис. 4.9

Для установки феррозонда в магнитном меридиане с погрешностью не более 10 угловых минут, необходимо производить измерения наклона сразу после проведения измерений склонения и вычисления положения магнитного меридиана на горизонтальном круге теодолита. Для старых теодолитов очень важно после каждого поворота трубы с максимальной точностью устанавливать горизонтальность положения нуля вертикального круга по его уровню, т.к. отсчет угла наклона I производится по вертикальному лимбу. Современные теодолиты имеют маятниковый оптический компенсатор, который автоматически устанавливает по горизонтали положение вертикального лимба на отnivelированном теодолите.

Перед началом каждой серии наблюдений углов наклона и по завершении ее необходимо произвести наблюдения полного вектора F протонным магнитометром. Измерения F производятся либо на одном приборном столбе при снятом с него феррозондовом инклинометре, либо на соседнем столбе при известной поправке ΔF между столбами. Среднее значение F (с учетом поправки на столб) используется для вычисления H и Z по известным формулам:

$$H = F \cdot \cos I, \text{ и } Z = F \cdot \sin I \quad (4.29)$$

Если обсерватория имеет протонную вариационную станцию, то специальные наблюдения F можно не проводить, т.к. значения вектора F на моменты измерения наклона I можно взять из данных этой станции с учетом поправки ΔF между точками измерения этих элементов.

Погрешности расчетных значений H и Z определяются из формул:

$$\Delta H = (\cos I) \cdot \Delta F - (F \cdot \sin I) \cdot \Delta I, \quad \Delta Z = (\sin I) \cdot \Delta F + (F \cdot \cos I) \cdot \Delta I \quad (4.30)$$

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: $dH \approx 4$ нТл и $dZ \approx 8$ нТл. С такими приборами производить определения горизонтальной и вертикальной составляющих методом измерения наклона 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. Согласно формул (4.30) величина погрешности компонентных измерений с помощью феррозондового инклинометра зависят от значений F и I , т.е. от местоположения обсерватории.

4.3.8. Методика проведения наблюдений наклона

По результатам измерения склонения произведите вычисления положения магнитного меридиана на горизонтальном круге теодолита:

$$\theta_m = (\theta\uparrow_1 + \theta\uparrow_2 + \theta\downarrow_3 + \theta\downarrow_4) / 4 + 90^\circ \quad (4.30)$$

Теперь произведите перечисленные ниже операции.

- Проверьте нивелировку теодолита и установите зрительную трубу в плоскости магнитного меридиана по рассчитанному значению угла θ_m .
- Произведите наблюдения F_1 протонным магнитометром (см. раздел 4.2.1).
- 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 полного наблюдения 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 4.5

Феррозондовый деклинометр/инклинометр ТНЕО-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 nT	Отсчет в мин.							
	Мира	\downarrow	86	20	5	5180.1				Вариометры D			
	Мира	\uparrow	266	20	21	15980.4				D_{kv}'	D_{nvs}'	D_A mm	
08:08	Восток	\uparrow	0	32	4	-0.1	32.1				-23.6	-5.4	-21.4
08:13	Запад	\uparrow	175	22	24	0	10522.4				-23.5	-5.2	-21.0
08:16	Восток	\downarrow	175	5	7	0.3	10505.1				-23.3	-5.1	-20.4
08:19	Запад	\downarrow	0	13	40	0	13.7				-23.2	-5.0	-20.2
	Мира	\downarrow	86	20	16	5180.3							
	Мира	\uparrow	266	21	10	16981.2							
08:34	F_1		60313	60313	60313	60313	60313	60313	60312				
08:39	Юг	\uparrow	70	47	10	-0.3	4247.2						
08:42	Север	\downarrow	250	47	14	0.1	15047.2						
08:47	Север	\uparrow	287	30	30	-0.8	17250.5						
08:51	Юг	\downarrow	107	30	7	0	6450.1						
08:52	F_2		60312	60312	60312	60312	60312	60312	60312				
Вычисления:	θ_m'	θ_{M-A}'	D'			F nT	I°		H nT	Z nT			
	10668.3	10825.3	-156.95			60312.4	71.641		18996.8	57242.5			
Контроль: Дата	β'	α'	S_{onT}			α_{IF}	S_{IonT}	$\varepsilon= 0.37$	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	NVS	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 наклона 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 4.5 имеет более сложную структуру по сравнению с предыдущими. Здесь, кроме того, введена дополнительная расчетная строка по контролю систематических погрешностей наблюдений (см. раздел 4.3.4).

4.4. Кварцевый магнитометр QNM

На многих магнитных обсерваториях в качестве дублирующих и полевых инструментов для измерения склонения D и горизонтальной компоненты H еще используются кварцевые магнитометры типа QNM. Этот инструмент создан Ла Куром в 1931 г. для проведения взаимного контроля результатов наблюдений различных обсерваторий. Магнитометр QNM 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.

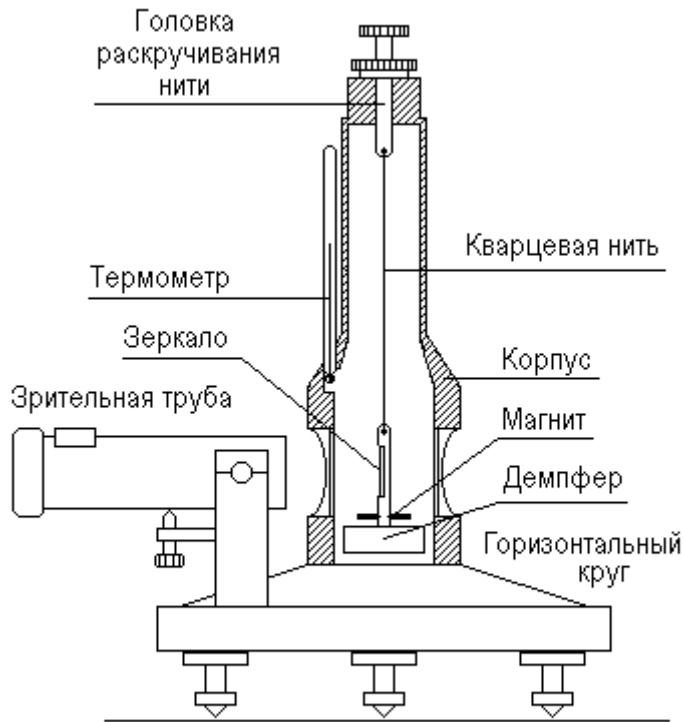


Рис. 4.10

Кварцевый магнитометр QNM (рис. 4.10) представляет собой упрощенную конструкцию классического магнитного теодолита. Основным узлом прибора является кварцевая нить с чувствительной системой из зеркала, магнита и слюдяной пластинки воздушного демпфера колебаний. Зрительная автоколлиматорная труба необходима для определения углов положения чувствительной системы и направления на астрономическую

миру. 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 головке раскручивания нити и в узле магнита.

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 QNM магнит несъемный и поэтому применяется метод искусственного закручивания нити вращением корпуса магнитометра в одну и в другую сторону на один оборот. При этом магнит занимает два положения равновесия:

$$M \cdot H \cdot \sin \theta_1 = q \cdot (\psi + 2\pi) \quad (4.31)$$

$$M \cdot H \cdot \sin(-\theta_2) = q \cdot (\psi - 2\pi) \quad (4.32)$$

где: M – магнитный момент магнита,

H – горизонтальная компонента геомагнитного поля,

q – коэффициент кручения кварцевой нити,

ψ – угол закрученности нити.

Отсюда можно найти угол, на который закручена нить:

$$\psi = 2\pi \cdot \tan[(\theta_1 - \theta_2)/2] / \tan[(\theta_1 + \theta_2)/2] \quad (4.33)$$

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:

$$\Delta D \approx \{[(\theta_1 - \theta_2)/$$

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.
- Плавное 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.
- Плавное 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 4.6

Кварцевый магнитометр QHM N156		Go= 13918		$\mu(t)$ nT/°C= 0		$\Delta D' = -0.1$				
Дата 10.12.02		Наблюдатель Талалаевская		Поправки на столб N0		$\Delta D' = 0.1$ ΔH nT= 2				
Время	t °C	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		+2 π	271	10.0	8.5	16269.3				
01:08		-2 π	176	57.0	56.0	10616.5				
01:10		-2 π	176	57.5	56.5	10617.0				
01:15		+2 π	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 nT = 19000.3						
Вариометры:		Время	D _{kv}	H _{kv}	D _{nvs}	H _{nvs}	D _A мм	H _A мм	t °C	$\mu(t)$ nT/°C
		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	
Do	10.12.02	-152.5		-134.2		-156.0	-149.5			
Ho	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:

$$H = F \cdot \cos I, \quad Z = F \cdot \sin I, \quad X = F \cdot \cos I \cdot \cos D, \quad Y = F \cdot \cos I \cdot \sin D \quad (4.38)$$

Возможен другой вариант минимального комплекта абсолютных приборов, состоящий из протонного магнитометра с коленной 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:

$$H = (F^2 - Z^2)^{1/2}, \quad \text{или} \quad Z = (F^2 - H^2)^{1/2}, \quad X = H \cdot \cos D, \quad Y = H \cdot \sin D \quad (4.39)$$

Применяя эти формулы, мы предполагаем, что все измерения относятся к одному моменту времени. На самом деле комплекс абсолютных наблюдений занимает по времени достаточно большой промежуток времени (от 5 до 20 мин.) Геомагнитное поле за это время не остается постоянным. Усредняя все отсчеты инструментов, мы исходим из предположения линейного изменения поля. Для повышения точности результатов наблюдений Жан Рассон рекомендует наблюдения приводить к единому моменту времени, используя данные вариационных станций. Например, для приведения измерений протонным магнитометром полного вектора F к моментам i измерения наклонения I феррозондовым инклинометром Рассон рекомендует использовать вариации dH , dZ или dX , dY , dZ :

$$F_i = (H_m/F_m$$

где ΔF , ΔI – 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:

$$\sigma_H = \{[(F/H$$

Кварцевые магнитометры QHM, которыми располагают многие обсерватории, могут применяться в качестве запасных приборов и для проведения полевых измерений. Поэтому с целью контроля сохранения инструментальных поправок QHM 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 проверке. 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 регулярности наблюдений в случае отказа одного из инструментов каждой обсерватории следует иметь дублирующий комплект абсолютных магнитометров. Кроме того, для объективности результатов абсолютных измерений традиционно рекомендуется иметь в штате обсерватории не менее двух квалифицированных наблюдателей, которые поочередно проводят наблюдения.

4.5.2. Рекомендации наблюдателю

Все магнитометры, кроме протонного магнитометра, нуждаются в устойчивых немagnetных постаментов (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 абсолютных магнитометров, то абсолютный павильон должен иметь один-два приборных постаментов. 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 столбы.

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 между столбами. Определение «поправки на столб» рекомендуется производить в магнитоспокойные дни после окончания летне-осеннего сезона повышенного риска изменения магнитной обстановки на территории обсерватории. Наблюдения обычно производятся основным и дублирующим магнитометрами одновременно на двух постаментов. После каждой серии наблюдений магнитометры меняются местами. Если нет возможности проводить наблюдения двумя магнитометрами, то следует при наблюдениях одним инструментом на разных столбах тщательно фиксировать время произведенных отсчетов и вводить в измерения поправки на вариацию по материалам магнитовариационной станции. Как правило, шесть серий наблюдений на каждом столбе дают достаточно надежный результат по определению поправок на столб. В тех случаях, когда новые «поправки на столб» 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 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 для снятия отсчетов к магнитометру.

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 заходить в вариационный павильон.

Чтобы исключить сомнения в качестве измерений, не следует одновременно с наблюдениями проводить какие-либо дополнительные работы внутри павильонов и 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 все 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 снятия отсчета показаний магнитометра. 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 необходимо предусматривать служебный канал отметчика моментов абсолютных наблюдений или программно выделять соответствующие метки в температурном канале.

Эпизодически следует проверять устойчивость приборных постаментов (особенно деревянных столбов) и отсутствие контакта между постаментом и полом павильона. Для этой цели удобно использовать QНМ, у которого чувствительный магнит на кварцевой нити достаточно долго успокаивается от 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 году Ташаром в Сиаме. Постепенно возрастал интерес к организации непрерывных наблюдений вариаций геомагнитного поля. Сначала показания магнитных вариометров считывались с оптических шкал каждые три часа, но уже в конце 19-го века на магнитных обсерваториях появились барабанные фоторегистраторы с непрерывной записью вариаций. Спектр частот вариаций геомагнитного поля лежит в очень широком диапазоне от 10^2 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 вариаций.

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 различным исполнением узлов с целью повышения стабильности метрологических параметров приборов. В полной мере в те годы эта задача так и не была решена, в результате чего основное содержание работы наблюдателей магнитных обсерваторий заключалось в непрерывном контроле базисных уровней вариометров, которые могли дрейфовать десятками нТл в сутки.

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 магнито-статический 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.

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 его датчика.

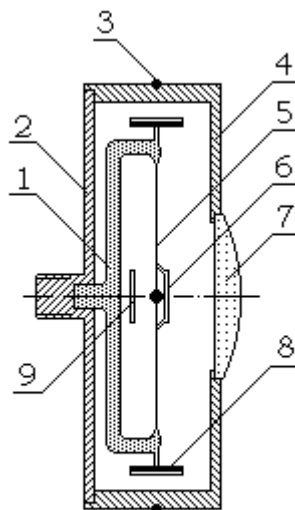


Рис. 5.1

В 1959 г. В.Н. Бобров создал вариометр на основе кварцевой рамки Шельтинга, в котором вся настройка магнитной системы производилась кварцевым дувом во время изготовления датчика (рис. 5.1). Чувствительный магнит из викаллой 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 геомагнитного поля 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.

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 на обсерватории. Вариометры Боброва относительно старых вариометров малогабаритны, достаточно просто устанавливаются на магнитной обсерватории, слабо зависят от наклонов приборных фундаментов, обладают малыми температурными коэффициентами и при этом имеют очень высокую стабильность базисного уровня. За высокие параметры приходится расплачиваться единственным ограничением, - каждый датчик Боброва изготавливается только на определенное магнитное поле. Поэтому для экспедиционных работ приходится 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 B определяется в векторной форме: $[M$

ляемую магнитным моментом магнита и коэффициентом кручения нити. При этом, у *H*-вариометра будут заметно проявляться температурные коэффициенты магнита и нити:

$$G = G_0$$

метров поддерживают стабильную температуру. Во время снижения и подъема температуры производят серию абсолютных наблюдений компонент геомагнитного поля. Диапазон изменения температуры в кабине должен быть не менее 20 °С. По результатам измерений определяется зависимость от температуры разностей показаний идентичных вариометров или базисных значений испытуемых вариометров по результатам серии абсолютных наблюдений. Если эти зависимости оказываются нелинейными, то причиной такого явления могут быть большие градиенты температуры в кабине из-за слишком быстрого ее изменения или магнитность постаментов. Поэтому рекомендуется проводить цикл температурных измерений в течение двух-трех суток, а остаточную намагниченность постаментов можно устранить только хирургическим методом с помощью строителей.

Коэффициент преобразования G определяется методом создания магнитного поля образцовой величины в объеме чувствительного магнита. Для этой цели предназначено кольцо градуировки (поз.3 рис.5.1), в которое подается ток известной величины. В центре кольца поле определяется по известной формуле:

$$B_k = (628.5/R) \cdot I_k = C_k \cdot I_k \quad (5.11)$$

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 вариометров Боброва $C_k = 12.7 \pm 0.1$ нТл/мА, ($C_{kD} = 12.7/H \sin 1' \text{ '}/\text{мА}$)

Иногда для создания образцового поля B_k в объеме датчика применяется система колец Гемгольца:

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

где: n – число витков в одном кольце.

На практике измеряются отклонения светового луча от зеркала магнита на магнитограммах в мм (или в мВ для вариометров с фотопреобразователем) и поэтому коэффициент преобразования вычисляется по формулам:

$$G = C_k \cdot I_k / \Delta n \text{ нТл/мм} \quad \text{или} \quad G = C_k \cdot I_k / \Delta U \text{ нТл/мВ} \quad (5.12)$$

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

5.1.1. Магнитовариационная станция с фотозаписью

Комплект компонентных вариометров с регистратором называют вариационной станцией. В качестве регистраторов вариаций геомагнитного поля уже более 100 лет применяются барабанные фоторегистраторы с приводом от часового механизма. Такие станции потребляют не более 0.4 Вт электроэнергии, просты в обслуживании и очень надежны при непрерывной круглосуточной работе. Существенным недостатком этих станций является опасность засвечивания фотобумаги, необходимость в процессах фотообработки, применение ручного труда при оцифровке аналоговых записей. Кроме того, во время магнитных бурь записи компонент на магнитограммах переплетаются, теряется их контрастность или они вовсе выходят за границы рабочего поля. Очень часто фактически терялась значительная часть ценнейшей информации. В тоже время, аналоговые записи дают прекрасную визуальную картину всего спектра вариаций геомагнитного поля.

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 неопределимую информацию о геофизических явлениях прошлого столетия, связанных с магнитным полем Земли.

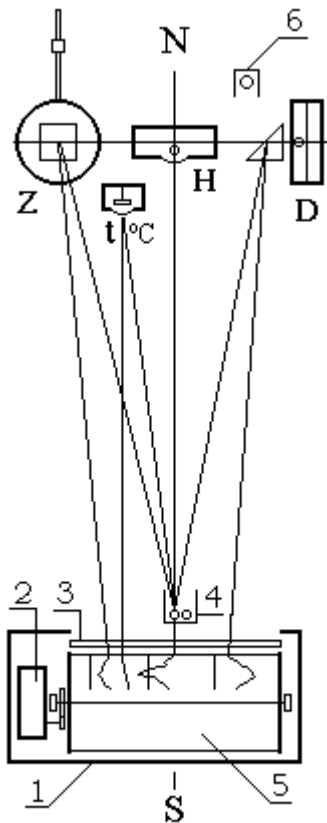


Рис. 5.2

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 фундамент следует проверить на немагнитность с помощью наблюдений кварцевым магнитометром QHM или феррозондовым инклинометром в различных точках на поверхности фундамента. Применять протонный магнитометр для этой цели не рекомендуется, т.к. сильное поле поляризации датчика может оставить на бетонной тумбе 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. Дополнительным магнитом выводится подвижный 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 коэффициент преобразования чувствительного магнита зависит от угла φ между его осью и направлением магнитного меридиана:

$$G_x = (C \pm M \cdot H \cdot \sin \varphi) / M \cdot \cos \varphi \approx G_H \cdot (1 \pm H \cdot \varphi / G_H) \quad (5.13)$$

Если H -вариометр точно установлен по нормали к магнитному меридиану ($\varphi = 0$), то формула (5.13) превращается в формулу (5.4).

Теперь следует зафиксировать пластилином подпятники вариометра. Подвижкой осветителя (4) и регистратора (1) добиваются попадания на линзу (3) примерно на середину барабана (5) зайчиков вариометра. Регистратор нивелируется по образующей барабана, а вертикальность нити датчика проверяется по горизонтальности перемещения подвижного зайчика воздействием на магнит вариометра каким-либо магнитным предметом.

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. Необходимая юстировка осуществляется наклоном призмы вариометра. 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 чувствительный магнит 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 $d\theta$:

$$d\theta = (dD/G_D) \cdot [1 \pm (dH/dD) \cdot \operatorname{tg} \varphi] \quad - \text{ для } D\text{-вариометра,} \quad (5.14)$$

$$d\theta = (dD/G_H) \cdot [1 \pm (dD/dH) \cdot \operatorname{tg} \varphi] \quad - \text{ для } H\text{-вариометра.} \quad (5.15)$$

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 поперек меридиана) с погрешностью менее 34 угловых минут. При активном вековом ходе склонения в 4-6 мин/год необходимо через каждые 5-10 лет производить переустановку вариометров согласно новому положению магнитного меридиана.

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:

$$d\theta = (dZ/G_Z) \cdot [1 \pm (dD/dZ) \cdot \operatorname{tg} \alpha] \quad (5.16)$$

Если чувствительный магнит Z -вариометра установлен по магнитному меридиану, то:

$$d\theta = (dZ/G_Z) \cdot [1 \pm (dH/dZ) \cdot \operatorname{tg} \alpha] \quad (5.17)$$

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 $\alpha \leq 15'$).

Ширина магнитограмм фоторегистраторов обычно составляет 200 или 280 мм при стандартной скорости развертки 20 мм/час. Повороты зеркала чувствительного магнита каждого вариометра на угол $d\theta$ приводит к линейному перемещению зайчика по образующей барабана на расстояние dn мм, причем $dn = L$

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:

$$\varepsilon_{Hx} = \varepsilon_H \pm H \cdot \text{tg } d\theta \approx \varepsilon_H [1 \pm (H \cdot dn/4\varepsilon_H L^2)] \quad (5.22)$$

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

Наконец, для Z -вариометра имеем подобную формулу:

$$\varepsilon_{Zx} = \varepsilon_Z \pm Z \cdot \text{tg } d\theta \approx \varepsilon_Z [1 \pm (Z \cdot dn/4\varepsilon_Z L^2)] \quad (5.23)$$

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 обработке магнитных бурь.

Следует отметить, что вариометры Боброва, имеющие оптический рычаг 2 метра, с большой точностью устанавливаются по магнитному меридиану и по горизонтали. Поэтому при умеренных возмущениях геомагнитного поля станцию с фотозаписью можно применять в качестве контрольной по уточнению параметров 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. Дополнительная лампочка в основном осветителе (4) служит в качестве отметчика времени каждого наблюдения в виде точки около записи вариаций и базисных линий.

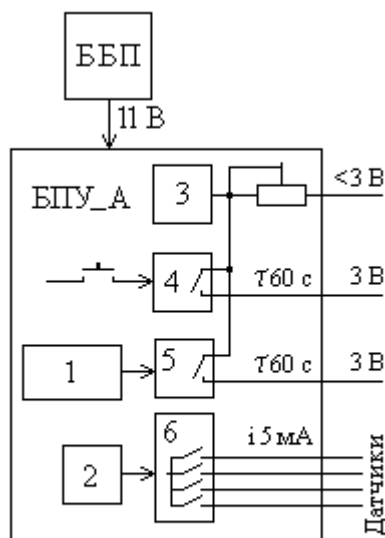


Рис. 5.3

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.

Магнитовариационные станции с фотозаписью обычно располагаются в затемненной кабине вариационного павильона. Лампа освещения с темно-красным светофильтром включается во время смены лент на барабане фоторегистратора.

Для обеспечения работы станции используется специализированный блок питания и управления БПУ_А (рис. 5.3), в состав которого входят следующие узлы: источник регулируемого стабилизированного питания осветителя (3), стабилизированный источник тока калибровки (2), ручной или автоматический коммутатор цепей градуировки вариометров (6), кварцевые часы (1), схема формирования часовых марок времени (5) и марок абсолютных наблюдений (4).

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 обычно производят ежеквартально и после каждой регулировки вариометров.

5.1.2. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем НВС

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 магнитоэлектрических вариометров. Поэтому вариометры Б.Е. Брюнелли (1958 г.) и Н.Ф. Кротевича (1966 г.) из-за непрерывного дрейфа выходного напряжения не менее 2 нТл/час предназначались для регистрации только короткопериодных вариаций геомагнитного поля. Но эти работы дали толчок в интенсивных поисках методов построения преобразователей 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 с применением 16-разрядных аналого-цифровых преобразователей (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.А. Нечаева, которая позднее была существенно доработана с целью повышения эксплуатационных характеристик и применения ее для создания цифровых станций на магнитных обсерваториях. Вариант станции НВС в комплекте с АЦП ADAM является дублирующей цифровой вариационной станцией Иркутской магнитной обсерватории.

В станции НВС каждый магнитоэлектрический датчик Боброва имеет дополнительные 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. Трех-щелевая диафрагма Ф-117, допускающая неопределенность в пяти устойчивых состояниях, заменена однооконной немагнитной маской.

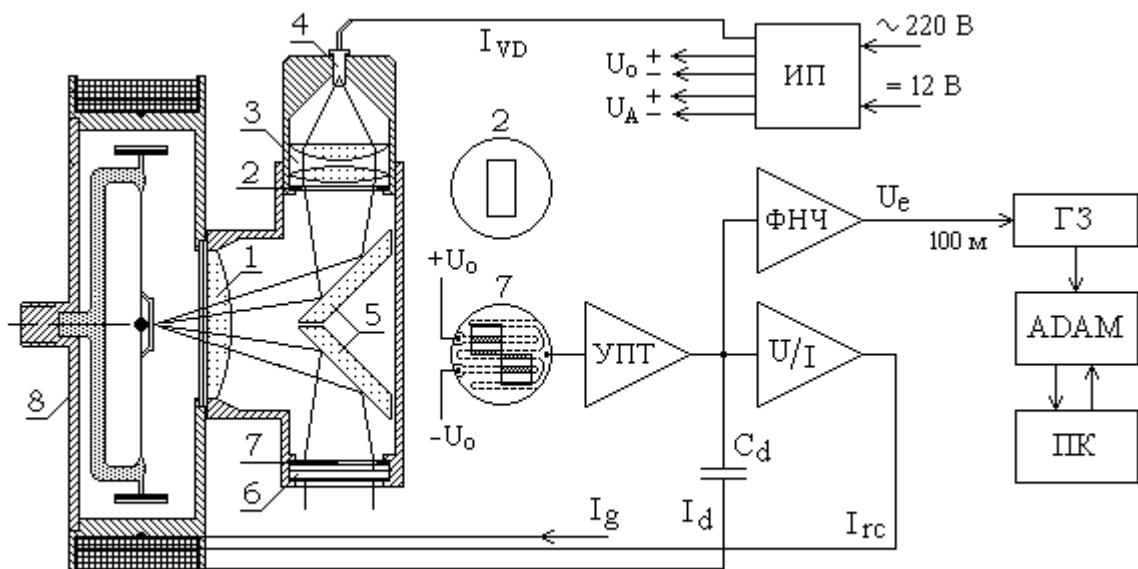


Рис. 5.4

Схема одного канала вариационной станции НВС представлена на рис 5.4. Светодиод желтого свечения КИПД21П-Ж (4) с помощью конденсатора (3) освещает окно диафрагмы (2). Световой поток отражается от системы зеркал (5) и зеркала чувствительного магнита вариометра (8). Объектив (1) формирует изображение диафрагмы на двухоконной

маске (7) дифференциального фоторезистора ФСК-7б (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:

$$G_p = (2U_o/h) \cdot (1 - g_{\bullet}/g_*), \quad (5.24)$$

где: g_{\bullet} – проводимость затемненной части фоторезистора,

g_* – проводимость освещенной части фоторезистора.

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 $x = 2\Delta\theta$

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 :

$$dU_x = G_x$$

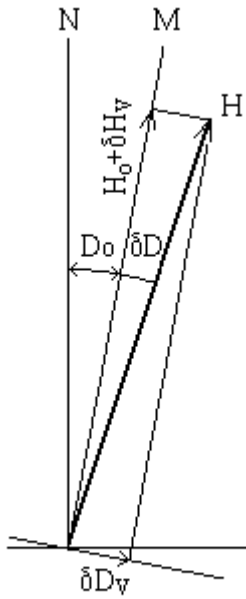


Рис. 5.5

5.1.3. Магнитовариационная станция с фотопреобразователем Кварц-ЗЕМ

Цифровая вариационная станция Кварц-ЗЕМ была разработана на базе кварцевых магнитоэлектрических датчиков Ю.А. Бурцева – Б.А. Белова. Они отличаются от вариометров Боброва применением уголкового зеркального отражателя (рис. 5.4), который позволяет

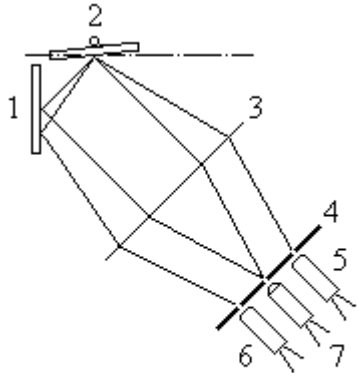


Рис. 5.6

исключить влияние на нестабильность базисных уровней температурных 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 $4\Delta\theta$ 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. Следует отметить, 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 мощной электрической или магнитной помехи. Для сохранения однозначности положения магнита, в корпусе датчика размещена специальная катушка, в которую при настройке вариометра на короткое время подается ток начальной установки магнита. Фотопреобразователи в вариометрах станции «Кварц» выполнены на светодиодах и фотодиодах инфракрасного диапазона излучения с вентильным режимом работы фотодиодов.

Цифровая вариационная станция «Кварц-ЗЕМ» 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 данной станции не производится.

Фотодиоды соединены встречно-параллельно и подключены к входам прецизионного операционного усилителя сигнала фотоголовки. После двухкаскадного усиления сигнал поступает на преобразователь напряжение/ток катушки обратной связи. Датчик Бурцева-Белова имеет одну катушку обратной связи (L_1 рис. 5.5) 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 схемы:

$$U_{od} \approx [1 + j\omega C_1$$

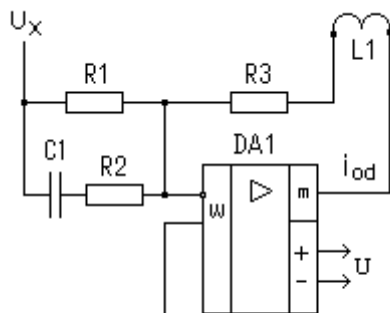


Рис. 5.7

ствуется 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 и каждую минуту передаются в блок накопления данных..

Блок сбора и накопления данных DATALOGGER среднeminутные значения записывает в твердотельную память объемом 64 Кб, что позволяет работать станции около 60 часов без перезаписи накопленной информации в память персональной машины. В данном блоке имеются кварцевые часы с ручной установкой даты, 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 блока 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 оказалось возможным применять на магнитных обсерваториях в качестве трехкомпонентных вариометров. Устройство и принцип работы феррозондовых магнитометров были рассмотрены 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 этих колец очень высоки для обеспечения максимальной ортогональности их магнитных осей и минимального температурного коэффициента. Источник тока компенсации должен обеспечивать нестабильность 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. В отличие от магнитостатических датчиков, феррозондовые вариометры предъявляют повышенные требования к стабильности положения приборных фундаментов, т.к. смещения магнитных осей датчиков не должны превышать единиц угловых секунд в год. Если феррозондовый вариометр имеет дрейф базисных уровней несколько десятков нТл в год из-за сезонных отклонений постаментов, то рядом с таким вариометром рекомендуется 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 постаментов (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 дополнительно проверяется контролем сохранения 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 в этом месте. При отключенной цепи компенсации Y -датчика следует найти такое положение блока датчиков, при котором канал Y покажет на выходе ожидаемое значение поля. Это положение блока датчиков необходимо зафиксировать на постаменте. Теперь следует произвести компенсацию компоненты X геомагнитного поля по нулевым показаниям соответствующего канала. Значения базисных уровней X_0 , Y_0 , Z_0 определяются расчетным путем с помощью абсолютных наблюдений.

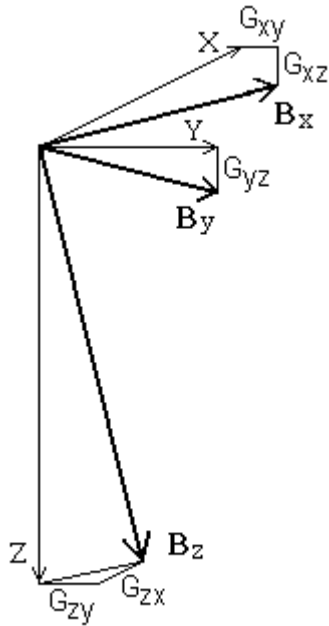


Рис. 5.8

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 феррозондового деклинометра. Датчик X в этом положении блока датчиков 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. 5.8 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. Тогда можно записать следующие формулы, определяющие результат измерений компонент геомагнитного поля:

$$B_x = G_x$$

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 выходу блока подключается многоканальный 16-разрядный 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.

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. Магнитовариационная 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 , наклона I и полной величины F индукции геомагнитного поля. Вариационная станция Олдриджа не получила широкого распространения из-за применения в ней сложной колечной системы и дорогостоящей электронной техники обработки и регистрации данных цифровыми магнитофонами.

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 постаментами. Поэтому протонный магнитометр обычно размещается в вариационном павильоне на удалении 4-5 м от цифровых вариационных станций. 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:

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

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 постаментта. 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 (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 с горизонталью и с целью 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

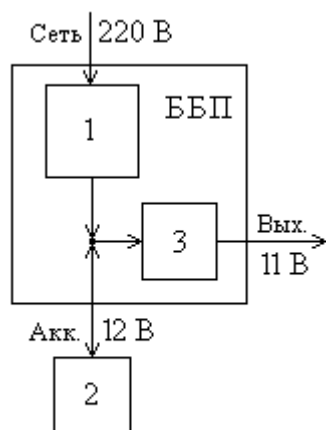


Рис. 5.8

в вариационном павильоне должна подключаться к блоку бесперебойного питания ББП, который может находиться непосредственно в помещении вариационного павильона, если оно имеет общую площадь более 60 м², либо находиться в отдельном здании, предназначенном для электрооборудования. Помещение с аккумуляторами должно иметь вентиляцию. Простой и достаточно надежный вариант ББП (рис. 5.7) 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 проще в обслуживании, но их нужно размещать на значительном удалении от вариационного павильона из-за их магнитности. Кислотные аккумуляторы немагнитные и обладают хорошей вольт-амперной характеристикой, но долговечность их меньше щелочных и в значительной степени зависит от качества обслуживания и режима подзарядки. 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 со-

единения 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.

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 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. Желательно 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 строительно-ремонтных работ вариационного павильона. 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 регистрируемых вариаций 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 становятся известными базисные значения фикс-линий на магнитограмме аналоговых станций или компонентных значений геомагнитного поля при нулевых напряжениях на выходах вариометров цифровых станций. Поэтому результаты абсолютных наблюдений необходимо рассматривать совместно с данными вариационных станций.

Как указывалось выше, абсолютные магнитометры, вариометры и средства преобразования информации фактически объединены совместно со строительными конструкциями и территорией в 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 случайных 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 расчетных значений, неуравновешенность узлов относительно их осей вращения, износ рабочих поверхностей, сдвиг шкалы, намагниченность деталей прибора.

Постоянную систематическую погрешность абсолютного магнитометра исправляют путем введения соответствующих поправок «на прибор» и «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 нониусной шкалы, ошибок считывания шкал наблюдателем.

Случайная погрешность Δ_c является разностью между результатом единичного измерения A_i и математическим ожиданием результатов измерений $M(A)$. Как правило, случайные погрешности длинного ряда измерений имеют нормальный закон распределения и поэтому математическое ожидание представляет собой среднеарифметическое значение результатов измерений:

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

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 :

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

Оценка дисперсии d или среднеквадратического отклонения σ позволяют сравнивать между собой результаты наблюдений различными 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 необычное для обычных измерительных приборов 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 угловых секунд и деклинометрами/инклинометрами THEO-010A и LEMI-203 с ценой деления 1 угловая секунда. 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 приведены базисные значения вариометров двух цифровых станций. Первые 14 дней наблюдения проводились «грубыми» деклинометрами



FD, а последующие – точным деклинометром FD/I. Средние значения D_0 , измеренные разными приборами, совпадают для двух вариационных станций до десятой доли угловой минуты, т.е. в измерениях отсутствует систематическая ошибка. Оценка дисперсии наблюдений оказалась одного порядка и практиче-

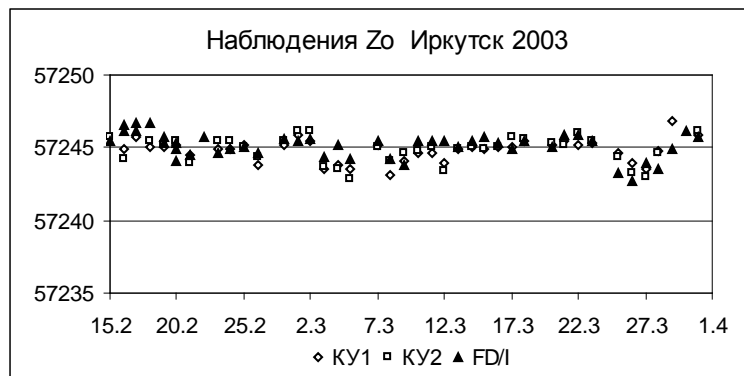
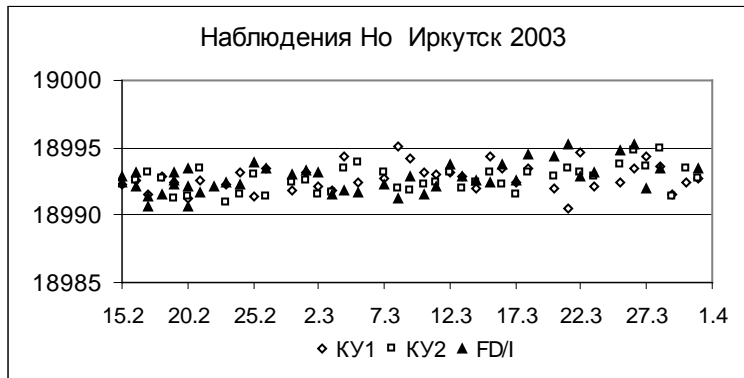
ски не зависит от разрешающей способности теодолитов. Следовательно, в результаты наблюдений разными деклинометрами в одинаковой степени входит составляющая случайной погрешности, которая превосходит инструментальные ошибки приборов. Погрешность каждого определения базисного уровня D -вариометра складывается 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 угловой минуты необходимо сохранять нивелировку магнитной оси феррозонда в пределах 2-3 угловых 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 переворотов теодолита на 180° в каждой серии наблюдений. Для измерений с погрешностью 0.1 угловой минуты уход нуля не должен превышать 0.5 нТл в геомагнитном поле Иркутска (см. п. 4.3.5). Вторым источником разброса данных являются погрешности наведения на мирю. Требования к взаимной стабильности положения мирю и точки наблюдения зависят от расстояния между ними, а точность наведения – от исполнения мишени мирю, атмосферных условий видимости и квалификации наблюдателя.

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

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

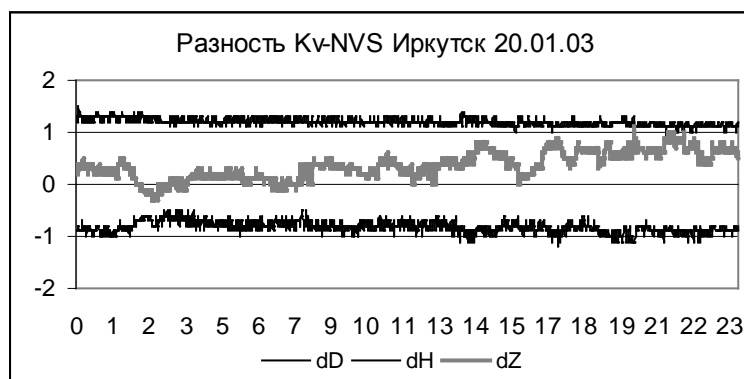
$$\sigma_m = \sigma/n^{1/2} = \{[\sum(x_i - m)^2]/n(n-1)\}^{1/2}$$

Эта формула подтверждает ранее сделанный вывод о том, что результирующую погрешность измерений можно снизить в $n^{1/2}$ раз, увеличив число наблюдений в n раз.



на коленной установке проще и реже допускаются грубые ошибки.

Расчеты возможных инструментальных погрешностей показывают, что точность измерений H и Z должна быть в пределах 1-2 нТл, склонения D – ± 0.4 угловой минуты. Следовательно, остальная часть погрешности определений базисных значений относится к погрешностям вариометров и к неточной временной привязке моментов абсолютных наблюдений и данных вариационных станций. Информация вариационных станций может быть искажена из-за неточной установки вариометров по магнитному или географическому меридиану, погрешностей определения коэффициентов преобразования и температурных коэффициентов вариометров, погрешности датчика температуры, дрейфовых шумов, нелинейности передаточной характеристики вариометров.



1.5 нТл независимо от возмущенности геомагнитного поля.

Существенное значение при регистрации иррегулярных возмущений имеет метод создания минутных значений вариаций поля из секундных данных. Обычно применяются цифровые фильтры Гаусса с набором весовых коэффициентов или берется среднее арифметическое значение за 60 с. На сравнительном графике представлены разности минутных данных магнитной бури, полученных от одного комплекта вариометров по двум разным

В Иркутске определения горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля производятся из наблюдений на феррозондовом инклинометре FDI, а также двумя методами KY1 и KY2 на коленной установке с протонным магнитометром. Из графиков абсолютных наблюдений разными инструментами, видно, что разброс наблюдаемых значений базисных уровней H_0 и Z_0 находится в пределах 5 нТл, а средние значения совпадают до десятых долей нанотеслы. Практика показывает, что любой вариант наблюдений не дает заметных преимуществ по точности измерений, т.к. сохраняется уровень погрешности, связанной с неточностью нивелировки магнитных осей инструментов. Можно лишь отметить, что наблюдения

Представление о шумах двух вариационных станций можно получить сравнением их минутных данных в магнитно-спокойные дни. Из представленного графика следует, что наибольшей амплитудой шумов сложного спектра обладают Z -датчики. Эти дрейфовые шумы, природа которых не совсем ясна, могут в течение различных суток менять амплитуду от 0.2 до

каналам, применяющих разные методы цифровой фильтрации и имеющих разные системные часы. Расхождение между минутными данными может достигать нескольких десятков нанотесл в зависимости от активности нерегулярных флуктуаций поля и точности датирования моментов цифровой регистрации вариаций. Отсюда следует, что совпадение по



времени абсолютных наблюдений с периодом повышенной магнитной активности вносит существенные дополнительные ошибки в определения 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).

Учитывая заметное влияние случайных погрешностей на магнитные измерения, нельзя принимать измеренные одиночные значения базисных уровней за безусловно истинную величину. Если составляющая случайных погрешностей абсолютных измерений близка к систематической погрешности магнитометров, то достаточно осуществлять контроль базисных уровней вариационных станций еженедельными абсолютными наблюдениями. В противном случае число наблюдений необходимо увеличивать вплоть до ежедневных. Статистика большого числа наблюдений позволит реализовать высокий класс применяемых магнитометров. Необходимое число наблюдений N для надежного определения среднемесячного значения базисных уровней вариометров можно оценить по формуле:

$$N = (M/m)^2,$$

где: M – реальная средняя квадратичная погрешность измерений,
 m – допустимая средняя квадратичная погрешность.

Если принять допустимую среднюю квадратичную погрешность измерений вертикальной компоненты Z в колечной установке $m = 0.5$ нТл, а средняя квадратичная ошибка измерений с учетом влияния случайных погрешностей составила $M = 2$ нТл, то за месяц нужно сделать не менее 16 наблюдений в колечной установке.

Итоговые результаты абсолютных наблюдений собираются в квартальные и годовые таблицы абсолютных наблюдений. Для примера в неполном виде представлена такая таблица 6.1 за первый квартал 2003 года.

Табл. 6.1

Магнитная обсерватория «Иркутск» ИСЗФ РАН								
Абсолютные измерения горизонтальной компоненты H								
Год 2003 Квартал 1								
Дата	H	Но_Kv	Но_nvs	Но-A	Прибор	Нач.	Конец	Наблюд.
1.01.03	19014.7	18994.5	18986.7	18941.3	КУ1	00:13	00:16	Талалаев.
1.01.03	19012.1	18991.7	18983.7	18938.4	КУ2	00:16	00:21	Талалаев.
*****	*****	*****	*****	*****	****	****	****	
16.02.03	19002.2	18992.6	18984.5	18938.7	КУ1	00:10	00:13	Бычкова
16.02.03	19002.5	18992.6	18984.5	18938.8	КУ2	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	КУ1	00:11	00:14	Вертипр.
31.03.03	18960.8	18992.7	18985.0	18938.5	КУ2	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 «Н» 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 Q кольца градуировки датчика.

Подобная колонка «D» имеется в квартальной таблице абсолютных наблюдений склонения, которая используется для проверки правильности установки магнитных осей вариометров. Если значения H_0 зависят от величины D ($H_0 = kD$), то следует перепроверить установку H -вариометра, магнитная ось которого должна быть перпендикулярна магнитному меридиану.

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

Раздельное определение среднеквартальных значений H_0 для различных магнитометров (в нашем случае применяется три метода наблюдений, - два на колечной установке и наблюдения на феррозондовом деклинометре/инклинометре FD/I), позволяет выявить появление систематической ошибки в одном из инструментов и своевременно 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.

Традиционно на магнитных обсерваториях базисные уровни определяются по результатам среднемесячных абсолютных наблюдений, вычисленных до десятой доли нТл или до десятой доли угловой минуты. Если на графике наблюдений наблюдается дрейф вариометра, то нужно попытаться выяснить причины тренда базисных значений. Иногда это удается (напр., дрейф связан с постепенным изменением температуры вариационного павильона) и тогда можно ввести в расчеты базисных значений дополнительные уточняющие коэффициенты. Сезонный дрейф может быть вызван неустойчивостью или остаточной магнитностью постаментов. Дрейф в виде иррегулярных колебаний можно связать с элементами усилителей или стабилизаторов электропитания. Чаще в таких случаях приходится интерполировать базисный уровень, понимая, что этой операцией вы можете увеличить погрешность измерений. Соблюдайте при этом правило, - никогда не доверяйте на все 100% одиночному абсолютному наблюдению. В последние годы распространилось мнение, что требования к стабильности вариометров можно снизить благодаря внедрению в практику обсерваторий высокоточных абсолютных магнитометров и возможностям математической обработки массивов цифровых данных с помощью персональных компьютеров. Действительно, мы можем частично уменьшить погрешность нестабильных вариометров, но при этом всегда рискуем ввести дополнительные ошибки линейной интерполяции.

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. Бывают экзотические случаи, когда заблудившийся ночью тракторист оставляет свою технику около стен вариационного павильона. Ориентировочную поправку к базисным значениям элементов на все время такого события можно ввести, используя амплитуды скачков в регистрируемых данных вариометров.

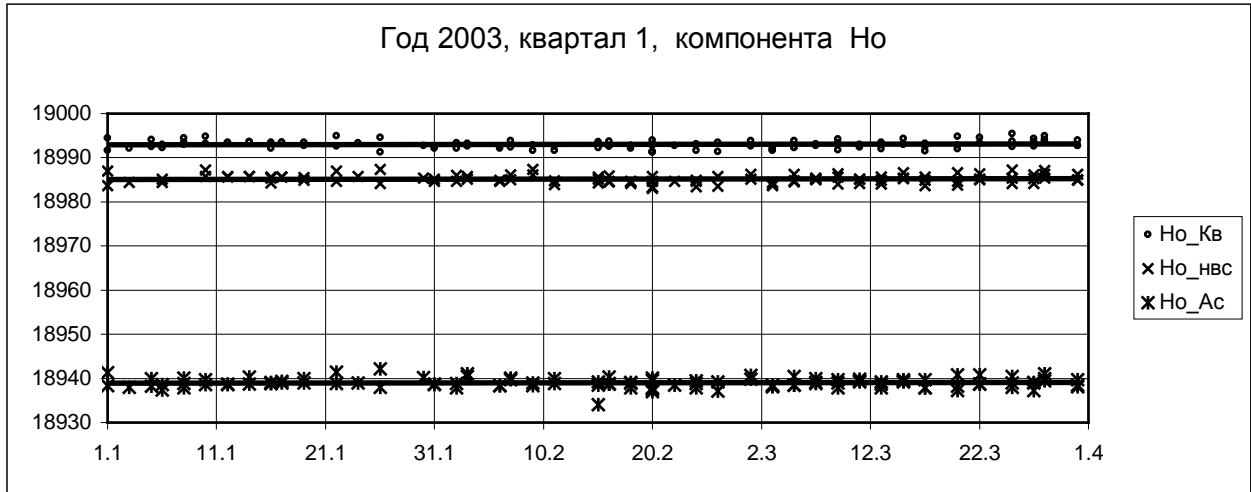
Любые неожиданные изменения базисных значений вариометров более 2 нТл, должны быть тщательно рассмотрены с целью выяснения причин таких отклонений, которые могут быть связаны с нарушением нормальной работы вариационных станций или неисправностями абсолютных магнитометров. Если изменения базисных значений 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 вариационным станциям, но скачек имеет 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 минутных данных, кончая среднегодовыми.

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

Квартальные таблицы сопровождаются графиками, которые наглядно демонстрируют качество наблюдений и стабильность работы вариационных станций. Пример такого графика представлен на рис. 6.1.

Рис. 6.1



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 выбраны правильно, то среднемесячное значение $\Delta F \approx 0$. Как правило, приходится более тщательно контролировать базисные уровни *Z*-вариометров, которые вносят больший вклад в значения *F* и больше зависят от температуры и нестабильности приборных фундаментов.

Графический материал квартального и годового файлов абсолютных наблюдений с точками наблюдений и принятыми базисными линиями рекомендуется печатать на цветном принтере и бумажные копии сохранять в архиве. Графики позволяют оперативно просматривать и восстановить проблемные моменты, связанные с обсерваторскими наблюдениями.

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

Состав стандартного проявителя N1:

1. Метол	1 г
2. Сульфит натрия кристаллический	26 г
3. Гидрохинон	5 г
4. Натрий углекислый безводный	20 г
5. Калий бромистый	1 г
6. Вода кипяченая	1000 см ³

Останавливающий раствор уксусной кислоты 1.5%

Состав закрепителя:

1. Гипосульфит	250 г	
2. Метабисульфит калия	25 г	(необязательный компонент)
3. Вода	1000 см ³	

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 гнедом в архивных шкафах.

Ординаты (значения вариаций в мм) снимаются палеткой (прозрачной мерной пластинкой) с точностью до 0.1 мм. Вариации в нТл вычисляются по формуле:

$$B_i = \varepsilon \cdot n_i + \mu \cdot (t_i - t_o) + B_o, \quad (6.1)$$

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

ε – цена деления вариометра, нТл/мм (или ‘/мм для D);

μ – температурный коэффициент вариометра

t_i – температура на момент времени T_i , °С;

t_o – температура приведения, °С;

B_o – 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: $t_i = \varepsilon_t \cdot n_i + t_{10}$, где t_{10} – 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:

$$\varepsilon = C \cdot I_k / n_k \text{ (нТл/мм)} \quad (6.2)$$

Для D -вариометра цена делений пересчитывается в угловые минуты на миллиметр по формуле:

$$\varepsilon_D = C \cdot I_k / n_k$$

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 корректируются только после производства соответствующих расчетов.

Для экономии объема памяти первичная информация обычно хранится в двоичном (бинарном) формате.

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 таблице 6.2.

Табл. 6.2

Время, сек.	0	±5	±10	±15	±20	±25	±30	±35	±40	±45
Коэффициенты K_i										
$N_{(мин.)} = \sum K_i N_{i(c)}$	0,12578865	0,11972085	0,10321785	0,08061140	0,05702885	0,03654680	0,02121585	0,01115655	0,00531440	0,00229315

Если протонная вариационная станция может производить измерения через каждые 5 сек., то к ее информации также применим рассмотренный 19-точечный метод цифровой фильтрации. При скважности измерений каждые 10 секунд возможен вариант 9-точечного фильтра Гаусса. Весовые коэффициенты представлены в таблице 6.3.

Табл. 6.3

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 в реальном времени позволяет быстро оценить возмущенность геомагнитного поля. Такая информация нужна перед проведением абсолютных наблюдений и спецработ по юстировке или сверке магнитометров. Кроме того, она позволяет своевременно проконтролировать появление помех промышленного характера, например, при въезде транспорта на территорию около павильонов или от проводимых работ внутри вариационного павильона. Наконец, можно своевременно обнаружить нарушения в системе сбора данных.

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 возмущенные дни из-за невысокой стабильности этих часов. Самый простой способ некоторого повышения точности 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;
- сложение данных с принятыми базисными значениями D_o, H_o, Z_o, T_o , или $X_o; Y_o, Z_o, T_o$;
- 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 минутных данных всех цифровых станций и разностей с данными абсолютных наблюдений, контроль разностей с выдачей результата на монитор;
- замену сбойных участков минутных данных основной вариационной станции на соответствующие данные дублирующей станции, ручную редакцию сбоев в данных;
- отправку данных по каналам связи.

Следует с большой осторожностью относиться к автоматическому вводу различных поправок, в том числе температурных, т.к. сбои в исходных данных для ввода поправок могут чрезвычайно исказить основные данные по вариациям геомагнитного поля.

Поправки на температуру вводятся по формуле:

$$dB(T) = dB + \mu$$

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 «basis.mag», в который внесены все основные константы цифровой 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.

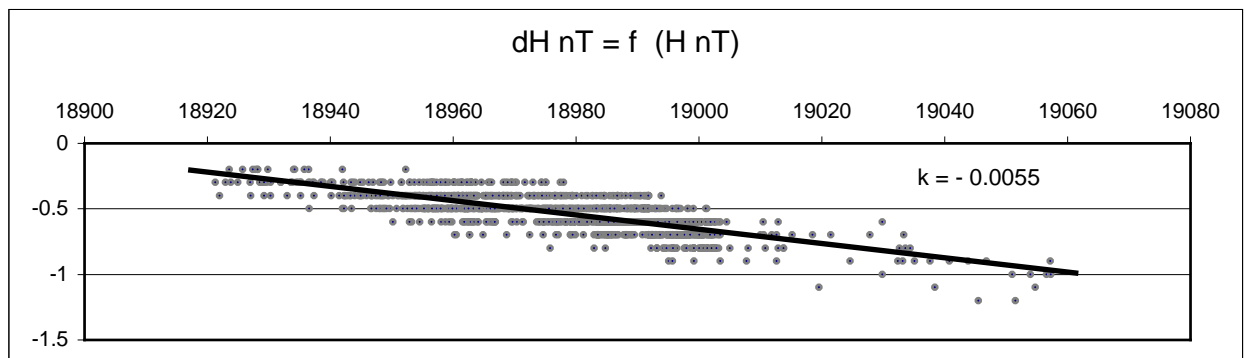
Программа стандартной подготовки и создания суточного файла минутных данных должна работать как в автоматическом режиме с последовательным выполнением всех операций, напр., по формулам (6.4...6.7), так и в ручном с пошаговыми процедурами обработки данных. Второй режим нужен при определении температурных коэффициентов вариометров, поправочных коэффициентов и коэффициентов преобразования (цен делений) вариометров. Причем, в программе следует предусмотреть защиту от случайного повторения этих операций.

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, то программа должна вывести предупреждение для оператора о появлении возможных сбойных значениях 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. Особое внимание следует уделить температурным каналам, т.к. их данные, в отличие от вариаций геомагнитного поля, могут не совпадать из-за размещения станций в различных кабинах или в разных вариационных павильонах. 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.

Рис. 6.2

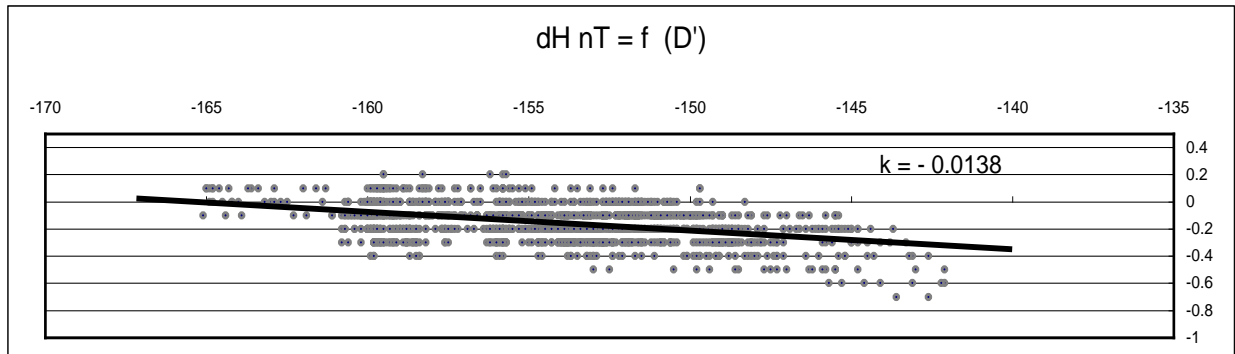


Минутные разности основной и дублирующей станций являются хорошим инструментом для контроля качества работы вариометров путем определения корреляционной зависимости ее от амплитуды вариаций. Например, из рисунка 6.2 можно сделать вывод о

неточном определении коэффициента преобразования H -вариометра одной из станций. Определить конкретный вариометр, который нуждается в проверке, можно с помощью третьей аналоговой вариационной станции или по абсолютным наблюдениям.

По второму графику (рис. 6.3), 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 на вариацию склонения, но лучше сделать переустановку вариометра. Если вариометры установлены по географическому меридиану, то в данные H одной из станций вводится не совсем точная поправка на вариацию склонения δD .

Рис. 6.3



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, дежурный наблюдатель обсерватории 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 программа пересылки данных может быть включена на автоматический режим передачи по каналам связи сразу после первичной подготовки данных. В этом случае предполагается, что проверка данных будет произведена позднее. Однако опыт показывает, что откладывание «на потом» процедур проверки нарушает ритм работы обсерватории, ухудшает качество данных и создает дополнительные проблемы при необходимости их редактирования.

Рекомендуется в программе редакторских изменений суточного файла минутных данных иметь 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 поля

Магнитная обсерватория должна иметь специализированные программы для определения K -индексов, создания среднечасовых и среднemesячных 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 трехбальная 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 десятибальной 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 Нимек. Шкала для трех обсерваторий представлена в табл. 6.4.

Табл. 6.4

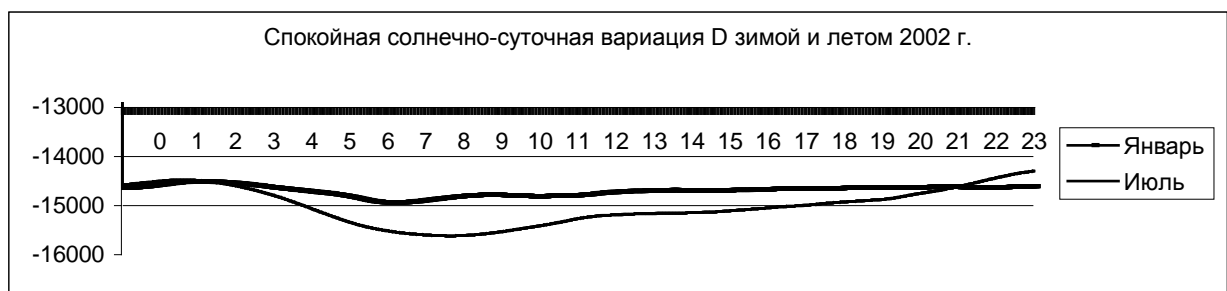
K – индекс	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нимек, Ирк. ΔB нТл	<5	<10	<20	<40	<70	<120	<200	<330	<500	≥ 500
Ташкент ΔB нТл	<3	<6	<12	<24	<40	<70	<120	<200	<300	≥ 300

В Иркутске во время бури 16.04.38 г. максимальная амплитуда вариаций ΔD составила 624 нТл, $\Delta H \geq 540$ 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 табл. 6.4 и трехчасовой разметкой. Палетка подводилась параллельно фикс-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. 6.4). Созданный файл спокойного суточного хода сохраняется под именем нулевого дня обрабатываемого месяца (напр., 020700.txt).

Рис. 6.4



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 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 приводим стандарт ИНТЕРМАГНЕТ для годовой таблицы K -индексов:

Табл. 6.5

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: $0_0, 1_-, 1_0, 1_+, 2_-, \dots, 8_+, 9_-, 9_0$. 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 во время бури. Для Иркутска эта характеристика представлена в таблице 6.6.

Табл. 6.6

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. В этих же таблицах производится подсчет среднесуточных и среднемесячных значений по всем дням, по пяти спокойным и пяти возмущенным дням, которые будут использованы для подсчетов среднегодовых значений всех компонент геомагнитного поля.

Пример среднечасовой таблицы, выполненный в традиционной отчетной форме, представлен в табл. 6.7.

Табл. 6.7

GEOMAGNETIC FIELD																
IRKUTSK IRT Latitude 52° 10' Longitude 104° 27'																
2002 June Full intensity in nanotesla 60200 + table value																
Day	Int	0	1	2	3	4	5	6	7	*	19	20	21	22	23	Mean
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
3	D	112	102	94	86	91	107	102	116	*	115	116	115	113	110	112
***		*****														***
28	Q	112	106	104	103	95	91	92	94	*	112	112	114	116	117	107
29		115	109	107	102	96	92	94	100	*	111	110	110	108	105	109
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 специальной программой производится переформатирование файлов таблиц. Проблема разных форматов, принятых у потребителей геофизической 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, в котором производятся вычисления всех остальных элементов геомагнитного поля:

° северной составляющей $X = H \cdot \cos D,$

° восточной составляющей $Y = H \cdot \sin D,$

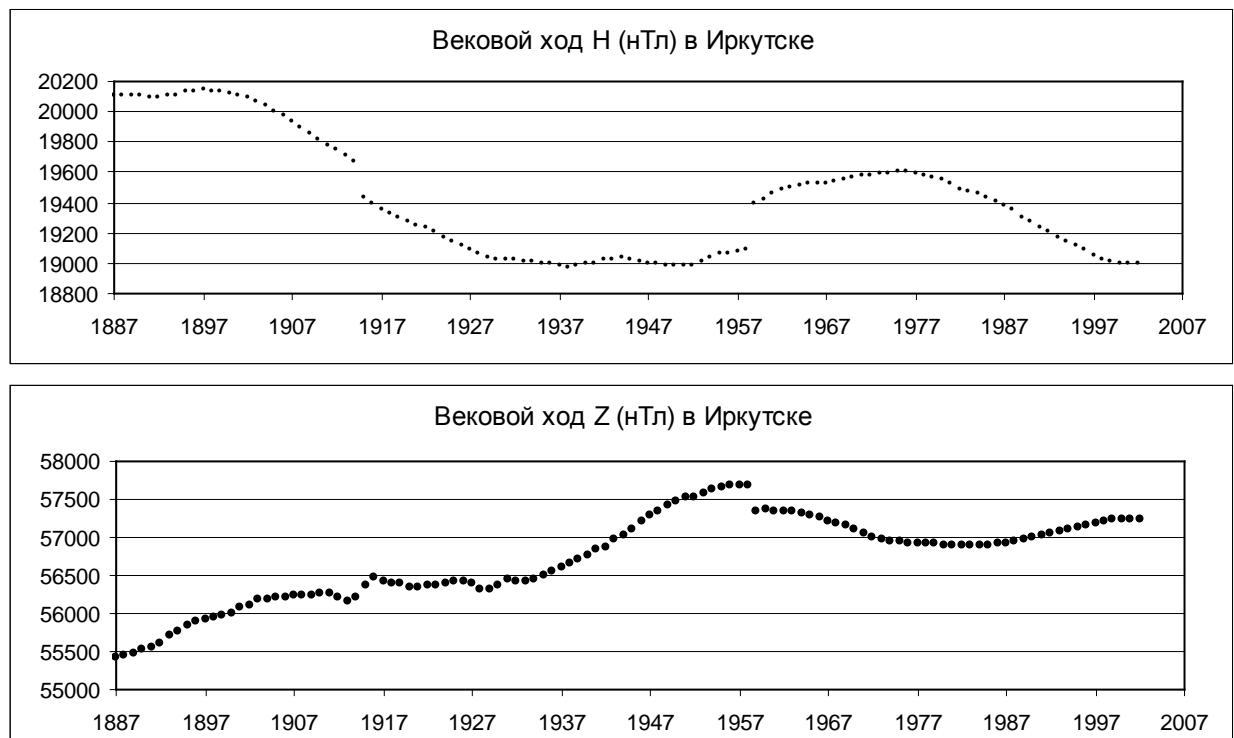
° наклона

$$I = (360/2\pi) \cdot \arctg(Z/H).$$

Среднемесячные значения элементов геомагнитного поля могут изменяться 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 наблюдались умеренные и большие бури.

На основании среднемесячных значений элементов по окончании года вычисляются их среднегодовые значения, которые заносятся в файл вековой вариации компонент геомагнитного поля в районе нахождения обсерватории. Так как вековая вариация обусловлена перемещением или изменением состояния больших масс 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. 6.5), несмотря на сжатый масштаб по оси ординат, можно видеть два скачка в данных, которые объясняются переносом места расположения обсерватории в 1914 и в 1959 годах. Перенос наблюдений был вызван увеличением уровня воздействия промышленных помех на работу магнитометров.

Рис 6.5



Как уже отмечалось выше, всю информацию по состоянию геомагнитного поля Земли обсерватории готовят на основе минутных данных вариационных станций. Ошибки в определении базисных уровней напрямую вносятся во все выходные данные, кроме данных по K -индексам. Поэтому вывод базисных уровней по результатам абсолютных наблюдений является одним из самых ответственных этапов в обсерваторских наблюдениях.

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

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 опыт показывает, что на многих обсерваториях утеряны первичные материалы по магнитной съемке территории, примененным строительным материалам, астрономическим наблюдениям миры. Отсутствие такой информации не позволяет провести анализ изменения магнитной обстановки на обсерватории по результатам 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 стремительно изменяется, меняются языки программного обеспечения. Еще недавно массивы цифровых данных сохранялись на магнитных лентах и перфолентах, которые сейчас уже практически недоступны чтению. 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 машин и частично на оптических дисках CD-ROM. Но на сегодняшний день четкой системы архивного дела еще не выработано.

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. Этот компьютер должен использоваться для ежедневной обработки данных, подготовки и копирования архивных материалов.
- В архивном помещении обсерватории необходимо иметь металлический сейф с отделениями по годам для хранения дисков CD и дискет.
- Первичные данные в двоичном формате (без констант вариометров) и файлы обработки абсолютных наблюдений можно сохранять на дискетах сроком до двух лет.
- Сжатые суточные файлы «секундных» данных магнитных бурь объемом около 40 Мб и суточные файлы минутных данных за все дни года двух цифровых вариационных станций объемом около 12 Мб следует записывать на компакт-диски CD-R в текстовом (кодировка DOS ASCII-866) или бинарном виде. В качестве приложения на этих дисках должен находиться тот минимум программного обеспечения, который позволит использовать данные и просматривать вариации 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 квартальных отчетных материалов (таблицы наблюдений базисных уровней вариометров, среднечасовые таблицы и K -индексы) общим объемом около 200 Кб можно хранить на дисках совместно с минутными данными.

- Файлы итоговых годовых материалов после окончательной редакции, предназначенных для отправки в центры сбора данных должны собираться на отдельном компакт-диске.
- Файлы с итоговыми результатами контроля и анализа наблюдений, измерения констант вариометров и абсолютных магнитометров, определений азимута мира и градиентов между наблюдательными столбами можно хранить на дисках CD-R или на дискетах, а все графические материалы необходимо копировать на бумажные носители. Материалы обсерватории в графической форме очень удобны для быстрого просмотра и отбора необходимых сведений.
- Текстовые отчетные материалы лучше хранить на бумажных носителях, которые обычно подписываются руководством обсерватории или головной организации.
- Окончательные данные Российских обсерваторий следует отправлять в МЦД-Б2 по адресу Москва, ул. Молодежная, 3 stpftp@zeus.wdcb.ru Наш Центр сбора геофизической информации готов принять на хранение любые материалы обсерваторий в цифровом виде.
- Архивом должен заниматься очень ответственный и аккуратный сотрудник обсерватории, через которого должны проходить все материалы обсерватории. У него должны находиться 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 в информации 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 связи минутные данные вариаций геомагнитного поля с интервалами 12 и 60 минут. Проект ИНТЕРМАГНЕТ был признан Исполнительным комитетом IAGA с рекомендацией расширения глобальной сети цифровых магнитных обсерваторий. Число обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ с каждым годом увеличивается и в настоящее время 85 обсерваторий 32-х стран через спутники или ежедневно по компьютерным и телефонным сетям передают данные в центры сбора геомагнитной информации GIN. При сборе данных через спутники информация каждый час или чаще передается в специальном формате на ближайший геостационарный метеорологический спутник, который переправляет данные в GIN. Многие обсерватории для передачи минутных данных с максимальной задержкой в 72 часа используют электронную почту.

Окончательная информация с каждой обсерватории, входящей в сеть ИНТЕРМАГНЕТ, в виде минутных данных с уточненными базисными значениями, среднечасовыми и среднегодовыми таблицами, таблицами *K*-индексов ежегодно оформляется в виде диска CD-ROM. Такие диски с данными всей сети ИНТЕРМАГНЕТ распространяются среди участников проекта.

ИНТЕРМАГНЕТ стремится поддерживать строгие требования по качеству данных, предполагая, что каждая обсерватория имеет цифровые вариационные станции, современные магнитометры, обеспечена точным временем и осуществляет тщательную проверку данных в автоматическом и ручном режимах.

Магнитная обсерватория сети ИНТЕРМАГНЕТ (ИМО) должна проводить регулярные абсолютные измерения (не реже одного раза в неделю) и обеспечивать одноминутные цифровые данные вариаций трех компонент геомагнитного поля с разрешающей способностью 0.1 нТл. Такую и более высокую разрешающую способность (до 0.01 нТл) имеют все современные протонные прецессионные магнитометры. Компонентные инструменты на базе протонных магнитометров также имеют разрешающую способность 0.1 нТл, но погрешность измерений увеличивается в 3-5 раз по сравнению с паспортными данными протонного магнитометра (см. раздел 4.2). Примерно такую же компонентную погрешность обеспечивают феррозондовые инклинометры. Склонение обычно измеряется в угловых единицах и тогда соответствующая цена деления лимба теодолита должна иметь 4 угл. сек. для обсерваторий северных широт и 1 угл. сек. для южных широт.

С помощью абсолютных наблюдений ИМО должны обеспечивать погрешность определения базисных уровней вариометров в пределах ± 5 нТл. Если выполнены необходимые требования к территории, павильонам и приборным постаментам магнитной обсерватории (см. п. 3), то базисные уровни вариометров с помощью современных абсолютных магнитометров можно уверенно контролировать с погрешностью ± 0.5 нТл.

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/°С
- Дрейф базисных уровней 5 нТл/год

Два последних требования в значительной мере зависят от качества изготовления вариометров, состояния приборного постаментов, стабильности грунтов и немагнитности вариационного павильона.

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 5 с/мес.
- Спутниковая связь ± 1 с

Это требование на обсерваториях не везде легко выполнимо, т.к. часто программное обеспечение цифровых вариационных станций использует компьютерное время, не обладающее столь высокой стабильностью.

Остальные требования ИНТЕРМАГНЕТ в основном касаются отправляемых в GIN форматов данных, которые детально изложены в соответствующем техническом руководстве - INTERMAGNET Technical Reference Manual.

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 наклонения 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.: Гидрометеиздат, 1946.
- Скротский Г.В., Степанов А.П., Стоцкий В.М., Филатов А.И. Применение дираммической поляризации ядер для увеличения чувствительности и быстродействия ядерных прецизионных 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.

