

## МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ОБСЕРВАТОРИЯХ И ПУНКТАХ ВЕКОВОГО ХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ТЕОДОЛИТОВ

**А.В. Ладынин, А.Ф. Павлов\*, А.А. Попова, Н.Н. Семаков, С.Ю. Хомутов\***

*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

*\* Геофизическая служба СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Пространственно-временная структура вековых вариаций геомагнитного поля не оценивается с необходимой детальностью по данным магнитных спутниковых измерений из-за недостаточного учета данных магнитных обсерваторий. Так как их сеть в Сибири и на Дальнем Востоке очень редкая, необходимо восстановить программу регулярных повторных измерений на пунктах векового хода (ПВХ). Предложена методика векторных измерений на таких пунктах комплектами феррозондового теодолита и протонного магнитометра. Она разработана путем анализа источников погрешностей векторных магнитных измерений и имитационного моделирования вариационных наблюдений (пять обсерваторий вокруг Новосибирска). Выбран эффективный способ приведения среднесуточных значений элементов поля в ПВХ к среднегодовым значениям путем интерполяции разностей между этими значениями в близких обсерваториях. Используя эту методику, можно возобновить измерения на ПВХ.

*Геомагнитное поле, вековые вариации, магнитные обсерватории, пункты векового хода, феррозондовые теодолиты, склонение, наклонение.*

---

## STUDIES OF GEOMAGNETIC SECULAR VARIATIONS AT OBSERVATORIES AND REPEAT STATIONS USING FLUXGATE THEODOLITES

**A.V. Ladynin, A.F. Pavlov, A.A. Popova, N.N. Semakov, and S.Yu. Khomutov**

Satellite measurements cannot provide the appropriate monitoring of spatial and temporal structure of geomagnetic secular variations as data from magnetic observatories are not properly taken into account. The regional network of magnetic observatories in Siberia and the Russian Far East being scarce, it is essential to resume systematic monitoring of the geomagnetic field at repeat stations (RS). We suggest a method of vector magnetic measurements at repeat stations using fluxgate theodolite-proton magnetometer sets. The method was developed based on the analysis of uncertainty in vector magnetic measurements and imitation simulation of data from five observatories near Novosibirsk. We chose an efficient way of reducing the RS daily mean values of field components to their annual mean values by interpolation of differences between these values in the neighbor observatories. The new method can be used for resuming geomagnetic monitoring at repeat stations.

*Geomagnetic field, secular variation, magnetic observatory, repeat station, fluxgate theodolite, declination, inclination*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Регулярный контроль геомагнитного поля (ГМП) выполняется по данным непрерывной регистрации его элементов на магнитных обсерваториях (МО). Там, где их сеть редка, производятся периодические (не реже чем через 5 лет) измерения на пунктах векового хода (ПВХ) или повторных станциях. Магнитные измерения со спутников, начатые 40 лет назад, породили надежду (как выясняется, не вполне обоснованную), что в изучении структуры ГМП и его вековых вариаций (ВВ) можно обойтись небольшим числом базовых МО, информация которых используется для учета ВВ при построении аналитических моделей ГМП (IGRF и др.). В конце 80-х и начале 90-х годов измерения на ПВХ Сибири, как и во многих других крупных регионах мира на повторных станциях (Repeat Stations, RS), были прекращены. Из публикаций материалов наиболее известного магнитного спутника Magsat [2—5], а также по результатам нашей работы [1] видно, что надежды на эффективную оценку ВВ по спутниковым данным не оправдываются. В 2000 г. после запуска спутника Oersted, а затем CHAMP, SAC/C (Oersted-2), началась новая спутниковая эпоха геомагнитных измерений. На этих спутниках установлены трехкомпонентные феррозондовые магнитометры и системы точной астроориентации, а также модульные OVN-магнитометры. Определенные надежды связываются с перспективой длительной (5 лет) работы последних двух спутников, но существенных результатов в части изучения ВВ пока не получено.

В работе [1] показано, что надежно исследовать пространственно-временную структуру ВВ по спутниковым данным путем сравнения регулярно повторяемых построений аналитических моделей ГМП, подобных IGRF, можно только при включении в базы данных этих моделей информации по достаточно

плотной сети МО. До настоящего времени для спутниковой магнитометрии задача изучения структуры ВВ не является приоритетной [4, 5]. Детальное изучение пространственно-временной структуры ВВ предполагает выявление и прослеживание движения локальных фокусов, которые могут быть обусловлены вихрями конвективных течений во внешнем ядре. С этими вихрями связывается формирование термохимических плюмов в слое  $D''$  нижней мантии у границы с ядром [6, 7]. Густота сети наблюдений должна позволить обнаруживать фокусы с размерами порядка расстояния между „горячими точками“ (зонами базальтового вулканизма, вызванного мантийными плюмами [6]). Средние расстояния между соседними МО Сибири превышают минимальные размеры фокусов вековых вариаций ГМП [2]. Недостаточно густой является сеть МО почти везде в мире, кроме Европы, Северной Америки и Японии. Неслучайно сеть около 200 МО дополнялась до 90-х годов регулярными измерениями на ПВХ и повторных станциях (в мире их число превышало 500, больше всего их было в Канаде, США и СССР, а наибольшая плотность сети RS была в Европе). Для изучения пространственно-временной структуры ВВ, в том числе для изучения фокусов ВВ, необходимо восстановить систему ПВХ в Сибири.

Вековые вариации ГМП определяются как изменения во времени среднегодовых значений его элементов. При обработке данных кратковременных измерений ВВ на ПВХ необходимо приведение их к среднегодовым значениям элементов ГМП по ближайшим МО, на которых по непрерывным записям значений элементов поля вычисляются среднечасовые, среднесуточные, а по ним среднегодовые их значения. На ПВХ такой возможности нет, так как срок наблюдений обычно составляет трое суток.

Ранее на территории Сибири использовались разные способы получения на ПВХ данных о ВВ в общей с МО системе. Данные ПВХ средних широт (при измерениях по схеме „утро—вечер“, когда минимальны  $S_q$ -вариации) приводились к „середине года“ путем введения поправок к значениям элементов ГМП в конкретные моменты измерения. Поправки вычислялись по данным ближайшей МО как разности среднегодовых значений этих элементов и их значений в эти моменты. Заложенное в данном способе предположение независимости вариаций от положения пункта наблюдений из-за больших расстояний между ПВХ не выполняется. Причина в том, что  $S_q$ -вариации синхронны на разных долготах по местному времени ( $LT$ ), а вариации типа „бухт“ — по мировому времени ( $UT$ ). Как показано в [8], погрешности такого способа приведения вдвое превышают ошибки измерений. Данные измерений на высокоширотных ПВХ вообще не приводились из-за крайней редкости МО в Заполярье. Эта процедура заменялась непрерывными в течение трех суток измерениями с интервалами 1/4 ч. Отличия полученных таким образом средних значений от среднегодовых были того же порядка, что и разности среднесуточных и среднегодовых значений элементов ГМП в МО [8].

Возобновление регулярных измерений элементов ГМП на ПВХ возможно с использованием комплектов феррозондовых теодолитов ( $DI$ -магнитометров, измерителей склонения и наклона) и протонных магнитометров. Мы предлагаем технологию, которая обеспечивает точность данных ПВХ, близкую к точности обсерваторских измерений в 90-годы в Сибири, с данными которых надо будет сравнивать новые данные в случае возобновления программы ПВХ. Критическое значение имеет точность измерения  $D$ , так как современные протонные магнитометры обеспечивают необходимую точность измерения  $T$  — модуля вектора магнитной индукции поля Земли.

Поскольку прекращение наблюдений на ПВХ было связано с перспективами исследований структуры ВВ по спутниковым измерениям, первой задачей нашей работы было выяснение реальных возможностей современных спутниковых методов оценки ВВ. Полученные результаты, обосновывающие необходимость возобновления регулярных измерений ГМП по системе МО и ПВХ, обсуждаются в [1], где показано, что, несмотря на совершенствование спутниковых методов магнитных измерений, для исследования ВВ необходимы, прежде всего, измерения на ПВХ. В данной работе, обосновывающей возможность выполнения этих измерений на новой технической и методической основе — с комплектами феррозондовых  $DI$ -теодолитов и протонных магнитометров, содержатся результаты решения следующих задач:

- оценки точности угловых элементов ГМП по измерениям на МО; на этой основе формулируются требования к точности измерений на ПВХ;
- выявления источников ошибок измерений  $D$  и  $I$  феррозондовыми теодолитами и выбор технологии измерений, позволяющей минимизировать эти ошибки;
- выбора оптимальной по точности и трудоемкости схемы измерений на ПВХ — распределения измерений во времени, расположения датчиков  $T$ ,  $D$  и  $I$  в пределах ПВХ;
- выбора способа приведения данных измерений на ПВХ к середине года;
- проверки методики на имитационной модели ПВХ Ключи и в полевых условиях.

Полевые исследования проводились в процессе геофизической практики студентов НГУ в Шире (Хакасия), где был создан пункт регулярных измерений ПВХ. Он расположен почти на середине расстояния от Новосибирска до Иркутска и дополняет систему МО и ПВХ в этом районе Сибири.

Мы старались в предлагаемой технологии измерений достичь достаточной точности с имеющейся в нашем распоряжении аппаратурой. Пополнение приборного парка современными феррозондовыми теодолитами и протонными магнитометрами, а также трехкомпонентными вариационными станциями, естественно, приведет к повышению точности и уменьшению трудоемкости измерений на ПВХ.

### ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПВХ

В методическом плане основные проблемы измерений элементов магнитного поля в ПВХ связаны с необходимостью учета суточных и других кратковременных вариаций ГМП и корректностью перехода от мгновенных значений элементов магнитного поля к среднегодовым.

Наиболее существенной проблемой в организации измерений в ПВХ на таких обширных территориях, как Сибирь и Дальний Восток, является оснащение экспедиционных групп магнитометрической аппаратурой. Стандартный набор основных приборов для проведения таких работ в настоящее время — это *DI*-магнитометр для измерения склонения и наклона и протонный магнитометр для измерения модуля магнитной индукции. Протонных магнитометров производится достаточно, но с приборами для измерений *D* и *I* положение много сложнее.

Феррозондовые теодолиты промышленность России не выпускает. Их мало и в других странах. Единственным производителем таких приборов обсерваторского класса является компания Bartington Instruments Ltd [9], использующая немагнитные теодолиты Theo фирмы Carl Zeiss Jena. На МО Ключи имеются три подобных *DI*-магнитометра. Два из них построены на базе теодолитов ЗТ2КП, имеющих погрешность измерения около 2", и один на базе немагнитного теодолита Theo020В — с отсчетной точностью около 5". В серийных теодолитах ЗТ2КП магнитные узлы заменены немагнитными. Приборы оснащены феррозондовыми измерителями, изготовленными на обсерватории [10]. В настоящее время многие российские МО оснащены *DI*-магнитометрами, но практически везде в одном экземпляре. Они применяются для определения базисных значений вариационных магнитометров, и их использование в экспедиционных работах, прерывающих обсерваторские наблюдения на полевой сезон, практически невозможно. Таким образом, существуют реальные сложности с укомплектованием программы измерений на ПВХ *DI*-магнитометрами обсерваторского класса.

В полевых *DI*-магнитометрах могут использоваться и менее точные теодолиты. Как и в обсерваторских приборах, основная проблема — магнитная чистота теодолитов. Как показывает опыт, теодолиты с невысокой (около 1') точностью измерений (ТТ-5, Т-30, 2Т30) удается сравнительно просто перебрать, заменив магнитные детали. Однако имеющиеся в нашем распоряжении более точные (0,1') теодолиты Т5А из-за конструктивной сложности переделать вне заводских условий практически невозможно, поэтому они обладают некоторой намагниченностью. При измерениях этими теодолитами выявлены девиационные эффекты — систематические разности между измеренными этими *DI*-магнитометрами значениями склонения *D* и наклона *I* и действительными их значениями.

Ниже показано, что возможно применение в измерениях на ПВХ даже таких теодолитов, если определить с необходимой точностью и учитывать девиационные эффекты. Они оцениваются в обсерваториях или ПВХ с известным магнитным полем путем сравнения с данными измерений немагнитными теодолитами.

Уровень точности, к которому следует стремиться при измерениях на ПВХ, это точность обсерваторских измерений. Ее оценка выполнена по данным измерений на пяти МО: Екатеринбург (Арти, код ARS по реестру IAGA), Алма-Ата (ААА), Новосибирск (Ключи, код NVS), Подкаменная Тунгуска (РОД), Иркутск (Патроны, код IRT) с 1 по 14 июля 1990 г. Это месяц обычных полевых работ и год последних наблюдений на сети ПВХ Сибири. Затем, по результатам имитационного моделирования измерений на ПВХ выбрана оптимальная схема процедуры измерений и приведения результатов к середине года. Роль ПВХ Ключи играла МО NVS, а материалы других обсерваторий были использованы для приведения результатов измерений на ПВХ к среднегодовым значениям МО. Приведенные значения в ПВХ Ключи сравнивались с реальными среднегодовыми значениями поля МО NVS.

Точность среднечасовых и среднесуточных значений элементов ГМП на пяти МО оценивалась методом конечных разностей. Допустим, вариация среднечасовых значений (например *T*) в течение суток описывается полиномом степени *n*, тогда в разностях порядка *n* + 1 регулярное изменение исключается. Остаются погрешности измерений, которые определяются по формуле:

$$\varepsilon \leq 1,2532 \Sigma |\delta^n T| / \sqrt{m \Sigma C_n^2},$$

где  $|\delta^n T|$  — модуль разности *n*-го порядка,  $\Sigma C_n^2$  — сумма квадратов биномиальных коэффициентов степени *n* (в нашем случае *n* = 8), *m* — число значений в суточной выборке (*m* = 24). Погрешности среднесуточных значений элементов ГМП ввиду случайного характера изменений этих значений в выборке 14 сут (1—

Таблица 1. Погрешности измерений ГМП на магнитных обсерваториях 1—14.07.1990 г.

Элемент	AAA	ARS	NVS	POD	IRT
$D$ , мин	0,14/0,18	0,32/0,40	0,27/0,34	0,40/0,50	0,23/0,29
$I$ , мин	0,09/0,11	0,13/0,16	0,12/0,15	0,15/0,19	0,12/0,15
$T$ , нТл	1,1/1,3	1,1/1,4	1,0/1,3	1,1/1,4	1,1/1,3

14 июля) оценивались как стандартные отклонения. В табл. 1 приведены значения этих погрешностей по пяти МО и трем элементам поля для степени полинома  $n = 8$ . Первое число — погрешность среднечасовых значений, второе — среднесуточных.

Из таблицы следует: чтобы измерения на ПВХ были близки по точности к данным МО 1990 г., нужно измерять элементы ГМП с погрешностью (не более):  $T$  — 1,5 нТл,  $D$  — 0,4' и  $I$  — 0,15'.

### ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФЕРРОЗОНДОВЫМИ ТЕОДОЛИТАМИ

Феррозондовый теодолит ( $DI$ -fluxgate,  $DI$ -магнитометр) представляет собой не имеющий магнитных деталей геодезический теодолит с установленным на его трубе датчиком феррозонда, работающего по схеме второй гармоники, и электронный блок регистрации [9, 10]. Измерения выполняются нулевым методом. Электронный блок фиксирует положения оси датчика, перпендикулярные вектору магнитной индукции  $T$ : при горизонтальном положении трубы и датчика фиксируется направление магнитного меридиана, в вертикальной плоскости магнитного меридиана определяется наклонение.

Имеется восемь таких нулевых положений: четыре при определении склонения (датчик над и под трубой, ориентированной на восток или запад) и четыре при измерении наклонения (объектив к северу или к югу при положениях датчика над или под трубой). Полная схема из восьми измерений является стандартной для МО и позволяет устранить влияние несовпадения осей датчика и теодолита и погрешности юстировки теодолита.

Для ускорения процедуры вариационных измерений, как показано ниже, можно ограничиться одним отсчетом на каждый измеряемый элемент поля, для чего нужно знать ориентационные поправки к отсчетам феррозондовых теодолитов при измерениях склонения и наклонения в избранных положениях (датчика по отношению к трубе и ориентировки трубы). Они определяются в результате измерений по полной схеме. Эти положения выбираются по критерию минимума значений поправок.

Измерения вектора магнитной индукции  $T$  сводятся к измерению трех его элементов (компонент), по которым можно полностью определить вектор и вычислить другие его компоненты. При использовании феррозондовых теодолитов — измерителей склонения  $D$  и наклонения  $I$ , третьим элементом является модуль  $T$  магнитной индукции, для измерения которого используется протонный магнитометр. В принципе измерения должны проводиться в одной точке и одновременно. Но угловые элементы и  $T$  измеряются разными приборами, и встает вопрос точности совмещения датчиков.

При векторных магнитных измерениях в каждой точке требуется фиксировать направление географического меридиана для определения склонения  $D$  — угла между географическим и магнитным меридианами. Это достигается астрономическими наблюдениями Солнца для определения географического азимута мира (удаленного ориентира) или измерениями плановых координат ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ) GPS-приемниками. Чтобы обеспечить точность порядка 0,4', требуется, в зависимости от точности теодолита, от 3 до 10 циклов измерений. Если погрешность GPS-координат составляет около 3 м, то заданную точность азимута получаем при расстоянии пункт — мира около 5 км.

Протонные магнитометры обеспечивают необходимую точность (порядка 1 нТл) измерений модуля  $T$  магнитной индукции, так что дальше речь пойдет только об угловых измерениях.

Чувствительность датчиков наших феррозондовых теодолитов позволяет измерять склонение и наклонение с точностью до 2'', что много меньше значимых при изучении ВВ изменений этих элементов. Источниками погрешностей угловых измерений  $DI$ -магнитометрами являются:

- несовпадение оси феррозонда и оптической оси теодолита,
- неполная магнитная чистота феррозондового теодолита,
- погрешности измерения углов, зависящие от типа теодолита.

Ось феррозондового датчика, в принципе, не может совпадать с оптической осью теодолита. Датчик крепится на зрительной трубе, и его положение характеризуется:

- величинами смещения геометрического центра феррозонда от оптического центра трубы в вертикальной плоскости вращения вдоль ( $l$ ) и поперек ( $d$ ) оптической оси и в горизонтальной плоскости ( $f$ );
- углами  $\alpha$  и  $\beta$ , которые ось феррозонда составляет с оптической осью трубы теодолита соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Смещения  $l$ ,  $d$  и  $f$  не влияют на результаты измерений углов склонения  $D$  и наклона  $I$ , если углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны нулю. Они имеют значение, если  $\alpha$  и  $\beta$  больше  $5^\circ$ .

Оценим влияние несовпадения оси датчика и оптической оси теодолита. Примем вертикальный угол  $\alpha$  между оптической осью трубы и осью феррозонда положительным при отклонении вверх конца феррозонда, направленного к объективу трубы, а горизонтальный угол  $\beta$  между этими осями положительным при отклонении этого же конца феррозонда от оси теодолита вправо, в сторону положительных углов на горизонтальном круге теодолита. При измерении  $D$  труба теодолита устанавливается горизонтально (будем пренебрегать погрешностями юстировки самого теодолита), чтобы исключить влияние на феррозонд вертикальной компоненты магнитного поля  $Z$ . Но при  $\alpha \neq 0$  влияние  $Z$  остается. При измерении нулевым методом феррозонд устанавливается перпендикулярно вектору магнитной индукции  $\mathbf{T}$  — в горизонтальной плоскости, когда измеряется  $D$ , и в вертикальной плоскости магнитного меридиана, когда измеряется  $I$ . Из-за погрешностей установки феррозонда (углов  $\alpha$  и  $\beta$ ) эти установки точно не реализуются. При измерениях  $D$  угол  $\beta$  непосредственно входит как систематическая ошибка, а по причине отклонения феррозонда от горизонтального положения ( $\alpha$ ) на него влияет вертикальная компонента магнитного поля  $Z$ , так что теодолит фиксирует вместо  $D + \pi/2$  угол  $D + \pi/2 \pm (\beta + \alpha Z/T)$ . Аналогично, при измерениях  $I$  угол  $\alpha$  непосредственно искажает результат, а при  $\beta \neq 0$  — несовпадении плоскости вращения трубы теодолита с плоскостью магнитного меридиана — возникает эффект влияния горизонтальной составляющей поля  $H$ . Теодолит фиксирует угол  $I + \pi/2 \pm (\alpha + \beta H/T)$ . Итак, эффекты неточной юстировки феррозонда равны:

$$\delta D_{\text{оп}} = \pm (\beta + \alpha Z/T), \quad \delta I_{\text{оп}} = \pm (\alpha + \beta H/T). \quad (3)$$

Из формул (3) следует, что угол  $\alpha$  имеет большее влияние, чем  $\beta$ , так как обычно  $Z$  много больше  $H$  (например, в ПВХ Ширы  $Z/H = 3,5$ ). Поэтому положение феррозонда относительно трубы теодолита в вертикальной плоскости требует более строгой юстировки, чем в горизонтальной плоскости, тем более, что в принятом способе крепления феррозонда к трубе сбоку ошибка установки  $\beta$  обычно мала. Зависимость ориентационных поправок от соотношения горизонтальной и вертикальной компонент поля, т. е. от  $I$ , означает, что поправки могут быть различными, например, в разных точках съемки на железорудных месторождениях. При изучении временных вариаций геомагнитного поля в одном ПВХ это не имеет значения, так как вариации много меньше значений компонент полного поля, соотношение которых почти постоянно.

Выбор типа теодолитов осуществляется по соответствию требованиям к точности измерения  $D$ . Эта величина более чувствительна, чем  $I$ , к погрешностям юстировки теодолитов, влиянию углов несоосности феррозонда и оптической трубы, отчего погрешность измерения  $D$ , как правило, в 3 раза превышает погрешность измерения  $I$ .

При недостатке феррозондовых теодолитов для измерений в ПВХ может возникнуть дилемма: использовать магнитно-чистые приборы с невысокой точностью угловых измерений ( $1'$ ) или более точные ( $0,1'$ ), но с девиационными эффектами.

Мы сравнили теодолиты двух типов, имеющихся в нашем распоряжении: 2Т30 и Т5А. Теодолиты 2Т30 (у них магнитные детали заменены немагнитными) имеют цену наименьшего деления  $5'$ ; их точность около  $0,5 - 1'$ . Для измерений на ПВХ такие теодолиты недостаточно точны.

Теодолиты Т5А имеют цену деления  $0,5'$ , реальную точность отсчета  $0,1'$ . По этим показателям такие приборы вполне пригодны для измерений в ПВХ. В наших теодолитах Т5А определенные девиационные эффекты указывают на существование магнитных деталей. Их влияние можно исключить, если с необходимой точностью оценить значения девиационных поправок. Эта работа выполнена путем одновременных измерений известных значений  $D$  и  $I$  в МО NVS немагнитными обсерваторскими и нашими теодолитами Т5А.

Среднеквадратические ошибки единичного определения девиационных поправок не превысили  $1,5'$ , а погрешность среднего из 8—10-кратных определений составила  $0,5'$ . Возможность использования в измерениях на ПВХ таких теодолитов подтверждена данными определений девиационных поправок на ПВХ Ширы. Значения элементов ГМП, особенно  $T$ , на ПВХ Ширы существенно отличаются от их значений в МО NVS:  $D = 5,3^\circ$ ,  $I = 73,4^\circ$ ,  $T = 60\,600$  нТл и  $D = 8,7^\circ$ ,  $I = 73,5^\circ$ ,  $T = 59\,300$  нТл соответственно, а значения девиационных поправок близки в пределах погрешностей.

Влияния изменений температуры на результаты измерений феррозондовыми теодолитами в реальном диапазоне летних температур от  $0$  до  $40^\circ\text{C}$  не обнаружено. Тем не менее при измерениях в солнечную погоду ПВХ накрывают тентом, во избежание деформаций теодолита из-за его нагрева Солнцем и смещения уровней.

## ВЫБОР СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПВХ

При наблюдениях на ПВХ каждое определение полного вектора  $T$  должно быть отнесено к одному моменту времени и одной точке пространства. Но измерения  $D$ ,  $I$ ,  $T$  выполняются последовательно и с использованием нескольких приборов ( $DI$ - и протонный магнитометры). Возможны различные схемы:

- а) измерять элементы поля в одной точке, последовательно меняя магнитометры;
- б) одновременно измерять три элемента поля в близко расположенных точках.

В случае (а) необходимо быть уверенным, что временные изменения поля малы или иметь возможность их контролировать, например, с помощью цифрового трехкомпонентного вариометра. Вариант (б) предполагает незначительность градиентов компонент поля между пунктами. Вариационные измерения с имеющимся у нас аппаратным комплексом показали предпочтительность второго способа. Он вполне реализуем, поскольку основным требованием к выбору положения ПВХ является однородность поля в ближайшей его окрестности, на расстояниях порядка 10 м. Подробное изучение поля вблизи ПВХ Ширы, на площадке 144 м<sup>2</sup> по сети 1 × 1 м, показало, что значения  $T$  различаются не более чем на 6 нТл. Удалось выбрать три точки для измерений  $T$ ,  $D$  и  $I$  (протонным магнитометром и двумя феррозондовыми теодолитами) с  $\Delta T \approx 1$  нТл.

**Схемы размещения точек измерений в ПВХ** выбирались из вариантов:

- а) в одной точке последовательно измеряются  $D$  и  $I$  феррозондовым теодолитом по полной программе (8 положений) и  $T$  протонным магнитометром;
- б) в двух из трех разнесенных точек на ПВХ, в которых значения  $T$  различаются не более чем на 2 нТл, по полной программе измеряется один угловой элемент ( $D$  или  $I$ ), а в третьей —  $T$ ;
- в) вариант, аналогичный б, но измерения  $D$  и  $I$  по полной программе выполняются как контрольные, через 2—3 ч, а все остальные — по сокращенной программе — один отсчет на измеряемый угловой элемент.

Выбор произведен на основе сравнения результатов измерений по разным схемам. Сравнивались данные векторных измерений в одной точке на столбе ПВХ Ширы и измерений в четырех точках (включая этот столб), значения элементов ГМП в которых не отличаются более чем на величины погрешностей измерений. В первом случае значения  $D$  обнаруживают разброс порядка  $\pm 1,8'$ , а разброс  $I$  составляет около  $\pm 0,6'$ . При измерениях в разнесенных точках разброс много меньше. Это объясняется дополнительными погрешностями, связанными в первом случае с переустановкой теодолита, тогда как во втором случае иногда, при измерениях по полной программе, лишь немного подправляются уровни.

Предпочтение отдано варианту в: при почти таком же уровне случайных погрешностей, как вариант б (оба удовлетворяют указанным выше требованиям), вариант в требует меньше затрат труда и удобнее для наблюдателей. Контрольные измерения по полной программе нужны для исключения систематических ошибок из-за ухода уровней теодолитов под действием ветровых вибраций и изменений температуры (даже если имеется защита). В варианте измерений по одному отсчету на измеряемый элемент важно избежать систематических ошибок из-за несовпадения осей феррозонда и трубы теодолита. Это достигается введением ориентационных поправок.

Ориентационные поправки определяются перед каждым циклом измерений из сравнения результатов измерений  $D$  и  $I$  по полной схеме и в одном фиксированном положении (ориентации теодолита и положения феррозонда по отношению к трубе — над или под ней). Сами эти фиксированные положения выбираются по принципу минимальности ориентационных поправок: принимается то положение, результаты в котором меньше других отличаются от среднего. Из-за неидеальной жесткости крепления феррозонда на трубе возможны его смещения вследствие вибраций при транспортировке, поэтому ориентационные поправки регулярно контролируются.

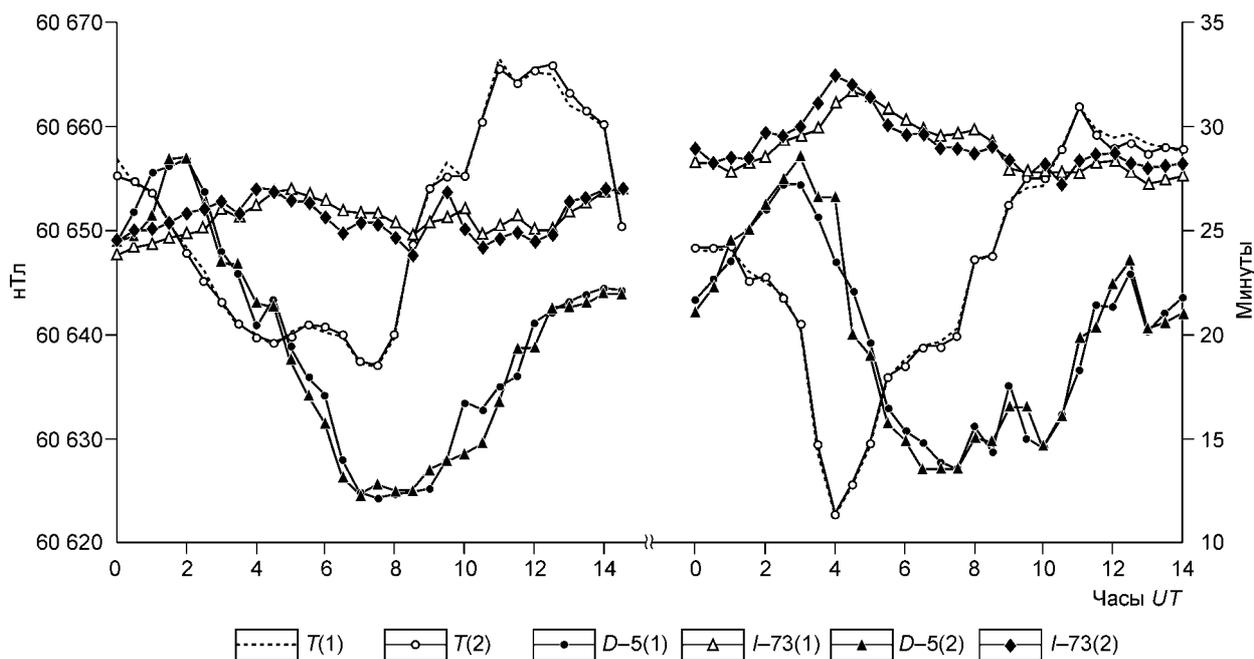
Для проверки схемы измерений в разнесенных точках 13—14 июля 2003 г. выполнены параллельные измерения вариаций ГМП в ПВХ Ширы двумя комплектами аппаратуры: первый — феррозондовый теодолит Т5А № 63895 и протонный магнитометр МПП-203, второй — феррозондовый теодолит Т5А № 63927 и квантовый магнитометр М-60. На рис. 1 приведены результаты этих измерений.

Заметим, что квантовый магнитометр М-60 не является абсолютным прибором, хотя точность относительных измерений им на порядок выше, чем МПП-203. Данные М-60 приведены к уровню данных протонного магнитометра МПП-203 по результатам сверки (по 60 синхронным измерениям).

Отсутствие систематических расхождений свидетельствует о хорошем исключении девиационных эффектов, а уровень случайных погрешностей соответствует указанным выше требованиям к точности измерений в ПВХ. Похожий результат получен при измерениях по схеме ПВХ вблизи МО Ключи; сравнение с данными обсерватории не выявили существенных систематических погрешностей измерений (они по всем элементам в 2—3 раза меньше случайных погрешностей).

Точность данных оценивается:

- а) по конечным разностям (8-го порядка)



**Рис. 1. Сравнение результатов измерений на ПВХ Шира двумя комплектами приборов 13—14.07.2003 г.**  
Кривые ( $D$  —  $5^\circ$ ), ( $I$  —  $73^\circ$ ) и  $T$ ; 1 и 2 — номера комплектов.

1 комплект (Т5А 63895 + ММП-203):  $\varepsilon D = 0,6'$ ,  $\varepsilon I = 0,3'$ ,  $\varepsilon T = 0,8$  нТл;

2 комплект (Т5А 63927 + М-60):  $\varepsilon D = 0,4'$ ,  $\varepsilon I = 0,2'$ ,  $\varepsilon T = 0,5$  нТл;

б) по разности данных двух комплектов:  $\varepsilon D = 0,7'$ ,  $\varepsilon I = 0,5'$ ,  $\varepsilon T = 0,4$  нТл.

Это практически удовлетворяет указанным выше требованиям.

Преимуществами избранного способа разнесенных точек вариационных измерений перед последовательными измерениями разных элементов поля в одной точке являются:

- возможность измерений с меньшим шагом по времени,
- более полная реализация высокой чувствительности феррозондов,
- исключение случайных погрешностей установки теодолита.

Для исключения возможных систематических погрешностей, обусловленных внешними факторами (изменения температуры, ветер и др.), используются данные периодических измерений обоих угловых элементов контрольным прибором.

Итак, для наблюдений на ПВХ выбрана схема отдельных измерений в близких точках, в которых значения поля  $T$  различаются не более чем на 1 нТл.

**Обоснование распределения измерений во времени.** Чтобы использовать при изучении пространственной структуры ВВ ГМП данные наблюдений в ПВХ в одной системе с данными МО, необходимо получить значения элементов ГМП в ПВХ, представленные как среднегодовые. Но наблюдения в ПВХ ведутся, как правило, в течение трех дней. В практике измерений в ПВХ в разные годы и в разных условиях в эти три дня наблюдения производились по различным временным схемам:

а) схема „утро—вечер“ (пока нет интенсивных вариаций ГМП), измерения с 5 до 7 и с 19 до 21 ч.  $LT$  (местного времени) через 30 мин; измеренные значения приводятся к среднегодовым значениям ближайшей МО (в предположении одинаковых суточных вариаций в ПВХ и МО);

б) схема измерений в дневное время (5—20 ч  $LT$ ) через 15 мин с вычислением среднечасовых значений, которые приводятся к среднегодовым значениям ближайших МО путем интерполяции среднечасовых значений МО на положение ПВХ;

в) схема измерений через 15 мин в течение трех суток без перерывов с привязкой к среднегодовым значениям МО путем интерполяции на положение ПВХ разностей среднесуточных и среднегодовых значений элементов ГМП в МО.

Исследование этих схем, а также схемы полуночного отсчета (midnight), которая иногда используется при совместной обработке данных измерений на МО и со спутников [11], выполнено путем имитационного моделирования вариационных наблюдений по данным тех же пяти магнитных обсерваторий (Екатеринбург, Алма-Ата, Новосибирск, Подкаменная Тунгуска, Иркутск), которые использованы в табл. 1.

Таблица 2.

К выбору схемы распределения измерений на ПВХ во времени

Элемент	<i>LT</i>	ARS	IRT	NVСинт-φ	NVS	NVСинт-λ	AAA	POD
<i>D</i> , мин	Сутки	-1,7 ±1,0	0,1 0,4	-0,8 0,7	<b>-1,0</b> <b>1,1</b>	-1,2 0,9	-1,1 0,7	-1,3 1,1
	1—18	-2,0 ±1,3	-1,2 0,5	-1,6 0,9	<b>-1,7</b> <b>1,3</b>	-2,1 1,1	-1,5 0,8	-2,6 1,4
	Полночь	6,8 ±1,9	-7,3 1,4	-0,2 1,6	<b>-1,0</b> <b>2,6</b>	-1,8 2,2	-1,1 1,4	-2,5 3,0
<i>I</i> , мин	Сутки	-1,1 ±0,5	-1,4 0,5	-1,3 0,5	<b>-1,1</b> <b>0,5</b>	-1,2 0,5	-1,4 0,6	-1,0 0,4
	1—18	-0,8 ±0,5	-1,3 0,6	-1,1 0,6	<b>-1,0</b> <b>0,5</b>	-1,1 0,6	-1,3 0,7	-0,8 0,5
	Полночь	-0,1 ±0,8	-1,2 0,9	-0,7 0,8	<b>0,8</b> <b>0,8</b>	0,5 1,0	-0,6 1,0	1,3 0,8
<i>T</i> , нТл	Сутки	-4,0 ±3,8	-3,0 2,2	-3,5 3,0	<b>-2,2</b> <b>2,6</b>	-2,1 3,4	-1,0 4,4	-3,2 2,4
	1—18	-8,8 ±4,0	-4,9 2,8	-6,8 3,4	<b>-4,1</b> <b>3,5</b>	-3,3 4,3	-3,4 5,1	-3,3 3,5
	Полночь	-5,5 ±4,4	-13,2 7,0	-9,3 5,7	<b>-23,0</b> <b>7,3</b>	-23,5 6,3	-29,1 8,5	-17,9 4,2

Выбор времени (1—14 июля 1990 г.) обусловлен тем, что в 1990 г. последний раз проводились измерения на ПВХ Сибири, и если они будут возобновлены, сравнивать результаты надо будет с данными 1990 г. А июль — это обычное время полевых измерений на сети ПВХ. Этот период не содержал дней с большими возмущениями поля. Обычно они легко распознаются по данным измерений в ПВХ, и эти измерения заменяются другими, после того как поле стабилизируется.

Для обоснования выбора временной схемы измерений в табл. 2 приведены средние за 14 сут (1—14 июля 1990 г.) значения элементов ГМП относительно их среднегодовых (СГ) значений с их стандартными отклонениями (внизу) по пяти МО для разных схем распределения „измерений“ во времени.

Здесь по обе стороны от выделенного жирным шрифтом столбца NVS (МО Новосибирск) приведены интерполированные значения элементов ГМП по данным других МО: станций с различной широтой AAA и POD (NVСинт-φ, курсив), и станций ARS и IRT, разнесенных по долготе (NVСинт-λ, курсив). В плане эти МО образуют четырехугольник, а МО NVS находится вблизи пересечения его диагоналей. Разные выборки данных оцениваются по следующим параметрам: вариации значений элемента между МО, стандартные отклонения по каждой МО, разности реальных значений в МО NVS и интерполированных по широте φ — между МО ARS и IRT, по долготе λ — между МО AAA и POD. В табл. 2 видно, что по всем оцениваемым параметрам для всех элементов неудовлетворительны результаты для полуночных данных. Примерно такая же ситуация наблюдается для измерений по схеме „утро—вечер“, материалы по которым в табл. 2 не приводятся. Важно оценить, насколько уступает схеме круглосуточных измерений схема измерений в светлое время (1—18 UT), так как измерения в ночное время сопряжены с некоторыми техническими трудностями. Видим, что по стандартным отклонениям различия не существенны, а различия значений элементов в отдельных обсерваториях практически не превышают разностей значений элементов ГМП в МО NVS, полученных по различным интерполяциям. К сожалению, эти различия являются систематическими. Это приводит к рекомендации для измерений на ПВХ: выполнять непрерывный ряд измерений в течение 3 сут.

Для имитационного моделирования ПВХ Ключи в табл. 3 даны результаты сравнения реальных разностей среднечасовых (СЧ) и среднесуточных (СС) значений элементов ГМП в МО Новосибирск с их интерполированными значениями между двумя парами МО (AAA-POD и ARS-IRT) по двум интервалам времени: 1—3 июля и 11—13 июля 1990 г.

Из таблицы видно:

1) средние значения заметно меньше стандартных отклонений; это значит, что интерполяция не сопряжена с систематическими эффектами и вполне допустима;

2) интерполяция между МО AAA и POD, имеющими меньшее различие по долготе, предпочтительнее интерполяции между МО ARS и IRT; заметим, что при интерполяции разностей среднесуточных и

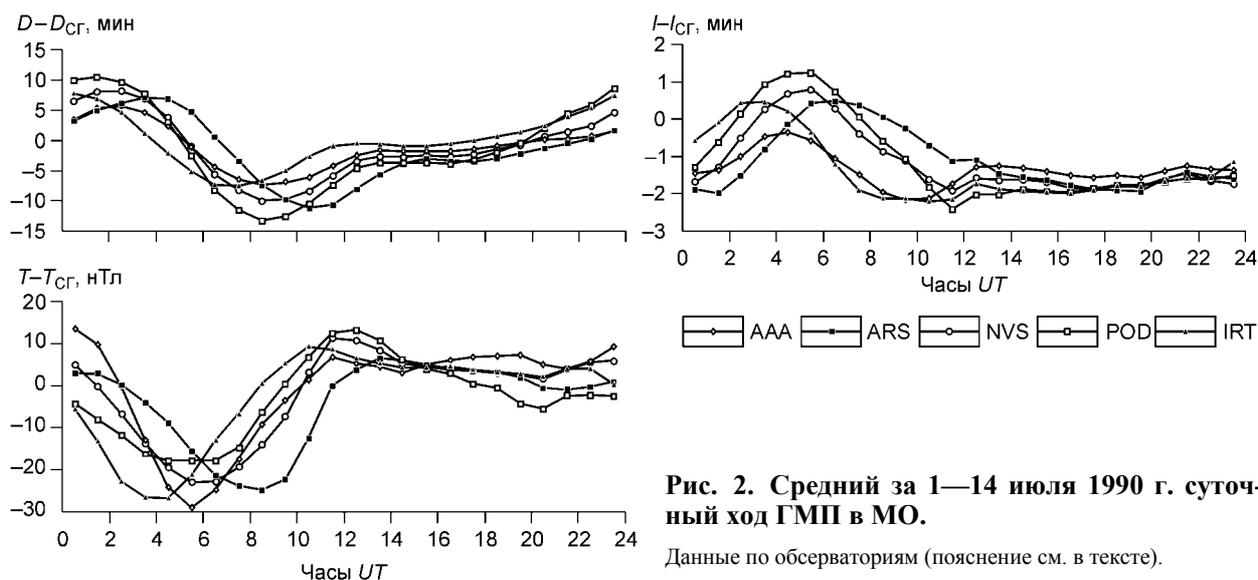


Рис. 2. Средний за 1—14 июля 1990 г. суточный ход ГМП в МО.

Данные по обсерваториям (пояснение см. в тексте).

среднегодовых значений (см. табл. 2) такого предпочтения нет, что очевидно: их вариации не зависят от широты или долготы;

3) погрешности интерполяции существенно больше погрешностей измерений элементов ГМП в МО (ср. с табл. 1) и больше нормативных погрешностей измерений, выведенных из данных табл. 1. Это говорит о нецелесообразности включения в технологическую процедуру наблюдений в ПВХ интерполяции среднечасовых (и тем более реально измеренных мгновенных) значений элементов ГМП.

Стандартные отклонения приведения (по этим же МО) данных в ПВХ Ключи, полученных по схеме „утро—вечер“ 1—3 и 11—13 июля 1990 г., составили: для  $D = \pm 1,1'$ ,  $I = \pm 0,25'$ ,  $T = \pm 4,6$  нТл. Вместе с тем стандартные отклонения приведенных среднесуточных значений элементов ГМП в ПВХ Ключи к среднегодовым (СГ) значениям по тем же двум парам МО по выборке 1—14 июля 1990 г. оказались равными: для  $D = \pm 0,6'$ ,  $I = \pm 0,12'$ ,  $T = \pm 2,7$  нТл. Это вдвое меньше погрешностей приведения часовых значений по системе „утро—вечер“ и лишь немного превышает погрешностей измерений в МО (см. табл. 1).

Данные табл. 3 подтверждают, что в Сибири на расстояниях между МО порядка 1000 км невозможна приемлемая по точности интерполяция мгновенных значений элементов ГМП в связи с различием долготной зависимости разных составляющих суточного хода ГМП. Солнечно-суточные вариации в различных по долготе пунктах (например МО ART, NVS, IRT на рис. 3) синхронны по местному времени, а „бухты“ и бури — по мировому времени.

На рис. 2 показан средний за 14 дней суточный ход измеряемых в ПВХ элементов ГМП. В осреднении нерегулярные вариации, включая „бухты“, сглаживаются, остаются закономерности  $S_q$ -вариаций. Для всех элементов ГМП виден долготный сдвиг в 4 ч между МО ARS и IRT (другие МО посередине между ними). Эти графики демонстрируют принципиальную возможность интерполяции между МО разностей СС и СГ значений для приведения данных измерений на ПВХ к среднегодовым значениям (кривые МО NVS лежат строго между кривыми пар МО ARS—IRT и AAA—POD).

Таблица 3. Сравнение реальных в МО NVS и интерполированных разностей СЧ- и СС-значений элементов ГМП

Элемент	МО интерполяции	01—03.07.90		11—13.07.90	
		Ср. знач.	Ст. откл.	Ср. знач.	Ст. откл.
$D$ , мин	AAA-POD	0,10	0,60	0,12	0,80
	ARS-IRT	-0,59	1,72	0,29	1,99
$I$ , мин	AAA-POD	0,12	0,42	0,35	0,55
	ARS-IRT	0,16	0,38	-0,02	0,27
$T$ , нТл	AAA-POD	-0,6	5,6	1,6	5,6
	ARS-IRT	1,1	6,8	2,6	5,5

### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПВХ КЛЮЧИ

В качестве модели измерений в ПВХ Ключи взяты среднечасовые значения  $D$ ,  $I$ ,  $T$ , полученные 1—3 июля 1990 г. в МО Новосибирск (NVS). По ним вычислены среднесуточные (СС) значения. Они приведены к середине года (СГ) посредством интерполяции данных МО AAA и POD, ARS и IRT на положение в плане ПВХ Ключи (табл. 4). Естественно было использовать предложение [8] интерполировать между МО разности СС- и СГ-значений элементов ГМП.

Таблица 4 содержит результаты имитированных наблюдений в ПВХ Ключи:

Таблица 4. Оценка точности приведения данных ПВХ Ключи к середине года путем интерполяции разностей СС и СГ-значений элементов ГМП

Элемент	МО интерполяции	01.07	02.07	03.07	01—03.07
$D$ , мин	AAA-POD	-1,98	-1,14	-0,96	-1,38
	$\Delta(\text{AAA-POD})$	<b>-0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,24</b>	<b>0,12</b>
	ПВХ Ключи	-2,04	-1,08	-0,72	-1,26
	$\Delta(\text{ARS-IRT})$	<b>-0,84</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,60</b>
	ARS-IRT	-1,20	-0,54	-0,36	-0,66
$I$ , мин	AAA-POD	-1,44	-1,14	-1,22	-1,26
	$\Delta(\text{AAA-POD})$	<b>0,30</b>	<b>0,18</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,12</b>
	ПВХ Ключи	-1,14	-0,96	-1,28	-1,14
	$\Delta(\text{ARS-IRT})$	<b>0,18</b>	<b>0,24</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>
	ARS-IRT	-1,32	-1,14	-1,44	-1,32
$T$ , нТл	AAA-POD	-3,5	-5,0	-0,9	-3,1
	$\Delta(\text{AAA-POD})$	<b>3,9</b>	<b>-1,3</b>	<b>-4,3</b>	<b>-0,6</b>
	ПВХ Ключи	0,4	-6,3	-5,2	-3,7
	$\Delta(\text{ARS-IRT})$	<b>5,7</b>	<b>-1,1</b>	<b>-1,4</b>	<b>1,1</b>
	ARS-IRT	-5,3	-5,2	-3,7	-4,7

- измеренные значения (из всех значений элементов на МО исключены среднегодовые значения);
- интерполированные на ПВХ Ключи значения на МО (AAA-POD и ARS-IRT);
- разности между реальными (известными по данным МО Новосибирск) и интерполированными значениями; они обозначены как  $\Delta(\text{AAA-POD})$  и  $\Delta(\text{ARS-IRT})$ .

Эти разности являются основным результатом модели. Они характеризуют точность приведения данных в ПВХ к среднегодовым значениям этих пар МО.

Погрешности интерполяции разностей среднесуточных и среднегодовых значений элементов ГМП, как видим, совсем немного превышают погрешности измерений (ср. с данными табл. 1). Следует обратить

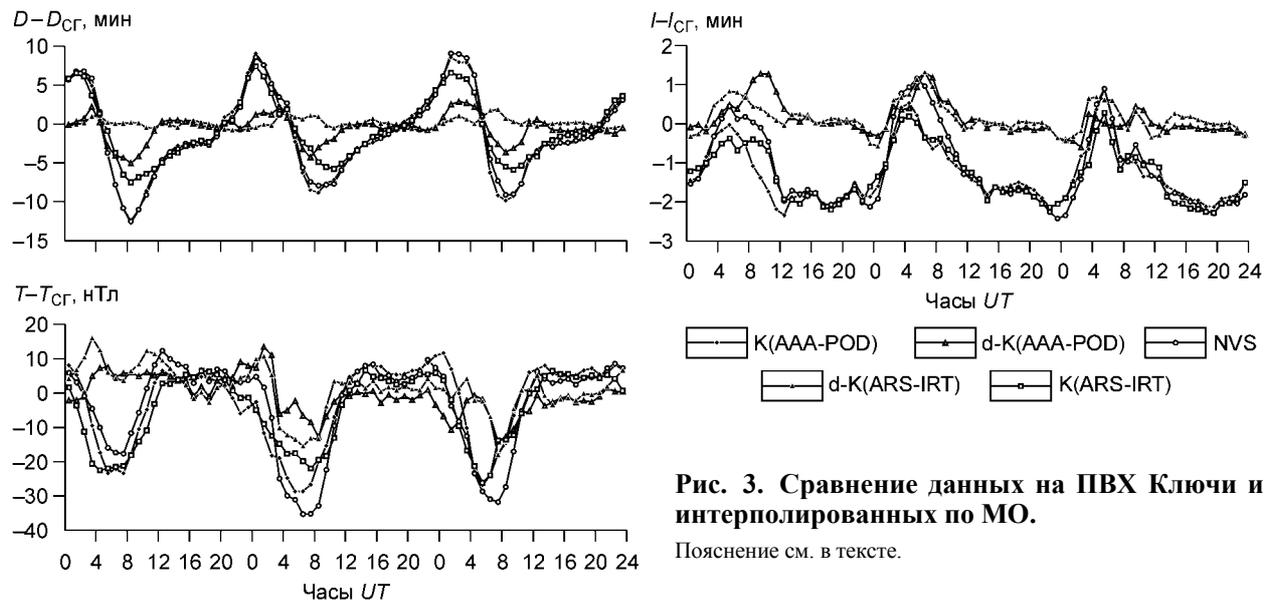


Рис. 3. Сравнение данных на ПВХ Ключи и интерполированных по МО.

Пояснение см. в тексте.

внимание на повышенные значения этих разностей 1 июля. Эти сутки характеризуются несколько более возмущенным магнитным полем, чем другие дни.

На рис. 3 дано сравнение реальных значений этих элементов ГМП в МО Новосибирск с интерполированными на положение ПВХ Ключи значениями в МО AAA и POD, это кривые  $K(\text{AAA—POD})$  и МО ARS и IRT, кривые  $K(\text{ARS—IRT})$ . Различие между ними — кривые  $d—K(\text{AAA—POD})$  и  $d—K(\text{ARS—IRT})$ , как видим, часто превышает половину амплитуды вариаций. Этим еще раз показана некорректность интерполяции СЧ (тем более, мгновенных) значений элементов поля в целях приведения к середине года. Вместе с тем отмечается близость ( $D$  и  $I$ ) кривых  $d—K(\text{AAA—POD})$  и  $d—K(\text{ARS—IRT})$  между собой и к нулю во временном интервале 12—22 ч  $UT$ , т. е. с 19 ч вечера до 5 ч утра  $LT$ . В этот интервал входят и упоминавшиеся раньше полуночные (midnight) данные, и данные „nightside“, в интервале 19—7 ч  $LT$  или „nonsunlit areas“, когда Солнце более чем на  $5^\circ$  ниже горизонта, которые в последнее время используются при совместной обработке данных спутников и МО при построении аналитических моделей ГМП [11].

### ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПВХ

По данным МО [1] выявлена 2—4-летняя периодичность ВВ, которая имеет региональные особенности в областях с характерными размерами 2—3 тыс. км. Отсюда можно сформулировать требования к пространственному распределению ПВХ и интервалу времени между повторными наблюдениями.

Средние расстояния между станциями (МО и ПВХ) должны быть примерно 500—700 км, что соответствует плотности сети 3—4 станции на  $10^6$  км<sup>2</sup>. На территории Сибири и Дальнего Востока (площадь около 15 млн км<sup>2</sup>) необходимы около 50 станций. Из действовавшей ранее сети около 70 МО и ПВХ в настоящее время работают около 10 МО, причем далеко не все на современном уровне технического обеспечения, стабильности работы и точности данных наблюдений. Следовательно, сеть ПВХ может состоять из 40 пунктов. Это значит, что из ранее действовавшей сети необходимо выбрать пункты, составляющие более или менее равномерную сеть, имеющие стабильное положение достаточно долгое время (в 80-е годы не переносились), с приемлемым в настоящее время доступом (транспортная сеть — дороги, реки) и удовлетворяющие указанным выше требованиям относительно однородности ГМП в пределах площади ПВХ в 100—150 м<sup>2</sup>.

Среднее время повторения желательно 1—2 года. Это требует организации специальной группы наблюдателей, для которой работа на ПВХ является основной обязанностью, и обеспечения этой группы измерительной аппаратурой.

Наблюдения на повторных станциях в последние годы в ряде стран (Канада, США, Аргентина, Австралия, Южная Африка и др.) восстановлены [13, 14]. Необходимо восстановить их и в Сибири, где особенно редка сеть обсерваторий.

Восстановление на обширной территории Сибири сети ПВХ примерно с той же густотой, которую эта сеть имела в 80-е годы прошлого века, позволит существенно уточнить представления о пространственно-временной структуре ВВ. Это необходимо для развития теорий генерации магнитных полей Земли и планет и теории структурообразующих процессов в их ядрах и вышележащих оболочках.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прекращение в начале 90-х годов наблюдений по системе ПВХ (повторных станций), что связывалось с не вполне обоснованными и не оправдавшимися в достаточной мере надеждами на спутниковые измерения, было ошибочным решением. В настоящее время, когда на орбитах работают несколько спутников, выполняющих магнитные измерения для изучения внутреннего геомагнитного поля, стало ясно, что получаемая информация недостаточна для изучения пространственно-временной структуры вековых вариаций ГМП. Распределение и движения фокусов векового хода, временные и пространственные закономерности джерков, информация о которых не может быть получена со спутников, важны в исследовании генерации магнитного поля и в изучении природы глубинных геодинамических процессов. Назрела необходимость восстановления системы ПВХ на обширной территории Сибири.

Предложена методика исследований ВВ ГМП, включающая:

а) повторные измерения полного вектора ГМП в пунктах векового хода (ПВХ) комплектами феррозондового теодолита и протонного магнитометра, по программе 3-суточных измерений с шагом по времени  $1/4$  ч;

б) приведение среднесуточных значений элементов ГМП к их среднегодовым значениям в ближайших МО путем интерполяции на положение ПВХ разностей между среднесуточными и среднегодовыми значениями элементов на МО.

Эта методика позволяет получать данные измерений в ПВХ с такой же точностью, как в МО во время прекращения программы ПВХ. В настоящее время некоторые МО, особенно входящие в систему Intermagnet, на порядок повысили точность измерений. Но таких немного. На других положение в лучшем случае осталось прежним.

Потребность в фиксации направления географического меридиана (при измерениях  $D$  или  $X$ ) является препятствием к созданию автономных измерительных комплексов. Поэтому на повторных станциях, как и на большинстве МО в мире, измерения проводятся комплектами феррозондовых теодолитов ( $DI$ -магнитометров) и абсолютных протонных  $T$ -магнитометров. Мы показали возможность определения среднегодовых значений элементов ГМП на ПВХ с имеющейся аппаратурой невысокого класса. Использование современной аппаратуры позволит повысить точность измерений и облегчить работу непосредственно на ПВХ, но все другие положения методики сохраняют свое значение.

Авторы благодарят руководителей магнитных обсерваторий: Арти О.А. Кусонского, Алма-Ата О.И. Соколову, Подкаменная Тунгуска В.Г. Лагунова, Патроны В.В. Харченко и их сотрудников за возможность использования материалов их наблюдений в качестве фактической информации в этой работе. Мы признательны рецензентам статьи Ю.А. Зорину и П.Г. Дядькову за ценные замечания, позволившие улучшить изложение материала.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Российской Федерации по гранту E02-8,0-39.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ладынин А.В., Попова А. А., Семаков Н.Н.** Вековые вариации геомагнитного поля: сравнение спутниковых и наземных данных // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (2), с. 278–291.
2. **Бенькова Н.П., Пушков А.Н.** Магнитное поле Земли // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы, 1980, т. 5, с. 5–95.
3. **Cain J.C., Fraser J., Muth L., Schmitz D.** The use of Magsat data to determine secular variation // J. Geophys. Res., 1983, v. 88, p. 5903–5910.
4. **Barraclough D.R.** A comparison of satellite and observatory estimates of geomagnetic secular variation // J. Geophys. Res., 1985, v. 90, № B3, p. 2523–2526.
5. **Barraclough D.R.** Spherical harmonic analysis of the geomagnetic secular variation. A review of methods // Phys. Earth Planet. Inter., 1976, v. 12, p. 365–387.
6. **Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика. 2-е изд. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2001, 409 с.
7. **Stevenson D.J., Spohn T., Schubert G.** Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets // Icarus, 1983, v. 54, № 3, p. 466–489.
8. **Ладынин А.В., Маслов В.А.** К методике определения элементов геомагнитного поля на пунктах векового хода // Геология и геофизика, 1984 (2), с. 109–113.
9. **Bitterly J., Cantin J.M., Schlick R. et al.** Portable magnetometer theodolite with fluxgate sensor for Earth's magnetic field component measurements // Geophys. Surv., 1984, v. 6, № 3–4, p. 233–239.
10. **Pavlov A.F., Kuznetsov V.V., Nagorny J.N.** Fluxgate declinometer and inclinometer. Boulder, Colorado, XXI IUGG General Assembly, Symposium GA5.01, 1995, p. 234.
11. **Olsen N.** A model of the geomagnetic field and its secular variation for epoch 2000 estimated for Oersted data // Geophys. J. Int., 2002, v. 149, № 2, p. 454–462.
12. **Olsen N., Holme R., Luehr H.** A magnetic field model derived from Oersted and Oersted-2/SAC-C observations. AGU Spring meeting, 28–31 May 2002. [www.agu.org/meetings/sm02op.html](http://www.agu.org/meetings/sm02op.html)
13. [http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/repeat\\_survey.html](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/repeat_survey.html)
14. **Macmillan S.** World Data Centre repeat station data collection and use of these data in global modelling. European Repeat Station Workshop at Niemegk Observatory 20–21 February 2003. [www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/repstat/lect\\_gb/frameset.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/repstat/lect_gb/frameset.html)

Рекомендована к печати 22 апреля 2005 г.  
А.Д. Дучковым

Поступила в редакцию 5 ноября 2004 г.,  
после доработки — 6 апреля 2005 г.