

02;07;09;12

## Новая версия квантового магнитометра: однокамерный Cs–K тандем на четырехквантовом резонансе в $^{39}\text{K}$

© Е.Б. Александров, М.В. Балабас, А.К. Вершовский, А.С. Пазгалев

Всероссийский научный центр "ГОИ С.И. Вавилова",  
199034 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: balabas@soi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 3 сентября 1999 г.)

Предложена и экспериментально опробована новая схема квантового магнитометра, работающая по принципу Cs–K тандема. Отличительные особенности схемы — использование одной рабочей ячейки с парами Cs и K, цифровой синтез частоты возбуждения калиевого резонанса из частоты цезиевого резонанса с коэффициентом преобразования, определяющимся отношением атомных констант, и использование 4-квантового резонанса в калии. Продемонстрирована устойчивость показаний прибора в пределах 10 pT к изменению его основных параметров, заведомо превышающему их эксплуатационные вариации.

### Введение

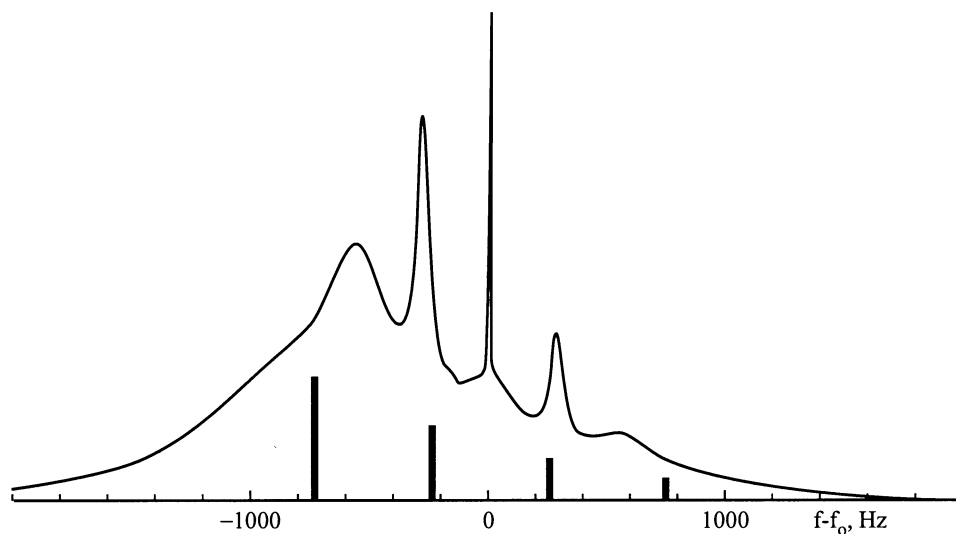
Начиная с конца пятидесятых годов в технике измерения модуля магнитной индукции полей геофизического диапазона доминируют так называемые квантовые магнитометры с оптической накачкой (МОН) как много более чувствительные, более быстрые и в последние годы более точные, чем протонные (прецессионные) магнитометры (см., например, обзоры [1–3]). В литературе описаны десятки различных версий МОН, отличающихся теми или иными признаками или их сочетанием — точностью, разрешающей способностью, быстродействием, рабочим диапазоном, а также всевозможными эксплуатационными характеристиками, определяемыми требованиями к ориентации прибора, его энергопотреблению, весу и габаритам, надежности, цене и др. Имея в виду широчайший спектр задач, решаемых с применением МОН, трудно думать, что в конце концов будет найдена одна наилучшая универсальная конструкция. Поэтому представляется, что разработки новых решений, наилучшим образом отвечающих тому или иному типу измерительных задач, будут и в дальнейшем сохранять актуальность. В настоящем сообщении описана новая версия МОН, предназначенная главным образом для обсерваторских наблюдений и абсолютных измерений модуля индукции во всем геомагнитном диапазоне и отличающаяся сочетанием быстродействия (полоса 0–100 Hz), высокой разрешающей способности ( $\sim 10 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ ) с рекордно высокой долговременной стабильностью, оцениваемой как 10 pT, при строго линейной связи измеряемой частоты резонанса с индукцией магнитного поля. Указанные характеристики ранее достигались порознь или в других сочетаниях с помощью иных типов МОН. Однако в области метрологии всегда имеет смысл разработка прибора нового типа, даже если он не обещает повышения метрологических характеристик, но осуществляет измерение существенно другим способом.

### Описание принципа действия прибора

Как известно, в метрологии сочетание быстродействия прибора и высокой точности часто приводит к противоречию, которое разрешается объединением в единую систему двух различных приборов, в которой показания быстрого прибора корректируются с помощью второго прибора, медленного, но более точного. Так устроены современные системы хранения времени, такой же подход был предложен в работе [4] для точного измерения модуля индукции. Соответствующий прибор, часто называемый тандемом, состоит из двух магнитометров МОН: один из них построен по схеме спинового генератора ( $M_x$ -МОН), выходная частота которого автоматически следует за индукцией внешнего поля, а другой ( $M_z$ -МОН) работает по схеме пассивного радиоспектрометра, привязанного петлей обратной связи к выбранной линии магнитного резонанса с разрешенной структурой линий, что обеспечивает повышенную точность измерения частоты резонанса в отличие от  $M_x$ -МОН, который генерирует в окрестности центра тяжести группы неразрешенных линий и подвержен значительным систематическим ошибкам.

Первый тандем использован в своих двух составляющих атомный пар изотопа рубидия  $^{87}\text{Rb}$ , что нельзя считать лучшим выбором, поскольку его спектр магнитного резонанса содержит группу линий, расстояние между которыми в земном магнитном поле при минимальном возмущении лишь в несколько раз превышает их ширины. Много лет спустя этот недостаток был преодолен в конструкции Cs–K тандема [5], использовавшего цезий в  $M_x$ -схеме и калий в  $M_z$ -схеме. В отличие от рубидия спектр магнитного резонанса калия надежно разрешен во всем диапазоне земных магнитных полей, обеспечивая отсутствие интерференции соседних линий.

Описываемый ниже новый тандем отличается от своих прототипов двумя основными особенностями: 1) оба



**Рис. 1.** Расчетная зависимость сигнала поглощения света накачки в парах  $^{39}\text{K}$  в функции от частоты  $f$  приложенного радиочастотного поля  $H_1(f)$ .

составляющих тандем магнитометра используют общую рабочую кювету со смесью паров цезия и калия; 2) калиевый  $M_z$ -магнитометр использует линию четырехквантового магнитного резонанса, отвечающего переходу между подуровнями  $|F = 2, m_F = 2\rangle \Leftrightarrow |F = 2, m_F = -2\rangle$ .

Объединение кювет двух магнитометров радикальным образом снимает проблему систематических ошибок, связанных с возможностью различия магнитного поля в объемах двух пространственно разнесенных кювет, а кроме того, делает прибор более компактным. Использование четырехквантового резонанса обладает преимуществами многократно более высокой разрешающей способности и строгой линейностью частоты этого резонанса в зависимости от магнитного поля. Как показано в работах [6,7], в спектре  $n$ -квантовых переходов типа  $\Delta F = 0, \Delta m_F = |n|$  резко выделяется высший резонанс  $n = 2F$ , частота которого практически не зависит от напряженности переменного поля  $H_1$ . Этот резонанс, кроме того, является самым узким и самым мощным. Для калия максимальное значение полного углового момента  $F$  равно 2, так что кратность высшего резонанса равна 4. При оптимальном значении поля  $H_1$  ширина 4-квантового резонанса составляет единицы герц, в то время как все прочие резонансы сильно уширены, что снимает проблему поиска и удержания нужного резонанса при наличии 9 других. На рис. 1 показан пример расчетного спектра продольного сигнала магнитного резонанса калия в условиях накачки циркулярно поляризованным светом  $D_1$ -линии. Кривая на рис. 1 обнаруживает наложение многоквантовых резонансов кратности 1–4 при сильном поле  $H_1$ . Спектр внизу (четыре дискретные линии) — одноквантовые резонансы в слабом поле  $H_1$ . Отсчет частоты в герцах ведется от положения четырехквантового резонанса. Спектр вычислен для постоянного поля  $50 \mu\text{T}$  при достаточно высокой амплитуде

переменного поля  $H_1$ , такой что  $\gamma H_1 = 200\Gamma_0$ , где  $\gamma = 7 \text{ Hz/nT}$  — гиромагнитное отношение,  $\Gamma_0$  — ширина линии одноквантового резонанса, в сопоставлении со спектром при поле  $H_1$ , таком что  $\gamma H_1 = \Gamma_0$ . В этом последнем случае спектр слабо возмущенного атома калия представлен четырьмя почти эквидистантными линиями переходов  $m_F \Leftrightarrow m_F + 1$  в пределах состояния  $F = 2$ . Их ширина много меньше расстояния между ними и не разрешима в масштабе рисунка. Можно видеть, что спектр калия сильно возмущенным переменным полем резко отличен. Для него характерен anomalously узкий 4-квантовый резонанс на фоне сильно уширенных полем резонансов кратности  $n = 1-3$ .

Блок-схема прибора представлена на рис. 2. Датчик магнитометра содержит вакуумную стеклянную сферическую колбу диаметром 80 mm, покрытую изнутри пленкой парафина и имеющую отросток с каплей сплава калия с цезием, обеспечивающей приблизительно равную плотность паров обоих элементов в окрестности  $50^\circ\text{C}$ .

Колба возбуждается двумя лучами циркулярно поляризованного света от цезиевой и калиевой газоразрядных ламп. Используются только  $D_1$ -линии резонансных дублетов. Калиевый свет направлен вдоль по постоянному магнитному полю, в то время как цезиевый луч отклонен от направления поля под углом  $\sim 45^\circ$ . После прохождения через кювету оба луча детектируются кремниевыми фотодиодами и соответствующие фототоки после усиления поступают на входы двух фазовых детекторов. Цезиевый спиновый генератор построен по схеме автоподстройки частоты опорного генератора, управляемого напряжением ( $VCO$ ), к частоте резонанса цезия.

Для этого используется фазовый детектор, на один вход которого поступает сигнал с фотодетектора цезиевого луча. Если частота  $VCO$ , питающего индуктор

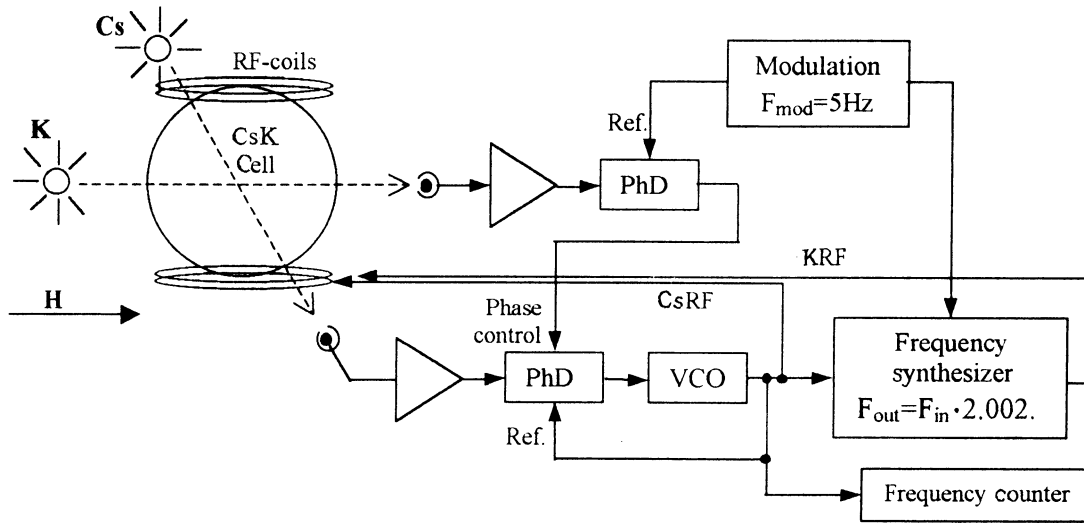


Рис. 2. Упрощенная блок-схема тандема Cs-4QK.

радиочастотного поля, близка к частоте цезиевого резонанса, луч света накачки после прохождения колбы приобретает амплитудную модуляцию на частоте  $VCO$ . Фаза этой модуляции зависит от близости к резонансу. На второй вход фазового детектора подается сигнал с  $VCO$ . Выходное напряжение фазового детектора управляет частотой  $VCO$ , приводя ее к резонансу.

Частота цезиевого резонанса является приблизительной мерой напряженности внешнего поля, требуя коррекции в связи со значительными систематическими ошибками. Эта коррекция осуществляется путем введения дополнительной петли управления частотой  $VCO$  через сигнал 4-квантового резонанса в калии. Удвоенная частота цезиевого резонанса лишь на десятую процента отличается от частоты 4-квантового резонанса во всем геомагнитном диапазоне. Это позволяет синтезировать частоту калиевого резонанса путем простого умножения частоты  $VCO$  на постоянный множитель  $2.002395\dots$ . В процессе умножения предусматривается и медленная (на частоте 5 Hz) частотная модуляция сигнала  $VCO$ . Синхронное детектирование фотосигнала в калиевом канале на частоте модуляции позволяет получить сигнал ошибки для коррекции частоты  $VCO f_{VCO}$  (это возможно до тех пор, пока частота  $f_{VCO}$  не выходит за пределы ширины линии резонанса цезия). Таким образом, динамика выходной частоты определяется быстрым цезиевым магнитометром, а точное значение этой частоты относительно медленно корректируется по положению узкого калиевого резонанса.

Значение частоты 4-квантового резонанса калия  $f_K$  связано с индукцией  $H$  измеряемого поля соотношением

$$f_K = H \mu_B (g_j + 3g_i) / (4h), \quad (1)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g_j$  и  $g_i$  — электронный и ядерный  $g$ -факторы калия,  $h$  — постоянная Планка.

## Метрологические характеристики прибора

Абсолютное значение констант, входящих в выражение (1), известно с точностью до  $\sim 10^{-7}$ . Используя для  $g_j$  и  $g_i$  значения для двух изотопов калия  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  из [8]

$$g_f = 2.00229421(24),$$

$$^{39}g_i = -1.14193489(12) \cdot 10^{-4},$$

$$^{41}g_i = -0.7790600(8) \cdot 10^{-4}$$

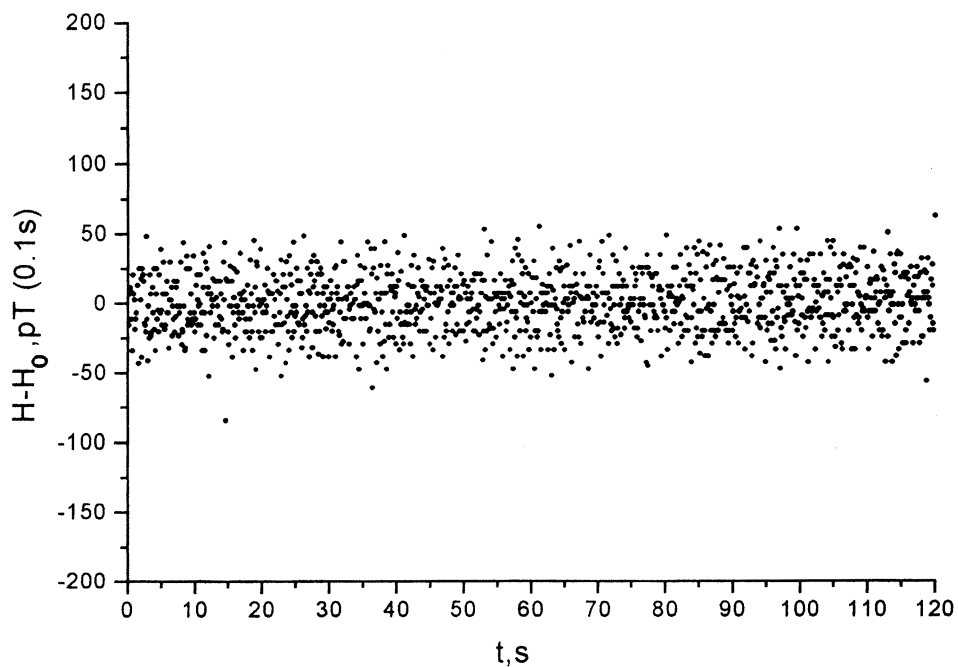
и  $\mu_B/h$  из рекомендаций CODATA 1997 г.

$$\mu_B/h = 13.99624677(94) \text{ Hz} / nT,$$

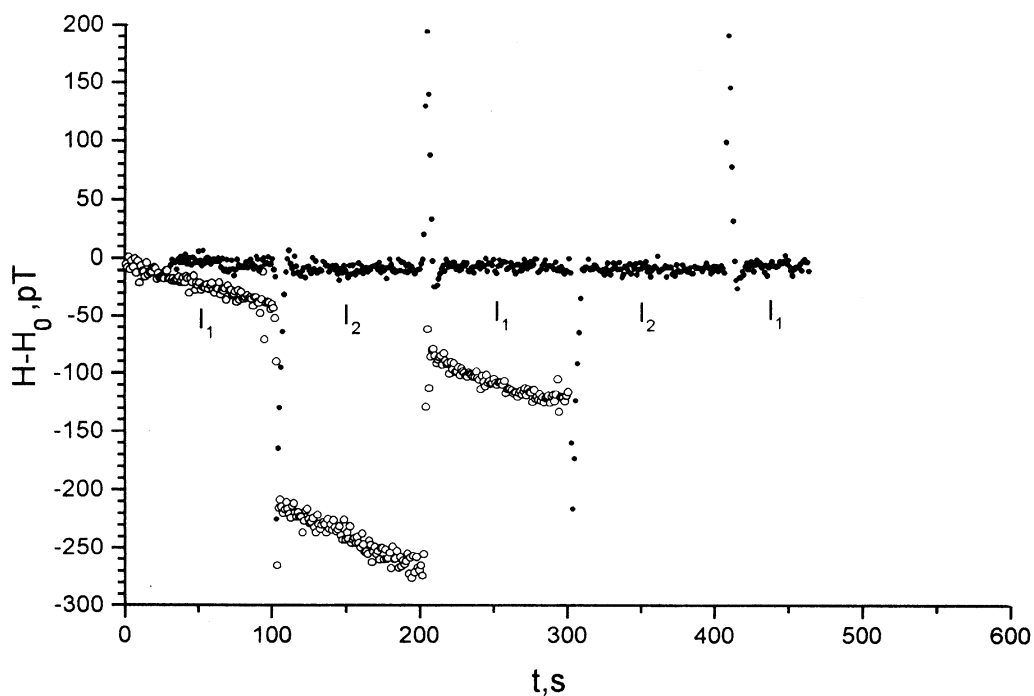
для коэффициента пропорциональности  $f_K / H$  имеем

$$f_K / H = 7.00466137(58) \text{ Hz} / nT. \quad (2)$$

Формально абсолютная точность тандема ограничена точностью выражения (2). Если же говорить о воспроизводимости показаний приборов, то она может быть как выше, так и ниже ограничения, задаваемого соотношением (2). Исходное соотношение (1) связывает выходную частоту магнитометра с напряженностью поля через атомные и фундаментальные константы и тем самым не содержит никаких ограничений на воспроизводимость. Эти ограничения возникают при учете параметрических зависимостей частоты четырехквантового резонанса от ряда факторов: от спектрального состава и интенсивности света накачки, от амплитуды переменного магнитного поля, вызывающего резонанс, от плотности паров калия, от напряженности постоянного поля. Систематические ошибки могут возникать также как следствие несовершенства процедуры измерения положения максимума резонанса и вследствие намагниченности элементов конструкции магнитометра.



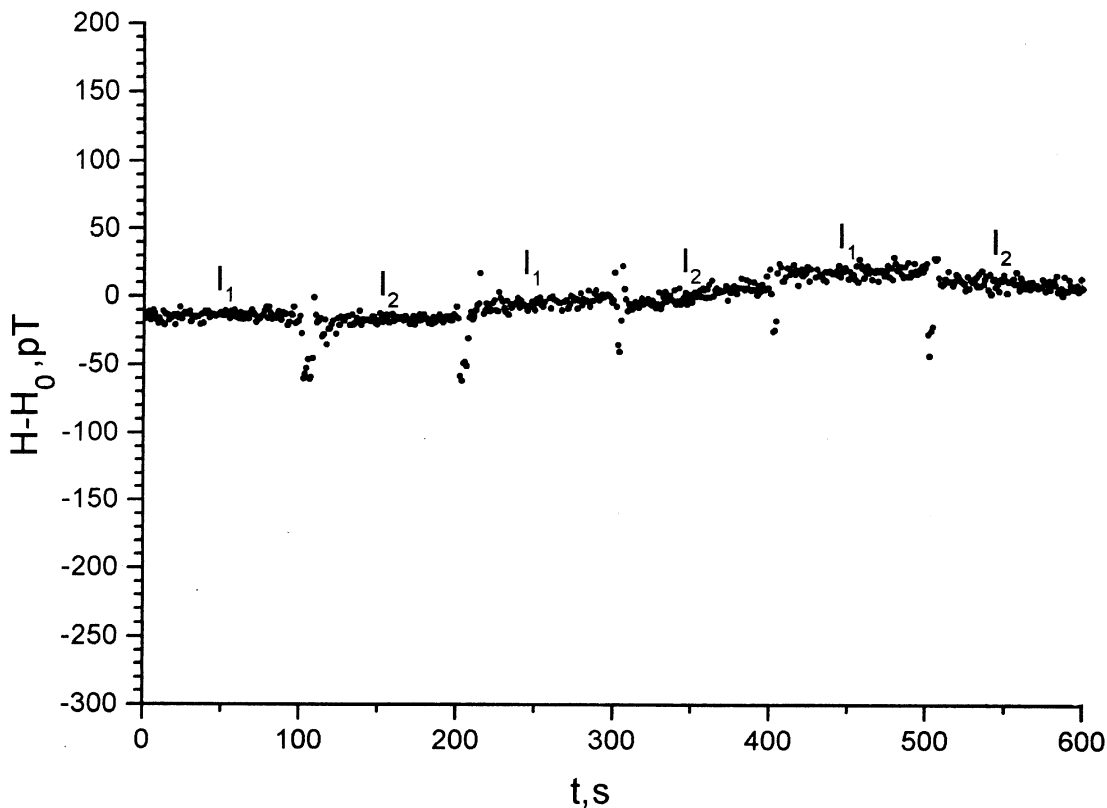
**Рис. 3.** Разрешающая способность Cs–K тандема.  $H_0 = 49574.500$  нТ,  $\sigma(0.1 \text{ s}) = 18$  пТ.



**Рис. 4.** Влияние изменения интенсивности света накачки цезия на выходные показания Cs–K тандема (темные точки) и Cs магнитометра (светлые точки).  $H_0 = 49574.470$  нТ,  $I_1 = 3.0 \mu\text{A}$ ,  $I_2 = 1.5 \mu\text{A}$ .

Использование четырехквантового резонанса вместо обычного одноквантового позволяет надеяться на снижение систематических ошибок в связи с уменьшением ширины резонанса и увеличением его разрешающей способности, которое может быть разменяно на повышение воспроизводимости за счет снижения интенсивности

света накачки. Накачка, как известно, сопровождается оптическими сдвигами частоты резонанса двух видов [9]. Один из них, связанный с циркуляцией радиочастотной когерентности между основным и возбужденным состоянием [10], отсутствует в случае 4-квантового резонанса, поскольку соответствующая когерентность не



**Рис. 5.** Влияние изменения интенсивности света накачки калия на выходные показания Cs–K тандема.  $H_0 = 49574.470$  нТ,  $I_1 = 7.6$   $\mu$ А,  $I_2 = 4.6$   $\mu$ А.

переносится в возбужденное состояние при одноквантовом оптическом возбуждении. Вторая составляющая оптического сдвига, связанная с оптическим эффектом Штарка [11], в полной мере сохраняется при 4-квантовом резонансе, однако она может быть линейно ослаблена снижением интенсивности накачки или полностью устранена подбором спектра возбуждающего излучения.

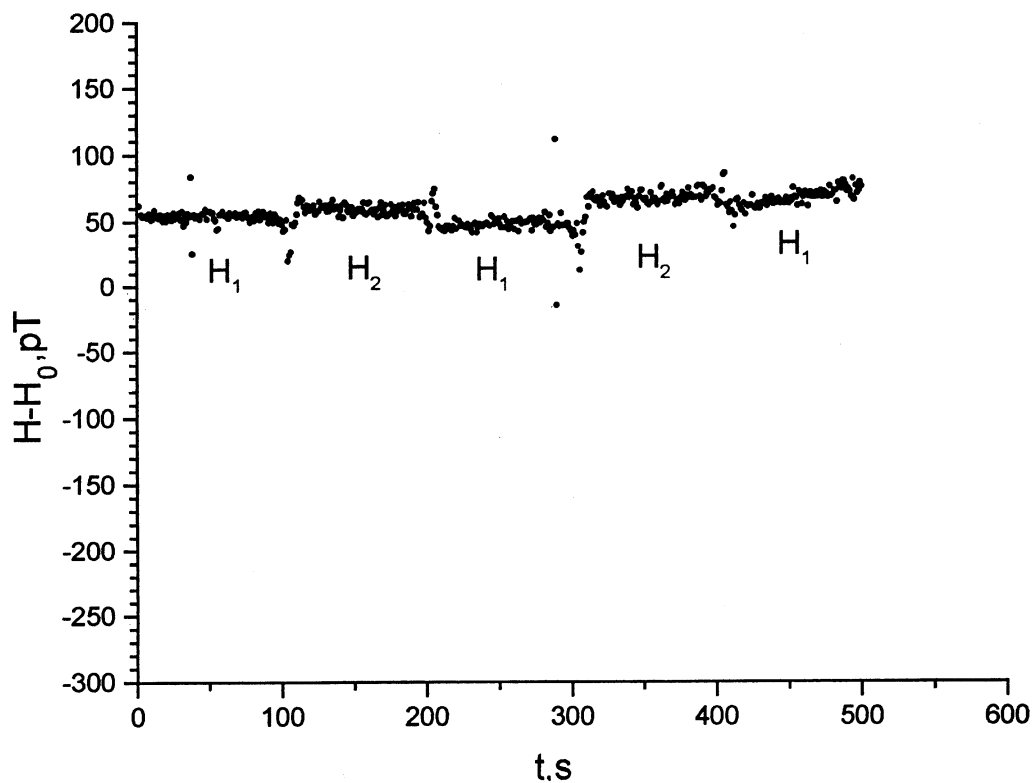
Экспериментальное исследование долговременной стабильности магнитометра представляет исключительно трудную задачу в связи с отсутствием эталонов ожидаемого уровня точности и с проблемами создания достаточно стабильного магнитного поля. Мы пошли по пути установления чувствительности показаний магнитометра, установленного в стабилизированном поле, к изменению параметров прибора: интенсивности света накачки, мощности радиополей, температуры рабочей камеры, параметров фазовой модуляции. Все эти изменения можно осуществить относительно быстро, пока не сказываются дрейфы системы стабилизации магнитного поля.

Рис. 3 характеризует разрешающую способность прибора. Она должна в принципе ограничиваться возможностями цезиевого спинового генератора. Однако в условиях наших измерений мы могли получить только нижнюю границу чувствительности, ограниченную в том числе стабильностью магнитного поля, в котором производились испытания. На рисунке представлен разброс пока-

заний прибора при скорости отсчета 10 раз в секунду в стабилизированном поле около 0.5 эрстеда. Дисперсия отсчетов равна 18 рТ. Усреднение за одну секунду снижает дисперсию почти в 10 раз. Это свидетельствует о том, что чувствительность ограничена не дробовым шумом фототока (т. е. не на принципиальном уровне).

На рис. 4 показано влияние изменения интенсивности света накачки цезия на выходные показания прибора. В случае тандема никакого влияния не ожидалось. На рисунке темными кружками показана запись последовательных выходных показаний тандема при ступенчатом изменении интенсивности накачки цезия в 2 раза. Можно видеть, что в пределах случайной ошибки порядка 10 рТ никаких систематических изменений показаний не возникает (резкая смена интенсивности приводит к переходному процессу, отмеченному на записи импульсными выбросами). На этом же рисунке светлыми кружками представлено изменение частоты цезиевого спинового генератора в тех же условиях при разорванной связи с калиевым магнитометром. Хорошо виден общий дрейф показаний и скачки с амплитудой порядка 0.2 нТ при изменении интенсивности цезиевой накачки.

Изменение интенсивности света накачки калия должно было привести к сдвигу выходных показаний, однако этот сдвиг ожидался малым. Соответствующая запись представлена на рис. 5. В пределах 10 рТ трудно усмо-



**Рис. 6.** Влияние изменения интенсивности радиополя  $KRF$  на выходные показания Cs–K тандема.  $H_0 = 49574.470$  нТл,  $H_2 = 2H_1$ .

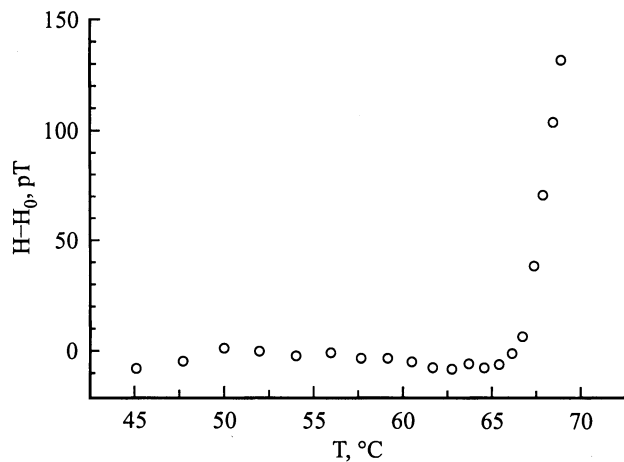
треть систематический эффект изменения интенсивности на фоне шумов и дрейфа, обусловленного скорее всего несовершенством стабилизатора поля.

Более отчетливое влияние на показания прибора обнаружено при изменении амплитуды радиочастотного поля, вызывающего 4-квантовый резонанс калия (рис. 6). Из записи следует, что изменение амплитуды поля в полтора раза приводит к изменению выходных показаний в пределах 10–20 рТ. Как и ожидалось, никакой зависи-

мости выходных показаний от интенсивности радиополя на частоте цезиевого резонанса не было обнаружено.

Для магнитометров с оптической накачкой обычно наблюдается значительная зависимость показаний от температуры рабочей кюветы. Соответствующая зависимость для тандема иллюстрируется рис. 7. Можно видеть, что в беспрецедентно широком для МОН диапазоне температур (45–65 °С) не обнаруживается никакого систематического влияния температуры в пределах 10 рТ (при более высокой температуре нарушается захват калиевого резонанса).

Труднее всего получить экспериментальные подтверждения ожиданий высокой абсолютной точности нового магнитометра. Для этого необходимо иметь эталонный прибор соответствующего уровня точности и достаточно стабильное и однородное магнитное поле. Мы использовали аттестованный щелочно-гелиевый магнитометр [12]. В диапазоне индукций 30–60  $\mu\text{T}$  расхождение между показаниями двух приборов не превышало 0.5 нТл.



**Рис. 7.** Зависимость показаний Cs–K тандема от температуры рабочей кюветы.  $H_0 = 49573.870$  нТл.

## Заключение

Проведенные измерения подтвердили ожидания в отношении характеристик Cs–K тандема. Прибор демонстрирует устойчивость показаний в пределах 10 рТ к изменению основных параметров (интенсивность оптической накачки и переменного поля, температуры рабочего

объема), заведомо превышающему их разумные эксплуатационные вариации. Наиболее заметным оказалось влияние мощности радиополя, вызывающего 4-квантовый резонанс. В связи с этим естественно рекомендовать новый магнитометр в качестве прибора стационарного базирования, поскольку в этом случае легко обеспечить постоянно действующей (нормальной) проекции вектора переменного поля  $H_1$  на направление измеряемого поля  $H_0$ .

## Список литературы

- [1] Александров Е.Б. // ОМП. 1988. Т. 55. № 12. С. 27–34.
- [2] Alexandrov E.B., Bonch-Bruevich V.A. // Opt. Eng. 1992. Vol. 31. P. 711.
- [3] Александров Е.Б., Бонч-Бруевич В.А., Якобсон Н.Н. // Опт. журн. 1993. № 11. С. 17–30.
- [4] Allen A.H. and Bender P.L. // J. Geomagn. Geoelectr. 1972. Vol. 24 (1). P. 105–125.
- [5] Pulz E., Linthe H.-J. and Best A. // Proc. VI Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Dourbes (Belgium), 1994. P. 7–13.
- [6] Александров Е.Б., Пазгалев А.С. Опт. и спектр. 1996. Т. 80. Вып. 4. С. 534–539.
- [7] Александров Е.Б., Пазгалев А.С., Рассон Ж.И. // Опт. и спектр. 1997. Т. 82. № 1. С. 14–22.
- [8] Beckmann A., Boeklen K.D., Elke D. // Z. Physik. 1974. Vol. 270. P. 173–186.
- [9] Cohen-Tannoudji C., Kastler A. // Progress in Optics. 1966. Vol. 5. P. 3–81.
- [10] Mathur B.S., Tang H., Happer W. // Phys. Rev. 1968. Vol. 171. P. 11–19.
- [11] Bulos B.R., Marshall A., Happer W. // Phys. Rev. 1971. Vol. A4. P. 51–58.
- [12] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешиов П.П. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 1. С. 588–596.