

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

1993 / 83

18/4-83  
P8-83-18

Д.П.Лазэр

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВИДОВ  
В ИЗМЕРЕНИЯХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ  
БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Направлено в журнал "Биофизика"

1983

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Скви́ды /сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики/ являются высокочувствительными устройствами, регистрирующими магнитный поток. Развитие измерительной техники, базирующейся на этих сверхпроводящих устройствах, привело, с одной стороны, к появлению усовершенствованных магнитометров, градиометров, измерителей восприимчивости, вольтметров, с другой стороны - открыло новые сферы их применения. Различные аспекты использования скивдов подробно описаны в литературе <sup>/1-3/</sup>.

Магнитометры на основе скивда в сочетании со сверхпроводящим соленоидом и экраном используются в настоящее время для измерения магнитной восприимчивости. Такие сверхпроводящие измерители обладают уникальной чувствительностью, высокой разрешающей способностью, большой скоростью измерения, стабильностью, а также минимальными ошибками измерения и удобством в работе. Исключительные возможности этих приборов обеспечиваются путем соединения высокой чувствительности и разрешающей способности скивда с хорошей стабильностью магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим соленоидом и дополнительно стабилизируемого сверхпроводящим экраном. Опыт последних лет показывает, что сверхпроводящие магнитометры со скивдом обладают большим потенциалом для исследования магнитных свойств материалов.

## 2. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СКВИДЫ

Сверхпроводящий высокочастотный скивид /ВЧ-скивид/ представляет собой сверхпроводящее кольцо с малой индуктивностью /обычно  $\sim 1$  см/, которое содержит один джозефсоновский переход и работает со смещением по высокочастотному току /рис.1а/. Высокочастотное смещение обеспечивается ВЧ-источником тока через катушку промежуточного контура  $L_T C_T$ , индуктивно связанную со скивдом. ВЧ-напряжение на промежуточном контуре усиливается, демодулируется, синхронно детектируется и возвращается в скивид в виде магнитного потока обратной связи.

Принцип работы ВЧ-скивдов подробно описан рядом авторов <sup>/4-7/</sup>. В основном скивид действует как "регулятор" амплитуды колебаний в промежуточном контуре, с которым он соединен. Уровень колебаний, на котором скивид рассеивает энергию, и, следовательно, ее "регулирует", составляет периодическую функцию приложенного магнитного потока  $\Phi_i$  /период равен кванту потока  $\Phi_0 = hc/2e = 2 \cdot 10^{-7}$  Мкс/. Таким образом, напряжение на промежуточном кон-

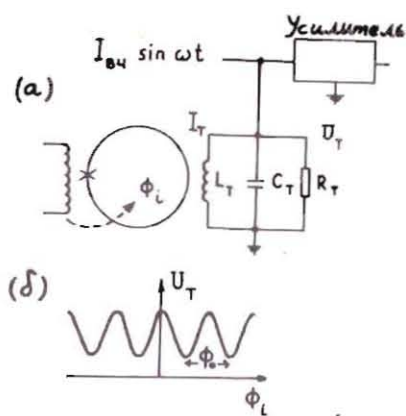


Рис.1. а - промежуточный контур, индуктивно связанный с ВЧ-сквидом; б - зависимость ВЧ-напряжения на контуре от приложенного потока  $\Phi_1$ .

туре представляет собой меру для  $\Phi_1$ . Выходной сигнал системы показан на рис.1б.

В практике используются разнообразные конструкции ВЧ-сквидов, но самые распространенные - точно-контактные устройства /рис.2/. Они изготавливаются из массивного ниобиевого цилиндра, при этом

джозефсоновский переход служит точечным контактом между двумя винтами из ниобия. Для обеспечения максимальной энергетической чувствительности ВЧ-сквид должен иметь как можно меньшую индуктивность и как можно большую взаимную индукцию с входной катушкой, служащей для введения внешнего тока. Такие условия /неполностью совместимые/, могут быть успешно выполнены с применением двухдырочного /рис.2б/ и тороидального /рис.2в/ точно-контактного ВЧ-сквида. Последний чрезвычайно прочен и самоэкранирован от флуктуации внешнего магнитного поля.

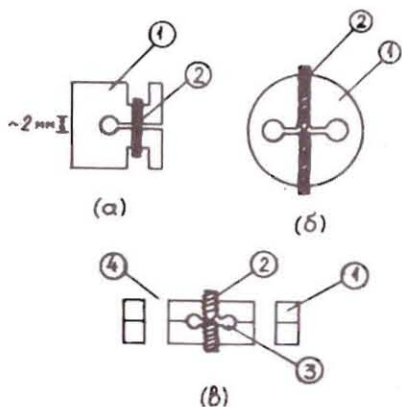


Рис.2. а - точно-контактный ВЧ-сквид; б - двухдырочный точно-контактный ВЧ-сквид; в - тороидальный точно-контактный ВЧ-сквид. 1 - корпус из ниобия; 2 - винты из ниобия; 3 - тороидальная полость; 4 - отверстие для укрепляющего винта.

### 3. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Сквиды сразу после их открытия использовались для измерения магнитных образцов. Первое измерение было проведено Циммерманом и др.<sup>18/</sup>, которые с помощью сквидов заметили квантованный магнитный поток, захваченный в массивном ниобии. Затем последовали

различные области применения сквидов, включая измерение флуктуаций диамагнитной восприимчивости сверхпроводников<sup>19,10/</sup>, ядерного парамагнетизма для термометрии очень низких температур<sup>15,11/</sup> и квантования потока в сверхпроводниках<sup>12/</sup>.

Первые магнитометры, применяемые для измерения намагничивания и магнитной восприимчивости в широком диапазоне температур, появились в 1972 г., а коммерческие установки - в 1974 г.<sup>13-17/</sup>. В дальнейшем в разных исследовательских лабораториях было создано новое поколение специализированных установок<sup>18-22/</sup>, используемых для различных измерений.

В принципе магнитометр или измеритель восприимчивости со сквидом состоит из сверхпроводящей приемной катушки  $L_p$ , расположенной в однородном магнитном поле и связанной со сквидом /рис.3/ через входную катушку  $L_1$ . Когда образец вводится в приемную катушку, исходное изменение потока  $\Delta\Phi_0$  детектируется сквидом.

Отклик сквида периодический и в данном случае неопределенный. Для того, чтобы устранить эту неопределенность и эффективно использовать чувствительность датчика, обычно сквид применяют в качестве нулевого детектора в токозапирающей цепи обратной связи. Модуляция сигнала переменным магнитным потоком с последующим синхронным детектированием и использование отрицательной обратной связи сводят до минимума влияние некоторых источников дрейфа и  $1/f$ -шума, таких, как изменение критического тока точечного контакта, дрейф величины термо-ЭДС на вводах криостата, а также  $1/f$ -шум предусилителя. На рис.3 представлена принципиальная схема относительно простого варианта системы с ВЧ-сквидом, работающим с частотой 20-30 МГц.

Высокочастотное смещение на резонансной частоте промежуточного контура  $L_T C_T$  подбирается таким образом, чтобы при всех значениях  $\Phi_1$  внешнего потока в сквиде режим работы ВЧ-сквида определялся точкой на первой ступени высокочастотной характеристики. В то же время на ВЧ-сквид действует дополнительный переменный модулирующий магнитный поток с частотой  $f_{mod}$  /обычно 100 кГц/ и двойной амплитудой  $\leq \Phi_0/2$ . Таким образом, ВЧ-напряжение на промежуточном контуре имеет амплитудную модуляцию. Это

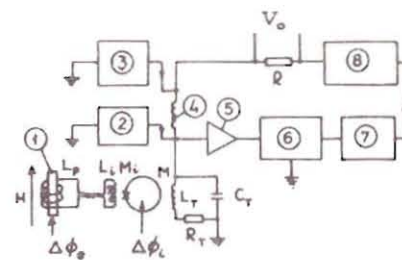


Рис.3. Блок-схема ВЧ-сквида токозапирающей системы. 1 - образец; 2 - ВЧ-генератор; 3 - звуковой генератор; 4 - ВЧ-дроссель; 5 - ВЧ-усилитель; 6 - демодулятор; 7 - синхродетектор; 8 - интегрирующий усилитель.



напряжение усиливается при помощи низкошумящего предусилителя с высоким входным сопротивлением. После дальнейшей усиления ВЧ-сигнал демодулируется, затем интегрируется. Сигнал на выходе ВЧ-интегратора содержит компоненты с частотами  $f_{mod}$  и  $2f_{mod}$ , амплитуды которых изменяются в зависимости от значения  $\Phi_1$ . Этот сигнал синхронно детектируется с опорной частотой  $f_{mod}$ , интегрируется, усиливается и возвращается в катушку  $L_T$  в виде магнитного потока обратной связи. Система обратной связи поддерживает полный поток в сквиде приблизительно равным либо  $n\Phi_0$ , либо  $(n + 1/2)\Phi_0$ , в зависимости от знака обратной связи:

$$MV_0/R + \Phi_1 \approx n\Phi_0/2,$$

где  $M$  - взаимдукция между сквидом и  $L_T$ ,  $R$  - сопротивление цепи обратной связи и  $V_0$  - напряжение, возникающее на  $R$ . Когда магнитный поток, приложенный к сквиду, изменяется на  $\Delta\Phi_1$ , в катушку  $L_T$  поступает ток обратной связи, который создает поток противоположного знака  $-\Delta\Phi_1$ . Таким образом, сквид всегда работает при постоянном магнитном потоке и служит нулевым детектором в цепи обратной связи. Этот тип устройства известен как ВЧ-сквид потокозапирающей системы, а если  $\Phi_1$  изменяется не очень быстро, то изменение напряжения  $\Delta V_0$  пропорционально  $\Delta\Phi_1$ .

На рис.4 дан эскиз универсального измерителя восприимчивости со сквидом, предназначенного для исследований в области физики твердого тела <sup>23/</sup>. Две сверхпроводящие приемные катушки ( $L_p$ )

в конфигурации Гельмгольца связаны с ВЧ-сквидом через сверхпроводящую полосковую линию. Образец помещается в дьюар, и тем самым изолируется от криогенной среды, в которой находятся катушки и сквид. Температура в дьюаре устанавливается с помощью потока газообразного гелия.

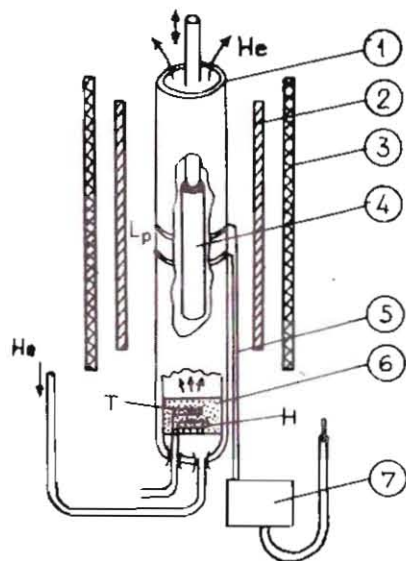


Рис.4. Универсальный измеритель восприимчивости на основе сквида. 1 - дьюар для образца; 2 - сверхпроводящий экран; 3 - сверхпроводящий магнит; 4 - образец; 5 - полосковая линия; 6 - пробка из пористой меди; 7 - ВЧ-сквид.

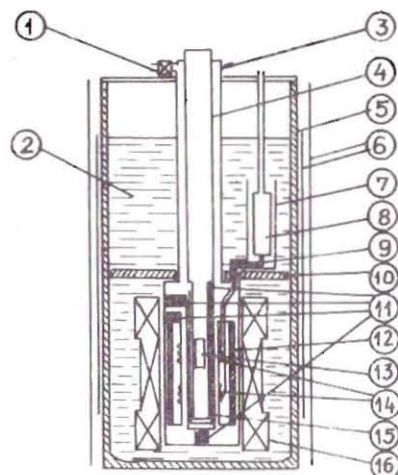


Рис.5. Схематический разрез измерителя восприимчивости Фило-Фербенка. 1 - диффузионный насос; 2 - жидкий гелий; 3 - вакуум-камера дьюара для образца; 4 - "теплая" камера; 5 - криостат; 6 - магнитные экраны; 7 - экран для магнитометра из Pb; 8 - магнитометр с ВЧ-сквидом; 9 - провода для сигнала; 10 - магнитный шунт; 11 - регуляторы температуры; 12 - экран из Nb<sub>3</sub>Sn; 13 - образец; 14 - приемные катушки; 15 - тепловой экран; 16 - сверхпроводящий магнит.

Гелий проходит через пробку из пористой меди, снабженную нагревателем /H/ и термометром /T/. Температура образца легко изменяется от 1,5 до 300 К или больше. Измерение восприимчивости или намагниченности производится легко и быстро. Что касается объемной восприимчивости, то можно получить разрешение  $3 \cdot 10^{-11}$  ед. СГСМ для образца объемом 0,4 см<sup>3</sup>, в магнитном поле 1 кГс.

Поля до 30 кГс обеспечиваются сверхпроводящим соленоидом, который работает в замкнутом режиме. Поле дополнительно стабилизируется сверхпроводящим экраном /цилиндр из NbTi/, охлажденным до сверхпроводящего состояния после приложения к нему поля. Этот экран также осуществляет изоляцию образца от внешних магнитных полей. Соленоид, экран и приемные катушки жестко смонтированы между собой для устранения фонового шума.

Измеритель восприимчивости расположен внутри гелиевого криостата из немагнитных материалов /фибергласс или алюминий/, который позволяет работать в течение недели без подлива жидкого гелия. Образец /кристалл, порошок или жидкость/, помещенный в кварцевую трубку, вводится в дьюар через воздушный шлюз, находящийся в верхней части дьюара, так что держатель образца можно откачать до его введения в дьюар. Трубка с образцом прикрепляется к концу стержня, который через о-ринг-уплотнение вводится в дьюар. Другой конец стержня связан с гидравлическим устройством, при помощи которого положение образца можно плавно менять в том или другом направлении.

Фило и Фербенк <sup>22/</sup> создали установку для уменьшения источников шума, ограничивающих чувствительность обычных измерителей восприимчивости. Некоторые детали их установки, предназначенной



для биофизических экспериментов и измерений при комнатной температуре, показаны на рис.5. Здесь достигнуты два важных усовершенствования, а именно: 1/ температура холодных поверхностей между образцом и приемными катушками очень хорошо регулируется; 2/ сверхпроводящий магнит создает достаточно однородное поле, сокращающее микрофонный шум. Благодаря этим усовершенствованиям получено разрешение  $7 \cdot 10^{-13}$  ед. СГСМ для объемной восприимчивости, т.е. на два порядка величины лучше, чем в большинстве других установок.

Используя точный периодический отклик сквида, Фило и Фербенк получили точность 0,0001% относительно значения диамагнитной восприимчивости чистой воды, время отклика приблизительно равнялось 300 мкс.

#### 4. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

ВЧ-сквид потокозапирающей системы, описанный выше, может использоваться для высокоточных измерений изменения намагниченности образцов в однородном магнитном поле. Пример этого показан на рис.6. Образец помещается в одну из катушек астатической пары  $(N_p, L_p)$  витков, индуктивность  $L_p$  каждого/, которая вместе с входной катушкой /индуктивность  $L_1$ / сквида составляет сверхпроводящий трансформатор магнитного потока. Магнитное поле, "замороженное" в сверхпроводящем экране, окружающем астатическую пару, вызывает статическую намагниченность образца. Ток  $i$  в трансформаторе, возникающий при изменении статической намагниченности образца, порождает изменение среднего магнитного потока в сквиде, а это, в свою очередь, компенсируется током отрицательной обратной связи. Если абсолютная величина восприимчивости образцов достаточно мала, ток обратной связи пропорционален изменению намагниченности.

Конструкция, показанная на рис.6, позволяет измерять величину изменения намагниченности, создаваемого или путем введения образца в приемную катушку, или изменением температуры образца. Астатическая пара уменьшает чувствительность прибора к внешним эффектам, а также устраняет влияние изменений намагниченности материалов, используемых в конструкции измерителя восприимчивости.

Самая большая чувствительность системы наблюдается в случае максимальной связи потока в сквиде. Клаасен [24] подробно анали-

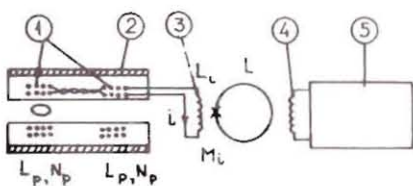


Рис.6. Конструкция, используемая для измерения намагниченности образцов. 1 - астатическая пара; 2 - трубка из Nb; 3 - входная катушка; 4 - ВЧ-катушка; 5 - потокозапирающая система.

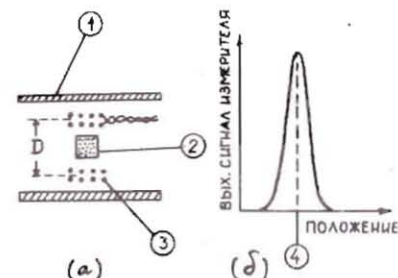


Рис.7. Геометрическое упорядочение /а/ и ответ измерителя восприимчивости /б/, когда малый образец передвигается через приемную катушку. 1 - трубка из Nb; 2 - образец с объемом  $V$ ; 3 - приемная катушка; 4 - центр катушки.

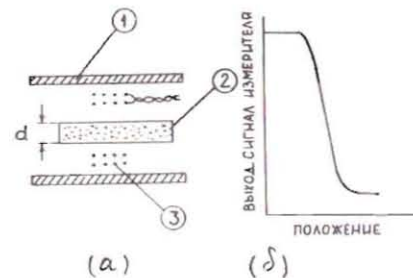


Рис.8. Геометрическое упорядочение /а/ и ответ измерителя восприимчивости /б/, когда длинный образец извлекается из приемной катушки. 1 - трубка из Nb; 2 - образец с диаметром  $d$ ; 3 - приемная катушка.

зирует трансформаторы потока /рис.6/. Условие максимальной эффективности потока имеет вид:

$$2L_p = L_1$$

и приводит к следующему выражению для изменения потока в сквиде:

$$\Delta\Phi_1 = k(N_p L_1^{1/2} / 2\sqrt{2}L_p^{1/2}) \cdot \Delta\Phi_e,$$

где  $\Delta\Phi_e$  - изменение магнитного потока в приемной катушке.

Точное вычисление потока  $\Delta\Phi_e$  затруднено, но можно получить приближительные решения в случае двух предельных геометрических упорядочений, показанных на рис.7а и 8а.

В первом варианте /7а/ образец представляет собой небольшую сферу, эллипсоид или цилиндр с диаметром, равным его высоте. В этом случае, если длина приемных катушек мала по сравнению с диаметром, то

$$\Delta\Phi_e = 4\pi\chi NV/D,$$

где:  $\chi$  и  $V$  - восприимчивость и объем образца, а  $D$  - средний диаметр катушек. Для слабых магнитных образцов  $N$  постоянно и равно магнитному полю, первоначально замороженному в сверхпроводящем экране. Если образец настолько мал, что может считаться точечным магнитным диполем, то при прохождении его через приемную катушку на выходе измерителя восприимчивости будет дан



сигнал, показанный на рис.76. Этот сигнал можно калибровать по магнитному моменту эталонной катушки, зная точно размеры катушки и величину тока в ней. Таким образом можно измерить абсолютную величину суммарного магнитного момента образца.

При втором геометрическом упорядочении /рис.8а/ образец имеет форму цилиндра, длина которого много больше размера приемной катушки. В этом случае:

$$\Delta\Phi_{\theta} = \pi^2 d^2 \chi H,$$

где  $d$  - диаметр цилиндра. Для таких длинных образцов можно определять магнитный момент на единицу длины, поскольку выходной сигнал измерителя восприимчивости есть сумма ответов дипольного типа. Когда образец извлекается из катушки, выходной сигнал будет таким, как показано на рис.8б. Отклонение пропорционально восприимчивости образца. Этот тип ответа можно калибровать по абсолютной величине с помощью длинного соленоида, размеры которого точно известны.

Наконец, одним из самых важных качеств измерителя восприимчивости является его способность чувствовать наименьшие изменения намагниченности  $\Delta M$  даже в присутствии большой статической намагниченности. Так, если образец находится в приемной катушке и температура его повышается, можно измерить  $\Delta M/\Delta T$ . Пример такого типа измерений приведен на рис.9. Кривая на рисунке представляет собой температурную калибровку с помощью стандартного образца из чистого Pb, с использованием сверхпроводящего перехода в очень слабых магнитных полях<sup>/3/</sup>. Температуру можно поддерживать постоянной на криогенном уровне в пределах меньше, чем  $\pm 1$  мК. Воспроизводимость ее равна приблизительно 1 мК.

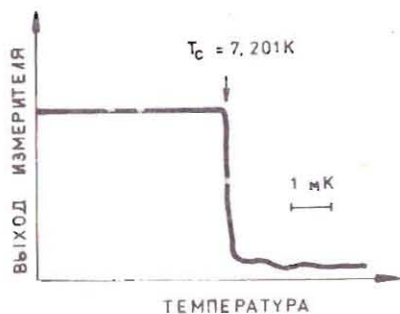


Рис.9. Ответ измерителя восприимчивости, когда образец из Pb находится неподвижно в приемной катушке, в то время как температура повышается, проходя через  $T_c$ .

## 5. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Крайне высокая чувствительность, большая точность магнитометров со сквидами и их хорошее быстродействие позволяют проводить магнитные измерения на важных биологических объектах и слабо-

магнитных материалах. Ниже будет рассмотрено несколько примеров таких измерений.

Специальный магнитометр<sup>/25/</sup> с коммерческим двухдырочным ВЧ-сквидом был использован в температурном диапазоне  $2 \div 100$  K и в магнитных полях до 700 Гс для изучения температурной зависимости магнитной восприимчивости образцов из оксигемоглобина ( $HbO_2$ ) и карбоксигемоглобина ( $HbCO$ )<sup>/26/</sup>. На фоне диамагнетизма образцов и парамагнетизма, обусловленного 4% аутоокисленным гемоглобином, в  $HbO_2$  обнаруживался дополнительный магнитный вклад, зависящий от температуры. Такого вклада не было в  $HbCO$ . На рис.10 приведена восприимчивость образцов  $HbO_2$  в зависимости от обратной температуры ( $1/T$ ). Сплошная линия соответствует расчету молярной восприимчивости для последовательности синглет-триплетных электронных спиновых уровней. Соответствие с экспериментальными данными указывает на существование у  $HbO_2$  возбужденного частично заполненного состояния со спином  $S=1$  и с энергией возбуждения, приблизительно равной  $17$  см<sup>-1</sup>.

Оуэн и др.<sup>/27/</sup> измерили магнитную восприимчивость при низких температурах замороженных водных растворов цитрохрома разных концентраций. Результаты измерений для образцов с концентрациями  $1,5 \pm 0,01$  и  $3,5 \pm 0,1$  ммоль, из которых больше, чем 99%, было в окисленной форме, приведены на рис.11. Видно, что эффективное число магнетонов Бора,  $n_{eff}$ , показывает малую или нулевую температурную зависимость, как и можно было ожидать для таких низкоспиновых  $S=1/2$  гемопротеинов. Предельное значение для  $n_{eff}^2$  при низких температурах -  $4,0 \pm 0,4$ . Это согласуется со значением 3,98, предсказанным на основании измерения электронного парамагнитного резонанса. Погрешность измерений будет большей в случае разбавленных образцов вследствие невоспроизводимости фона.

Магнитная восприимчивость водных растворов лизоцима в слабых магнитных полях была измерена с помощью ВЧ-сквида<sup>/28/</sup>. Созданная установка имеет высокую чувствительность  $2 \cdot 10^{-9}$  ед. СГСМ

и может работать на очень слабых малых полях в широком диапазоне температур. На рис.12 представлены результаты измерений для двух водных растворов лизоцима с разными концентрациями, в одном экспериментальном объеме. Восприимчивость этого

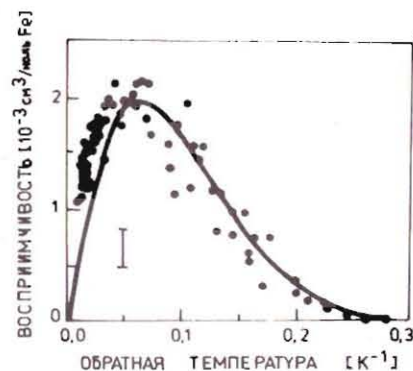


Рис.10. Восприимчивость оксигемоглобина в зависимости от обратной температуры. Вертикальный отрезок обозначает погрешность измерений.



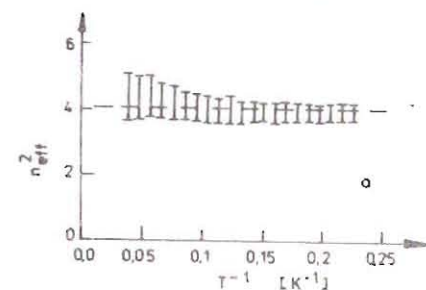
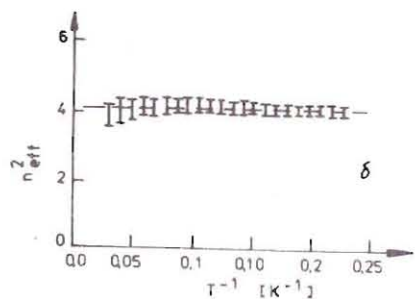


Рис.11. Температурная зависимость эффективного числа магнетонов Бора окисленного цитохрома двух концентраций: /а/ 1,05 ммоль; /б/ 3,5 ммоль.

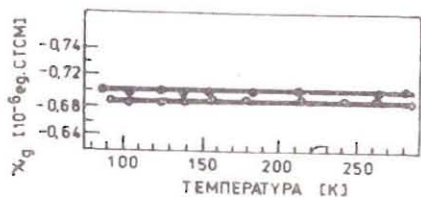


Рис.12. Удельная магнитная восприимчивость для двух водных растворов лизоцима с разной концентрацией: (●) 10%; /О/ 1% г на объем.

ловое равновесие между основным состоянием синглета и возбужденным состоянием триплета для двух электронов гема.

раствора не зависит от температуры, а ее значения равны  $0,697 \pm 0,004 \cdot 10^{-6}$  ед. СГСМ для 10% концентрации и  $0,686 \pm 0,004 \cdot 10^{-6}$  ед. СГСМ для 1% концентрации. Эти цифры хорошо согласуются с опубликованным значением для льда  $0,683 \cdot 10^{-6}$  ед. СГСМ, указывая на то, что лизоцим имеет удельную восприимчивость приблизительно на 10% большую, чем лед. Такое значение совместимо с менее точными данными, полученными теми же авторами при измерениях гидратных порошков методом Фарадея.

С целью обнаружения небольшой разницы между  $\text{HbO}_2$  и  $\text{HbCO}$  Сердонио и др.<sup>/29/</sup> измерили восприимчивость замороженных водных растворов гемоглобина крови человека в температурном диапазоне 25-250 К. Результаты этих магнитных измерений в зависимости от обратной температуры показаны на рис.13. Знаки (○) относятся к  $\text{HbO}_2$ , который находится в равновесии с воздухом при концентрации гема 9,6 ммоль, а (●) обозначает  $\text{HbCO}$  в равновесии с 1 атм. окиси углерода при концентрации гема 10,6 ммоль. Из графика видно, что  $\text{HbCO}$  - диамагнитный со слабым парамагнитным вкладом Кюри, количественно объясняемым наличием 0,85% метагемоглобина в низкоспиновом состоянии. В свою очередь,  $\text{HbO}_2$  имеет зависящее от температуры поведение, которое можно теоретически объяснить /сплошная кривая на рис.13/, если считать существующим теп-

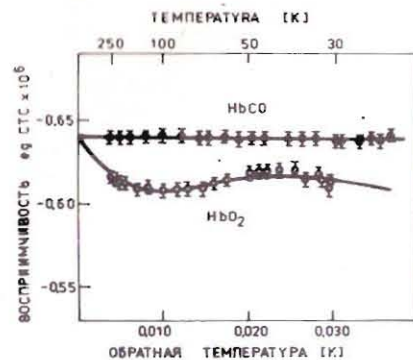


Рис.13. Магнитная восприимчивость окси- и карбоксигемоглобина крови человека в зависимости от обратной температуры.

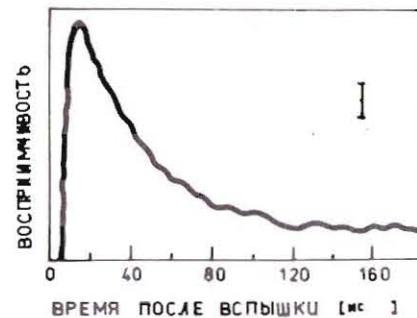


Рис.14. Изменение магнитной восприимчивости после импульсного фотолиза карбоксигемоглобина /среднее для 64 переходных характеристик/. Вертикальный отрезок показывает чувствительность измерений:  $\Delta\chi = 5 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСМ.

Сердонио<sup>/30/</sup> анализирует преимущества использования высокочувствительных магнитометров со сквидом при изучении диамагнитных свойств металло-протеинов или магнитного момента металлических ионов для выявления структуры и функций протеинов. Дается несколько примеров /гемоглобин и гемоцианин/ со ссылками на недавние экспериментальные исследования.

Большое значение имеет быстрое действие /приблизительно 300 мкс<sup>/22/</sup> /измерителя восприимчивости с ВЧ-сквидом в случае импульсного фотолиза. В одном из таких экспериментов кинетика реассоциации окиси углерода в гемоглобине после импульсной фотодиссоциации контролировалась путем наблюдения временного изменения восприимчивости<sup>/31/</sup> /рис.14/. Кинетические параметры, полученные этим методом, хорошо согласуются с теми же параметрами, полученными оптическим методом. Важно, что кинетические изменения магнитного момента содержат более прямые сведения о молекулярном состоянии гемоглобина, потому что спиновое состояние железа связано с его движением внутри и вне плоскости гема. Изучение кинетики при низких температурах и высоком временном разрешении позволит, таким образом, установить последовательность структурных изменений протеина после фотолиза лиганда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gallop J.C., Petley V.W. J.Phys. E, 1976, 9, p. 417.
2. Кларк Дж. В кн.: "Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применения" /под ред. Б.Б.Шварца и С.Фонера/, "Мир", М., 1980, с. 7-65.

3. Deaver B.S., jr., Bucelot T.J., Finley J.J. AIP Conf. Proc., 1978, 44, p. 58.
4. Zimmerman J.E., Thiene P., Harding J.T. J.Appl.Phys., 1970, 41, p. 1572.
5. Giffard R.P. et al. J.Low Temp.Phys., 1972, 6, p.533.
6. Jackel L.D., Buhrman R.A. J. Low Temp. Phys., 1975, 19, p. 201.
7. Васильев Б.В., Гребинник В.Г., Симкин В.Г. ОИЯИ, P13-6942, Дубна, 1973.
8. Zimmerman J.E., Mercereau J.E. Phys.Rev.Lett., 1964, 13, p. 125.
9. Gollub J.P. et al. Phys.Rev.Lett, 1969, 22, p. 1288.
10. Lukens J.E., Wartburton R.J., Webb W.W. Phys.Rev.Lett., 1970, 25, p. 1180.
11. Goodkind J.M., Stolfa D.L. Rev.Sci.instrum., 1970, 41, p. 799.
12. Goodman W.L. et al. Phys.Rev.B, 1971, 4, p. 1530.
13. Hoenig H.E., et al. In: "Proc. of the Applied Supercond Conf.", Annapolis, Maryland, 1972, (IEEE Pub. No. 72-CHO 682-5-TABSC, 1974), p. 570.
14. Cerdonio M. et al. In: "Proc. Low Temp.Phys.Conf., LT 13, 1972)", (ed. E.Timmerhaus, Plenum, New York, 1974), p. 525.
15. Day E.P. ibid., p. 550.
16. Заварицкий Н.В., Ветчинкин А.Н. ПТЭ, 1974, 1, с. 274.
17. Cukauskas E.J., Vincent D.A., Deaver B.S. jr. Rev.Sci. Instrum, 1974, 45, p. 1.
18. Cerdonio M., Messana C. IEEE trans. Mag., 1975, 11, p. 728.
19. Fickett F.R., Sullivan D.B. J.Phys.F., 1974, 4, p. 900.
20. Cerdonio M. et al. Rev.Sci.Instrum., 1976, 47, p. 1.
21. Gramm K., Lundgren L., Beckman O. Physica Scripta, 1976, 13, p. 93.
22. Philo J.S., Fairbank W.M. Rev.Sci.Instrum., 1977, 48, p. 1529.
23. O'Connor C.J., Deaver B.S. jr., Sinn E. J.Chem.Phys., 1979, 70, p. 5161.
24. Claasen J.H. J.Appl.Phys., 1975, 46, p. 2268.
25. Dawson J.W. et al. Biochemistry, 1972, 11, p. 461.
26. Hoenig H.E., Gersonde K. In: "Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications", (Ed. H.D.Hahlbohm et al., Berlin, 1977), p. 249.
27. Owen C.S., Jaffe E.K., Wilson D.F. Rev.Sci. Instrum., 1977, 48, p. 1541.
28. Careri G., et al. Phys.Lett., 1977, 60A, p. 490.
29. Cerdonio M., et al. Proc.Natl.Acad.Sci. USA, 1977, 74, p. 398.
30. Cerdonio M. IEEE Trans.Magn., 1979, 15, p. 943.
31. Philo J. Proc.Natl.Acad.Sci. USA, 1977, 74, p. 2620.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 января 1983 года.

Лазар Д.П.

P8-83-18

Использование сквидов в измерениях магнитных свойств биологических объектов

Описывается прибор для измерения магнитной восприимчивости с помощью магнитометра на основе сквида и техника измерений на нем. Приводится обзор экспериментальных работ по исследованию магнитных свойств биологических объектов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Lazar D.P.

P8-83-18

Application of Squids in Measurements of Magnetic Properties of Biological Objects

The equipment and methodology used to measure the magnetic susceptibility by making use of the Squids magnetometers are described. Some of the experimental measurements of the magnetic properties of biological materials are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.