



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.А. Михайличенко

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПОЛЯ  
В МАЛОАПЕРТУРНЫХ СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

ИЯФ--

ПРЕПРИНТ 89-94



НОВОСИБИРСК

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР**

**А.А. Михайличенко**

**ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПОЛЯ  
В МАЛОАПЕРТУРНЫХ СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ**

**ПРЕПРИНТ 89-94**

**НОВОСИБИРСК**

**1989**

## Об измерении поля в малоапертурных системах электронной оптики

*А.А. Михайличенко*

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

### А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассмотрен способ измерения распределения поля в малоапертурных магнитных элементах электронной оптики с помощью висмутовой проволоочки. В качестве объекта измерений использовалась квадрупольная линза с постоянными магнитами, имеющая диаметр вписанной окружности 4 мм и продольную длину 40мм. Измеренный градиент составил 38 кГс/см. Достигнутая точность измерений позволяет определить положение магнитной оси линзы с точностью не хуже 1 мкм. Метод измерения может оказаться полезным при тестировании магнитных элементов линейных коллайдеров.

## Low Aperture Magnetic Elements Measurements

*A.A. Mikhailichenko*

Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, USSR

### А B S T R A C T

In this work the method of the field measurements with help of Bismuth wire in low aperture magnetic elements is revised. The quadrupole with permanent magnets was tested. It has aperture diameter about 4 mm and lenth 40 mm. Gradient about 38 kOe/cm was measured. The accuracy of the magnetic axis position definition is better than 1 mikrometer. This method is good candidate for linear collider low aperture magnetic elements measurements.

---

Применение висмутовой проволочки для измерения магнитного поля известно давно [1]. В дальнейшем датчики такого рода неоднократно использовались при магнитных измерениях [2, 3].

Одной из привлекательных особенностей измерителя, использующего эффект Гаусса — магнитной чувствительности сопротивления, является возможность снятия интегральных характеристик магнитного поля при апертурных ограничениях. По-существу диаметр проволочки и определяет минимальный размер апертуры.

Использование малоапертурных линз вытекает из необходимости обеспечить градиент в десятки кГс/см для получения длин волн бетатронных колебаний порядка 5—70 метров при энергии от десятков ГэВ до 1 ТэВ [4], что требуется при реализации БНС-метода [5]. Немного меньшим оказывается градиент фокусирующих линз в методе подавления поперечной неустойчивости ускоряемого сгустка с помощью дополнительной фокусировки ВЧ-полями [4].

Наличие осевой симметрии позволяет наиболее просто и адекватно применять проволочку в качестве датчика, протягивая ее по оси линзы, совпадающей с направлением движения частиц. В этом случае осуществляется осреднение поля в поперечном направлении на размере диаметра проволочки, порядка 0.1 мм, а в продольном направлении проволочка находится в поле практически постоянной величины, если не принимать во внимание характер спада поля на продольных краях. Особенно полезным оказывается применение проволочного датчика для поиска магнитной оси линзы, а поперечное распределение магнитного поля получается при параллельном смещении проволочки. Вышеупомянутое осреднение поля в поперечном направлении на размере диаметра проволочки не мешает

точному нахождению оси линзы как по минимуму сигнала, так и по аппроксимации хода поля при поперечном смещении проволоочки.

Рассмотрим модельный вариант зависимости проводимости от поля. Сопротивление проволоочки длины  $l$ , помещенной в магнитное поле определяется как

$$R^{-1} = \int \frac{da^2}{rl},$$

где интеграл берется по поперечному сечению,  $a$  — радиус проволоочки, а  $r = r(B)$  — удельное сопротивление, зависящее от магнитного поля [7]:

$$r = r_0(1 + AB^n(r)),$$

$A = \text{const}$ ,  $r_0$  — удельное сопротивление в отсутствие поля.

В малых полях, когда  $\mu B \ll 1$ ,  $n = 2$ , а в сильных полях, когда  $\mu B \gg 1$ ,  $n = 1$ . здесь  $\mu = v/E = e\bar{t}/m^*$  — подвижность электронов в материале,  $m^*$  — эффективная масса,  $\bar{t}$  — среднее время между столкновениями. Для  $B = Gr$ , т. е. в поле квадрупольной линзы, имеем

$$R^{-1} = \frac{\pi}{r_0 l A G^2} \ln(1 + A G^2 a^2).$$

При малых  $G$  получаем обычную зависимость  $R^{-1} = \frac{\pi a^2}{r_0 l}$ . В этом смысле упоминавшаяся продольная неоднородность поля на краях также не влияет на точность нахождения оси.

Широкое использование магниторезистивных датчиков из висмута ограничивается, однако, их высокой термочувствительностью, а также нелинейностью сопротивления при малом уровне поля. Ввиду того, что измерения при малой апертуре квадрупольной линзы можно проводить, используя лишь единственную прямолинейную проволоочку, абсолютное изменение сопротивления оказывается достаточно малым. При этом для получения заметной величины сигнала приходится пропускать через проволоочку ток, нагревающий ее на несколько десятков градусов и могущий сдвинуть ход калибровочной кривой сигнал — поле.

В этом проявляется существенное отличие от [3], где соответственно задаче магнитных измерений, возможно использовать проволоочку, намотанную на катушку заметных размеров, а интерпретиро-

вать сигнал как относящийся к одной точке. Температура датчика стабилизируется специальной системой с точностью до сотых долей градуса. Большая длина проволоки обеспечивает большое абсолютное изменение сопротивления.

К несомненным преимуществам измерителя, содержащего единственную проволоку, относится легкость отсчета реального ее расположения в пространстве оптическими методами с последующей привязкой к корпусу линзы.

В настоящей работе предпринята попытка обойти трудности теплового режима работы проволоки импульсным питанием при стабилизации *средней* мощности, выделяемой в проволочке программно по измеряемому сопротивлению с автоматическим учетом нелинейного характера зависимости сопротивления от величины поля, определяемой по предварительной калибровке в известном поле. Именно, ток по проволочке пропускается короткое время порядка нескольких десятков миллисекунд, так что температура не успевает нарасти существенно, а ее рост в течение импульса тока учитывается при калибровке в известном поле при неизменных условиях возбуждения. Изменение сопротивления под влиянием внешнего магнитного поля приводит к тому, что в проволочке начинает выделяться в среднем разная мощность, что приводит к изменению температуры корпуса и держателя. Для устранения этого явления изменяется скважность в подаче импульсного питания проволочки, так чтобы *средняя* мощность тепловыделения оставалась постоянной. В течение времени, когда на проволочку подается напряжение, и происходит отсчет показаний.

Для начала в качестве справочных данных приведем физические характеристики висмута [6]:

плотность	9.747 г/см <sup>3</sup> ;
коэффициент линейного расширения	$1.35 \cdot 10^{-5}$ 1/град;
температура плавления	273.1 град;
температура кипения	1420. град;
коэффициент теплопередачи	0.18 кал/см/с/град;
теплоемкость	0.031 кал/гр/град;
модуль продольной упругости	$3.19 \cdot 10^{10}$ Ньютон/м <sup>2</sup> ;
удельное сопротивление	$1.14 \cdot 10^{-4}$ Ом·см;
термочувствительность сопротивления	$4.2 \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Отметим важность работы проволочки при малом токе. Например, повышение температуры проволочки сопротивлением  $R$  при токе  $I$  ампер за время  $t$  есть  $T=0.24I^2Rt/(mc)$ , где  $m$ —масса

проволочки,  $c$  — теплоемкость, а  $T$  — величина повышения. Таким образом, для тока 0.1 А за 10 мс нагрев составляет 1 градус при длине проволочки 10 см. Для шумов  $1/f$ , так называемых шумов Монтомгери, также характерна квадратичная зависимость от тока [7]:  $\bar{\epsilon}^2 = bI^2 \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$ , где  $(f_2 - f_1)$  — полоса частот,  $b$  — коэффициент пропорциональности. Такую же зависимость от тока имеет дробовая ЭДС. В свою очередь работа при малом токе приводит к тому, что уровень сигнала также становится малым, так что в каждой конкретной схеме приходится находить компромисс.

На рис. 1 представлена общая схема измерительной аппаратуры. Стабилизированный источник напряжения  $U$  через ключ,

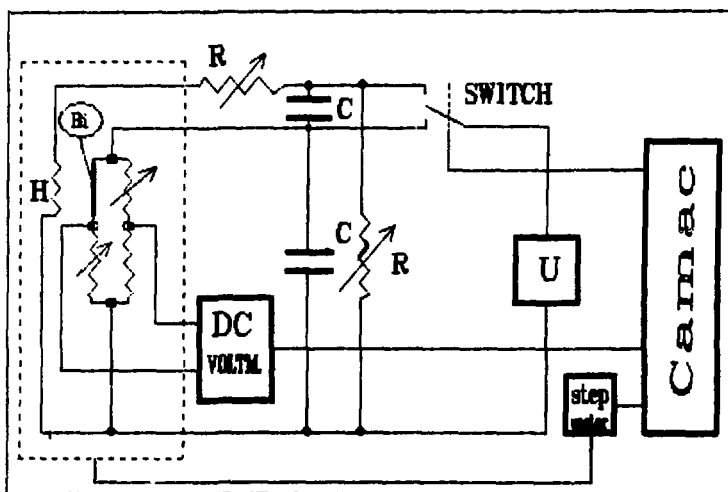


Рис. 1. Схема измерительной аппаратуры.

управляемый от ЭВМ, питает либо мостовую схему с висмутовой проволочкой в диагонали, либо подключается к балластному сопротивлению  $R$  с параллельно подключенному нагревателю  $H$ . Сопротивления моста, дополняющие висмутовую проволочку, имеют равные ей значения и располагаются вблизи проволочки на перемещаемом держателе. Мост балансируется при отсутствии внешнего поля (точнее при земном поле). В качестве измерителя напряжения используется цифровой вольтметр, выполненный в стандарте САМАС. Этот интегрирующий вольтметр имеет квант, зависящий от времени интегрирования. Работой схемы управляет микро-ЭВМ.

Схема работает следующим образом:

При каждом положении проволоочки производится переключение ключа, и на мостовую схему подается напряжение от стабилизированного источника напряжения. После выдержки времени для устранения влияния дребезга контактов около 2 мс, производится отсчет сигнала дисбаланса моста. Полное время подачи напряжения на проволочку менее 80 мс. Затем переключается ключ, включается шаговый двигатель и проволочка перемещается в новую позицию. Емкости служат для уменьшения выбросов при переключении. Подогреватель *H* используется для установки начальной температуры держателя проволочки. Линза и датчик располагаются в теплоизолирующем контейнере. Перемещение датчика осуществляется с помощью шагового двигателя, с минимальным шагом 1.0 мкм, согласованного с работой вольтметра и ключа под управлением программы. Время между отсчетами 5 с.

Показание вольтметра в каждой точке записывается в отдельный массив, с которым в дальнейшем и проводится работа.

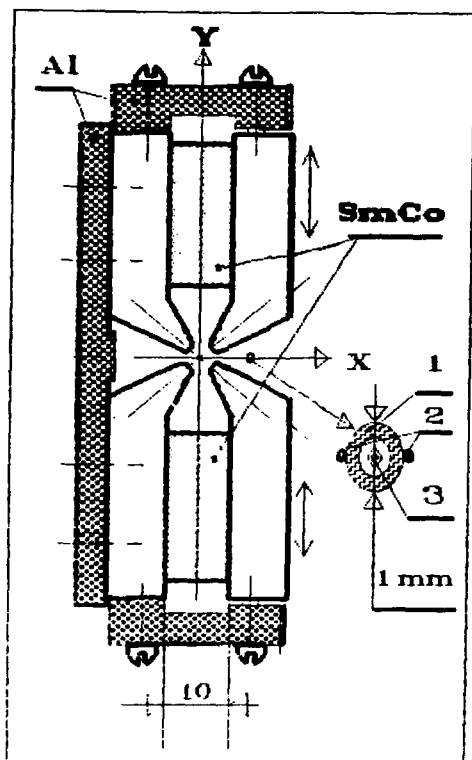


Рис. 2. Поперечный разрез квадрупольной линзы.



На рис. 2 представлен поперечный разрез квадрупольной линзы, с которой проводились измерения. Линза изготовлена специально для проведения экспериментов с проволочным датчиком. Здесь же представлено поперечное сечение датчика. Керамическая или стеклянная трубочка 1 с приклеенными проволочками подогревателя 2 содержит висмутовую проволочку 3, покрытую изоляцией.

Для датчика была изготовлена проволочка из поликристаллического висмута диаметром 0.1 мм. Концы проволочки закрепляются на концах трубочки в специальных держателях обжимкой или пайкой. Для пайки применялся низкотемпературный сплав Роуза. Перед закреплением проволочка натягивается. Держатели имеют специальные отверстия для наблюдения за проволочкой на входе в трубочку и при выходе из нее.

Сама линза (рис. 2) образована двумя плитками из SmCo, имеющими поперечную намагниченность, и четырьмя полюсными наконечниками, концентрирующими магнитный поток к оси симметрии линзы. Конструкция допускает относительные смещения полюсов. Длина линзы в продольном направлении (ось Z) составляет 40 мм.

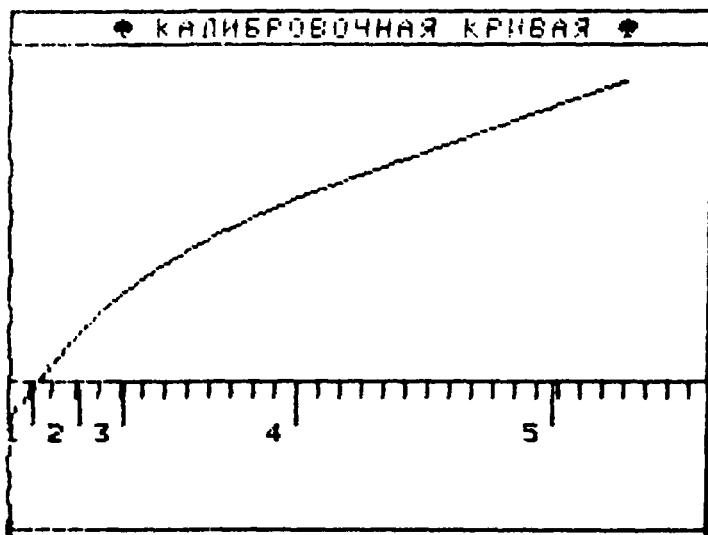


Рис. 3. Зависимость сопротивления отрезка проволочки от величины магнитного поля.

Соответствующие точки на кривой имеют значения:

точки:	1	2	3	4	5
$B, \text{ Э}$	1	500	950	2000	3000
$R, \text{ Ом}$	7.94	7.96	7.99	8.08	8.22

Для предварительной калибровки был изготовлен электромагнит с межполюсным зазором 2 мм. Поле в межполюсном пространстве магнита промерялось с помощью компактного датчика Холла. Длина полюса магнита по проволочке была выбрана равной длине полюсного наконечника квадрупольной линзы в том же направлении: 40 мм. Это сделано с целью упростить расчет эффективной длины проволоки, находящейся в магнитном поле, а межполюсной зазор примерно соответствует минимальному зазору для квадрупольной линзы.

На рис. 3 представлена зависимость сопротивления отрезка проволочки от величины магнитного поля. Проволочка запитывалась от *генератора тока* через систему коммутации, и измерялось непосредственно напряжение на ее концах. По этому графику определяется величина коэффициента в формуле зависимости относительной проводимости от величины магнитного поля при малом уровне последнего:  $A = 7.0 \cdot 10^{-9} \text{ 1/Гс}^2$ , хотя, как видно, график не укладывается только на квадратичный закон зависимости. Для аппроксимации хода кривой применялся полином четвертой степени до точки 4, а выше применялась линейная аппроксимация.

Для дальнейшей работы осуществлялась калибровка всей мостовой системы по полной схеме.

На рис. 4 представлены показания вольтметра при отсутствии магнитного поля. Здесь и на последующих рисунках число точек измерения равно 256. Один квант сигнала соответствует 15 Э. При повышении поля соответствие кванта вольтметра кванту измеряемого поля уменьшается, как это видно из рис. 3, что является следствием нелинейной зависимости сопротивления от поля вплоть до точки 4, где квант соответствует 0.2 Э. Относительная точность составляет при этом  $0.2/2000 = 10^{-4}$ . Так как поле порядка 2000 Э достигается на расстоянии  $2 \text{ кЭ}/38 \text{ кЭ/см} = 0.52 \text{ мм}$ , то это соответствует возможной точности нахождения оси:  $0.52 \times 10^{-4} = 0.05 \text{ мкм}$ .

В дальнейшем измерения поля линзы проводились с регулярной проверкой дрейфа нуля.

На рис. 5 представлено поперечное распределение поля при первоначальной выставке полюсов линзы. Стартовое положение проволочки находится со стороны алюминиевого держателя. При измерениях проволочка проходит центр линзы и выходит наружу. Поле в точке минимума составляет 461.3 Гс. Максимальная вели-

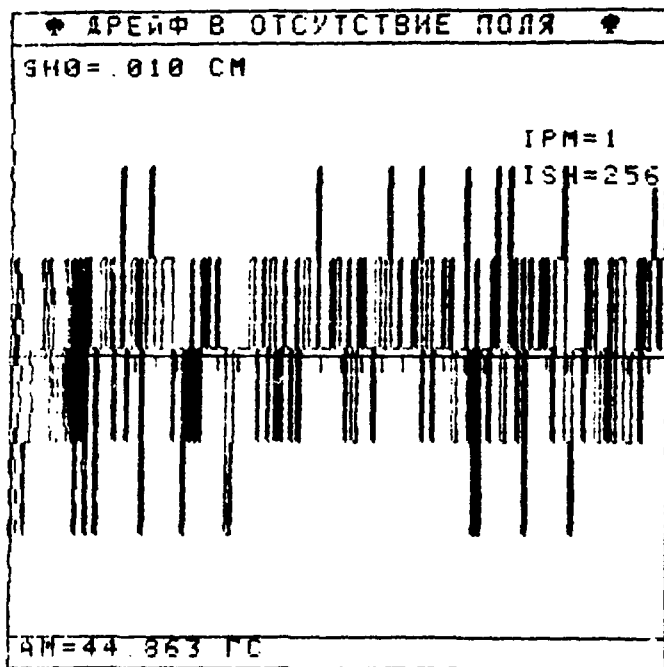


Рис. 4. Показания вольтметра при отсутствии магнитного поля.  
 Величина кванта 62.5 микровольта.

чина поля 8183.4 Гс в точке номер 68. Градиент, вычисленный по показаниям в точках 75 и 92 составляет 38.60 кГс/см.

На рис. 6 представлено поперечное распределение поля после коррекции положения полюсов линзы. Поле в точке минимума составляет 325.3 Гс. Максимальная величина поля составляет 8361.4 Гс в точке номер 50. Градиент, вычисленный по показаниям в точках 60 и 75 составляет 38.23 кГс/см. Отличие точек максимума и минимума на рис. 5 и 6 обусловлено разным стартовым положением проволоочки.

Для дальнейшего применения можно сделать следующие замечания:

При использовании датчика в реальных системах электронной оптики, вероятно, придется иметь дело с более длинными линзами, чем 40 мм линза, использованная выше, так что абсолютная величина сигнала будет пропорционально выше. По-видимому, не составит труда изготовить проволоочку меньшего диаметра, что также приведет к увеличению полезного сигнала. Возможно также

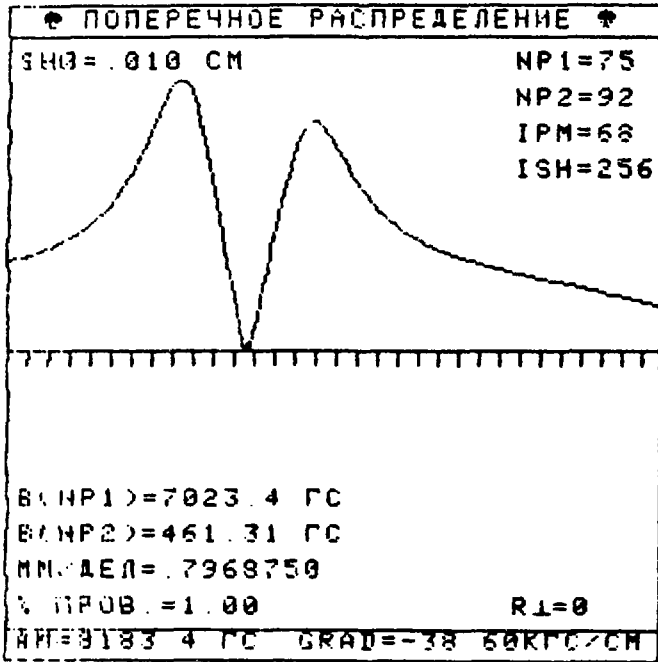


Рис. 5. Поперечное распределение поля при первоначальной выставке полюсов линзы.

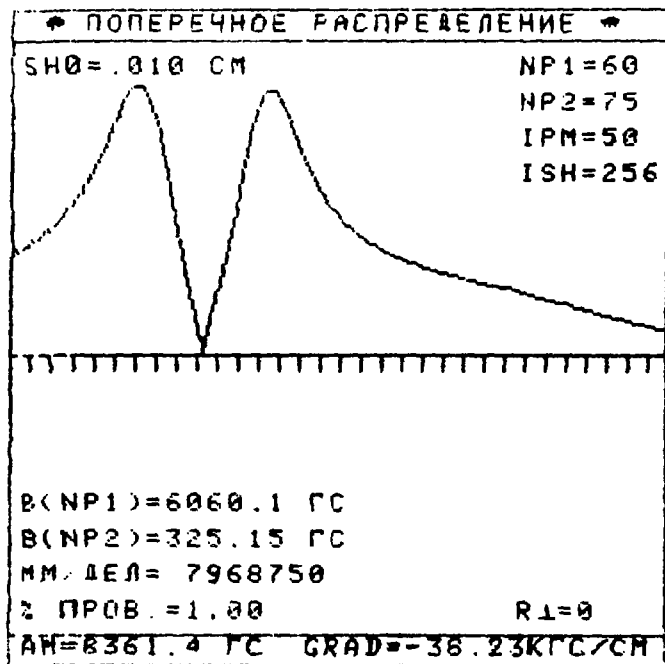


Рис. 6. Поперечное распределение поля после коррекции положения полюсов линзы.

использовать более чувствительный вольтметр. Для предотвращения деформации проволочки заметной длины можно применять вертикальную установку оси.

Подводя итоги, можно сказать, что метод является хорошим кандидатом для проведения измерений в малоапертурных системах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Simpson G.S.* Phil. Mag., 1902 N 4, p.554.
2. *Keller H.B.* Precision Measurements of Magnetic Induction with Bismuth Wire, UCRL-2249, June 1953.
3. *Dols C.G., Skiff E.W. and Watson P.G.* Temperature-Regulated Bismuth Resistor for Magnetic-Field Measurements.—Rev. Sci. Instrum., 1958. v.29, N 5, p.349.
4. *Wilson I., Schnell W. and Henke H.* Structure Studies for the Linear Collider CLIC.—CERN-LEP-RF/89-30.
5. *Balakin V.E., Novokhatsky A.V., Smirnov V.P.* Proc. 12 Internat. Conf. on High Energy Accelerators, Batavia, 1983 (Fermilab, Batavia, 1984) p.119.
6. Таблицы физических величин. Справочник/Под ред. акад. И.К.Кикоина.—М.: Атомиздат, 1976.
7. *Котенко Г.И.* Магниторезисторы.—Л.: Энергия, 1972.

*А.А. Михайличенко*

**Об измерении поля в малоапертурных системах  
электронной оптики**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 20 июня 1989 г.  
Подписано в печать 23.06. 1989 г. МН 10290  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.  
Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 94

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*