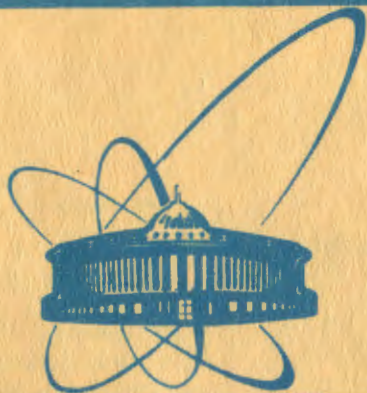


Б-48



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

6450/2-81

28/11-8

13-81-640

Ю.Бер, Г.Бом,<sup>1</sup> И.Гальм,<sup>1</sup> Я.В.Гришкевич, С.А.Долгий,  
А.В.Карпунин, З.В.Крумштейн, А.А.Кукушкин,  
Ю.В.Куликов, А.Майер, Ю.П.Мереков,  
Б.А.Муравьев, Г.П.Николаевский, В.И.Петрухин,  
Л.Г.Ткачев, Х.Том,<sup>1</sup> И.Хернеш,<sup>2</sup> Н.Н.Хованский,  
Б.А.Хоменко, А.Швинд, Г.А.Шелков, К.Шпиринг,<sup>1</sup>  
М.И.Яцута

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В МАГНИТЕ СП-136  
ДЛЯ УСТАНОВКИ РИСК

<sup>1</sup> ИФВЭ АН ГДР, Берлин.

<sup>2</sup> ЦИФИ, Будапешт.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

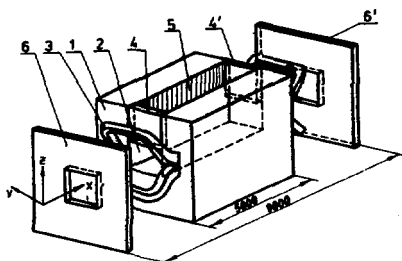
В экспериментах на установке РИСК, проводимых на серпучовском ускорителе, частицы регистрируются с помощью пятиметровой стримерной камеры, установленной в магните СП-136. Хотя этот магнит уже использовался в других экспериментах<sup>/1/</sup>, потребовалось новое измерение магнитного поля, так как вследствие иной конфигурации железа распределение поля изменилось. Чтобы обеспечить необходимую для запланированных экспериментов<sup>/2/</sup> точность измерения импульсов, компоненты поля  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  в объеме стримерной камеры должны быть измерены с относительными погрешностями, не превышающими  $10^{-3}$ .

В некоторых экспериментах требуется информация об импульсах частиц для отбора событий окружающими стримерную камеру внешними детекторами. Поэтому необходимо было также измерить поле перед стримерной камерой, за ней и над ней, всего в объеме  $15 \text{ м}^3$ , что более чем втрое превышает объем стримерной камеры. Вне камеры все три компоненты поля требовалось определить с точностью 1%.

## 2. МАГНИТ

На рис. 1 показана конфигурация магнита СП-136 для установки РИСК. Чтобы обеспечить возможность фотографирования стримерной камеры сверху, из имеющейся в верхнем полюсе магнита шахты были вынуты железные вставки, используемые в экспериментах на установке МИС для замыкания магнитного потока, кроме двух, необходимых для механической прочности магнита. При подобной конфигурации железа следует ожидать сильных градиентов поля по вертикали на краях шахты /z-координата/. Для уменьшения рассеянных полей и облегчения условий работы фотоумножителей в детекторах, располагаемых непосредственно перед магнитом и за ним, на входе и выходе из магнита были установлены магнитные экраны, каждый из которых состоял из двух железных листов толщиной 40 мм, разделенных промежутком около 100 мм. В экранах имелись окна размерами  $140 \times 100 \text{ см}^2$ , открывающие доступ в магнит.

При включении и выключении наблюдалось "дыхание" магнита: расстояние между частями железного яра у верхнего края шахты над стримерной камерой уменьшалось при токе 6300 А на 2 мм.



**Рис.1.** Схема магнита СП-136.  
 1 - железное ярмо, 2 - полезный объем магнитного поля /местоположение стримерной камеры/; 3 - обмотка; 4, 4' - железные вставки; 5 - открытая шахта над стримерной камерой; 6, 6' - магнитные экраны.

Параметры магнита приведены в табл.1.

**Таблица 1**

Параметры магнита

Ток	6300 А
Стабильность тока /за много дней/	$2 \cdot 10^{-4}$
Падение напряжения на обмотке при 6300 А	600 В
Потребляемая мощность	3,8 МВт
Вес алюминиевой обмотки	45 т
Вес активной железной массы	885 т
Число витков обмотки	348
Средняя длина витка	19 м
Сопротивление обмотки при 15°C	0,083 Ом
Максимальная индуктивность	1,28 Г
Расход охлаждающей воды	93 м <sup>3</sup> /ч

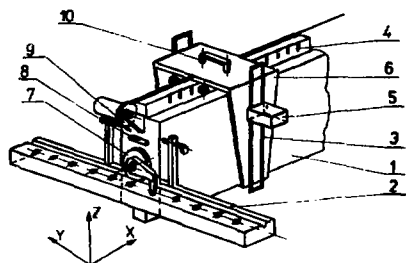
### 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА. ИЗМЕРЕНИЯ

#### 3.1. Механическая часть

Как указывалось во введении, необходимо было измерить поле на длине 10 м, ширине 1,3 м и высоте 0,8 м. Для области над стримерной камерой высота должна быть увеличена до 1,6 м.

Этим условиям приблизительно удовлетворяла измерительная балка, изготовленная в Институте теоретической и экспериментальной физики /Москва/ для измерения поля магнита СП-130<sup>8/</sup>. Балка была переоборудована в соответствии с нашими условиями /рис.2/. Она имела длину 12 м и устанавливалась в продольном (x) направлении таким образом, чтобы датчики проходили весь измеряемый объем магнитного поля. Балка покоилась на поперечных у-рельсах с помощью прецизионных роликов. Ее можно было перемещать по рельсам по горизонтали в направлении, перпендикулярном продольной оси магнита, т.е. в у-направлении. Балка юстировалась в у-направлении на длине 1 м прецизионными отвер-

**Рис. 2.** Схема измерительной балки. 1 - балка, 2 - направляющий рельс /у-рельс/, 3 - направляющий рельс для измерительной головки /z-рельс/, 4 - линейка со шлицами /x-линейка/, 5 - измерительная головка, 6 - тележка, 7 - направляющий ролик и фиксатор, 8 - ватерпас, 9 - электромотор, 10 - фотодиодный датчик.



стями в рельсах, отстоящими одно от другого на  $100,00 \pm 0,02$  мм. у-рельсы были приварены, благодаря чему достигалась удовлетворительная временная стабильность в течение всего времени измерений /3 недели/:  $\Delta x \leq 0,5$  мм;  $\Delta y, \Delta z \leq 0,1$  мм. В эту погрешность включены величины смещений, обусловленных "дыханием" магнита и индуктивными силами, действовавшими на балку при включении и выключении магнита.

Вдоль балки в x-направлении перемещалась по прецизионным рельсам тележка на роликах. Измерение x-координаты выполнялось с помощью линейки, на которой было нанесено 530 шлицев шириной  $1,50 \pm 0,01$  мм, отстоящих один от другого на  $20,00 \pm 0,02$  мм. Эффективная длина измерения поля в x-направлении составляла приблизительно 10,58 м. Измеренная инварной лентой длина составляла 10579,5 мм, что соответствует среднему расстоянию между шлицами  $20,000 - 0,001$  мм.

С обеих сторон тележки устанавливались вертикальные z-рельсы, по которым перемещалась каретка измерительной головки. Фиксация каретки выполнялась с помощью прецизионных отверстий и штифтов с шагом  $50,00 \pm 0,05$  мм. Интервал измерений по высоте составлял 0,8 м и мог быть увеличен для объема над стримерной камерой до 1,6 м при использовании других z-рельсов.

Перпендикулярность измерительной балки относительно плоскости ху можно было контролировать с точностью  $10^{-4}$  с помощью ватерпаса. Ширина тележки и измерительной головки соотносились так, что при перемещении измерительной головки с левой на правую сторону или обратно смещение собственно датчика составляло  $400,0 \pm 0,1$  мм. В результате имелась возможность промерить одну и ту же "линию" путем перемещения датчика на другую сторону балки и смещения балки на 400 мм в противоположном направлении. Каретка с датчиком приводилась в движение в прямом и обратном направлениях электродвигателем МУ-431 с помощью лебедки с немагнитным стальным тросом при равномерной скорости 25 мм/с. Для обеспечения равномерности движения направляющий

ролик для стального троса имел демпфер. Балка термостатировалась, во время измерения поддерживалась температура  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

С помощью описанной аппаратуры можно было выполнить измерения в объеме магнитного поля на решетке длиной 10,58 м, шириной 1,30 м и высотой 0,8 м /или 1,6 м/ с шагом 20; 100; 50 мм по  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно.

### 3.2. Электроника

Поле измерялось с помощью измерительной головки /рис.3/, в которой ортогонально друг другу были расположены три датчика Холла /4/, так что одновременно измерялись три компоненты поля. Датчики находились в термостате, который работал при температуре  $42,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ . Стабильность тока питания была лучше  $10^{-4}$ , а чувствительность отдельных датчиков составляла 7,7 мкВ/Гс для  $x$ -компоненты, 19,6 мкВ/Гс для  $y$ -компоненты и 10,5 мкВ/Гс для  $z$ -компоненты.

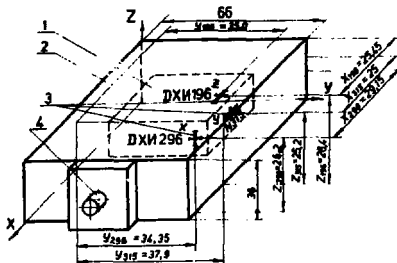


Рис.3. Измерительная головка.  
1 - термостат, 2 - корпус, 3 - датчики Холла, 4 - разъем.

Результаты калибровки датчиков Холла приведены в табл.2.

Для определения  $x$ -координаты вдоль измерительной балки использовался дифференциальный фотодатчик.

### 3.3. Измерения

Напряжения Холла измерялись с помощью трех цифровых вольтметров типа TR1652 EMC-1362/2, имеющих диапазон измерений от 20 мкВ до 1000 В при точности  $\pm 0,02\%$ . При скорости тележки 25 мм/с датчики Холла смещались от точки измерения примерно на 1 мм. Чтобы в дальнейшем можно было внести на это поправку, при измерениях в прямом и обратном направлениях позиция измерения устанавливалась в начале шлица. При ширине шлица 1,5 мм между измерениями в прямом и обратном направлениях возникла разность координат 0,8 мм. В качестве измеренного значения принималось среднее этих измерений. При этом исключались также индукционные эффекты.

Таблица 2

Калибровка датчиков Холла /выборка/

В, Тесла	Датчик №296		Датчик №315		Датчик №196	
	$u_x^{(-)}$ , мВ	$u_x^{(+)}$ , мВ	$u_y^{(-)}$ , мВ	$u_y^{(+)}$ , мВ	$u_z^{(-)}$ , мВ	$u_z^{(+)}$ , мВ
0	0,05	-	0,04	-	0,03	-
0,25	19,28	20,03	49,92	49,81	26,04	26,00
0,50	37,61	40,55	99,46	98,74	51,83	51,84
0,75	55,30	61,36	148,64	147,02	77,50	77,60
1,00	72,62	82,34	197,54	195,00	103,04	103,26
1,25	-	-	-	-	128,58	128,88
1,50	-	-	-	-	154,01	154,48
1,75	-	-	-	-	179,46	180,12

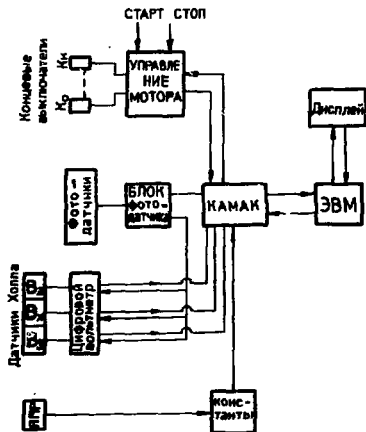


Рис. 4. Блок-схема электроники.

Постоянство магнитного поля во время измерений контролировалось с помощью ядерного магнитометра.

Данные измерений передавались в ЭВМ "ECLIPSE S-200", проверялись на полноту и затем записывались на магнитную ленту. При этом процесс измерений происхо-

дил следующим образом /рис. 4/. Измерительная балка и измерительная головка устанавливались в нужную позицию, и константы, соответствующие данному измерению /у- и z- координаты, ток магнита, данные о постоянстве магнитного поля, температура измерительной балки и др./, вводились в ЭВМ. Затем приводилась в движение тележка. При прохождении ею концевого выключателя аппаратура КАМАК автоматически переходила на прием. После прохождения всех шлицев 1...530 следующий концевой выключатель задавал обратный ход тележки и производились измерения от 530 до 1 положения.

#### 4. ГЕОДЕЗИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

##### 4.1. Координатная система

На ярме магнита было нанесено 8 визирных целей /рис.5/. На у-рельсах имелись четыре установочных точки А, В, С, D для оптических приборов /например, теодолитов, микротелескопа "Тейлор-Гобсон", нивелира/. С помощью этих точек /например,  $B=(0,0,0)$  с х-направлением по В-D/ определялась вспомогательная координатная система и в ней находились координаты 8 визирных целей в магните, например, методом прямых засечек. Затем тележка с измерительной головкой устанавливалась в заднюю позицию и определялись координаты головки. Эти измерения выполнялись также методом прямых засечек или пеленгованием линейки, помещенной на головке параллельно В-С с помощью теодолита, установленного, например на линии С-D. По этим измерениям определялись координаты головки во вспомогательной системе. Затем измерительная балка удалялась из магнита при сохранении положения у-рельсов и монтировалась реперная система  $K_1-K_{38}$  установки РИСК. Далее определялись координаты  $K_1-K_{38}$  во вспомогательной координатной системе, а затем все координаты преобразовывались в координатную систему РИСК с  $K_{35}=(0,0,0)$  и направлением  $K_{35}-K_1$  в качестве оси х. Если учесть, что старт тележки находился в конце балки вблизи точек С, D, то для координат точки, в которой измеряется магнитное поле, в первом приближении получают следующие рекурсивные формулы

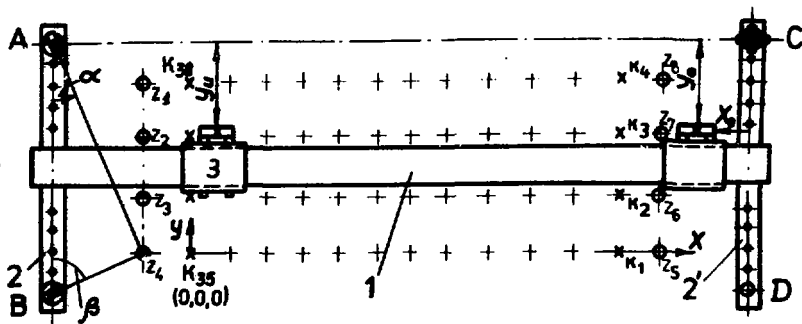


Рис.5. Схема установки балки. 1 - балка, 2, 2' - у-рельс, 3 - тележка, А, В, С, D - установочные точки для геодезических приборов,  $\alpha, \beta$  - угол пеленга,  $x_0, y_0$  - длины, измеренные пеленгом на линейку.

для главного объема:

$$x_{\text{пр.}} = 7832,3 - (n_x - 1)(20,000 - 0,001) \text{ мм} \quad n_x = 1, \dots, 530,$$

$$y_{\text{пр.}} = -1,284 \cdot 10^{-3} x_{\text{пр.}} + 125,83 + (N_{y, \text{пр.}} - 1) \cdot 100,00 \text{ мм}$$

$$N_{y, \text{пр.}} = 1, \dots, 9,$$

$$z_{\text{пр.}} = -\frac{2,50}{10580} \cdot x_{\text{пр.}} + (N_z - 1) \cdot 50,00 + 55,58 \text{ мм}$$

$$N_z = 1, \dots, 17,$$

$$x_{\text{лев.}} = 7831,0 - (n_x - 1)(20,000 - 0,001) \text{ мм}$$

$$y_{\text{лев.}} = -1,284 \cdot 10^{-3} x_{\text{лев.}} - 273,57 + (N_{y, \text{лев.}} - 21) \cdot 100,00 \text{ мм}$$

$$N_{y, \text{лев.}} = 21, \dots, 29,$$

$$z_{\text{лев.}} = -\frac{1}{10580} x_{\text{лев.}} + (N_z - 1) \cdot 50,00 + 55,16 \text{ мм.}$$

Все высоты / z-координаты/ измерялись с помощью нивелира и линейки.

#### 4.2. Точность измерений

Помимо уже упомянутых измерений длины шага измерительной балки по x, y и z проводились следующие проверки и юстировки.

**Прямоугольность.** Углы между z-рельсами и направлением балки / x-направление/ и между z-рельсами и опорной поверхностью каретки измерительной головки юстировались так, чтобы выполнялись условия:

$$|\angle(\bar{x}, \bar{z}) - 90^\circ| \leq 2',$$

$$|\angle(\bar{y}, \bar{z}) - 90^\circ| \leq 2'.$$



Таблица 3

Боковой изгиб измерительной балки

$x$	$y$ , мм
0	0,24
50	1,50
100	2,58
150	3,44
200	4,00
250	4,23
300	4,04
350	3,72
400	2,82
450	1,90
500	0,90
530	0,33

Таблица 4

Кручение измерительной балки

$x$	$\text{tga} \cdot 10^{-4}$
0	26,6
50	21,5
100	23,8
150	23,5
200	25,7
250	21,4
300	19,8
350	17,6
400	8,80
450	-8,00
500	-13,4
530	-12,7

Прогиб балки. С помощью микротелескопа "Тейлор-Гобсон" было установлено, что вертикальный прогиб на полной длине балки 12 м не превышает 0,5 мм. Напротив, наблюдался более значительный боковой прогиб, увеличивающийся к середине балки. Как видно из табл. 3, этот прогиб не имеет формы окружности, а отвечает перегибу балки при  $x = 5$  м. Тем не менее, в месте расположения стримерной камеры,  $3 \text{ м} < x < 8 \text{ м}$ , можно подобрать такую выравнивающую прямую, когда отклонения измеренных координат не превышают 0,8 мм.

Кручение балки. Проверка горизонтальности перемещения тележки с помощью ватерпаса /чувствительность  $10^{-4}$  на 1 деление шкалы/ показала, что балка имеет кручение /см. табл. 4/. В месте расположения стримерной камеры угол кручения составляет  $\alpha = 8'$ ; в то время как максимальный угол кручения достигает  $\alpha_{\text{макс.}} = 13'$ . Это приводит к отклонению датчика по  $y$  до 0,5 мм в месте расположения стримерной камеры.

Прямоугольность установки балки. Так как балка и ее опора имеют очень большой вес, горизонтальная юстировка затруднена. Измерение показало, что на рельсе А-В балка лежала на 2 мм выше, чем на рельсе С-Д. Это приводит к наклону балки относительно оси магнита  $\text{tg}\beta = 1,7 \cdot 10^{-4}$ .

Во вспомогательной системе точки А, В, С, Д имеют следующие координаты  $x$  и  $y$ :

$$(x, y)_A = (1,54; 1270,1),$$

$$(x, y)_B = (0,0),$$

$$(x, y)_C = (11957,4; 1270,1),$$

$$(x, y)_D = (11959,6; 0).$$

C-D является направляющим рельсом для движения балки в  $y$ -направлении. Видно, что уже во вспомогательной системе координат движение балки по  $y$  неточно совпадает с направлением  $y$ . Все это учтено в приведенных выше рекурсивных формулах.

Предварительные измерения, определение градиента магнитного поля. Перед измерением карты поля были проведены грубые измерения с целью получения общей картины поля и определения максимальных его градиентов. В месте расположения стримерной камеры максимальный градиент поля был найден равным  $\partial V_z / \partial z = 7$  Гс/мм, т.е. 0,05%/мм при средней напряженности поля 15000 Гс, а  $\partial V_z / \partial x$  в области вне стримерной камеры составляет 8 Гс/мм.

Оценка точности. Принимая во внимание все упомянутые эффекты, можно утверждать: что несмотря на аппроксимацию, строго говоря, искривленных линий измерения прямыми, отклонения координат в месте расположения стримерной камеры не превышают следующих значений:  $|\Delta x| \leq 1$  мм,  $|\Delta y| \leq 0,8$  мм,  $|\Delta z| \leq 0,5$  мм. При максимальном градиенте поля  $\partial V_z / \partial z = 7$  Гс/мм /остальные градиенты имеют в месте расположения стримерной камеры меньшую величину/ вклад неточности определения координат в ошибку определения поля  $|\Delta V_z / V_z|$  не превышает 0,03%. Так как в объеме стримерной камеры отклонение направления вектора поля  $\vec{V}$  от направления  $z$  меньше  $20^\circ$ , планарными эффектами можно пренебречь.

Стабильность тока магнита составляет  $|\frac{\Delta i_M}{i_M}| \leq 2 \cdot 10^{-4}$ , а тока датчика Холла -  $|\Delta i_{DX} / i_{DX}| \leq 1 \cdot 10^{-4}$ . Напряжение с датчиков Холла измерялось цифровыми вольтметрами, которые имели стабильность  $10^{-4}$ . Для калибровки датчиков Холла использовалось магнитное поле, известное с точностью  $|\Delta V_{\text{кал.}} / V_{\text{кал.}}| \leq 10^{-5}$ . Калибровка проводилась с теми же источниками тока и цифровыми вольтметрами, что и при измерениях карты поля, так что для калибровки датчиков Холла можно принять точность  $2 \cdot 10^{-4}$ . Отсюда следует, что суммарная ошибка в измерении поля, состоящая из электрических нестабильностей и вклада от неточностей координат, равна  $|\Delta V_z / V_z| \leq 0,1\%$  в области расположения стримерной камеры.

Точность измерений для других компонент поля,  $|\Delta V_x/V_x|$  и  $|\Delta V_y/V_y|$ , лучше 1% во всей области измерений, а для области вне стримерной камеры не превышает 1%.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью описанной в разделе 3 аппаратуры были проведены измерения поля для трех различных токов магнита, 2000, 4000 и 6000 А. При этом получено в совокупности более  $10^6$  измеренных значений. Типичный ход поля представлен на рис.6. Видно, что главная компонента  $V_z$  в области расположения стримерной камеры почти постоянна по  $x$ . К началу и концу области стримерной камеры примыкают участки с сильным градиентом  $\partial V_z/\partial x$ . Следует иметь в виду, что на рис.6 кривая для  $V_x$  растянута в 10, а для  $V_y$  в 100 раз.  $V_y$  имеет такую малую величину, как на рис.6, только в середине шахты; у края шахты  $V_y$  принимает значения 0,1-0,2 Т.

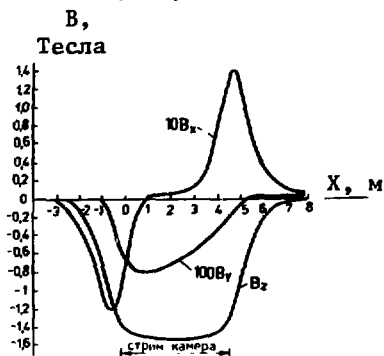


Рис.6. Ход поля в середине полезного объема /вблизи пучка/.

Как показали измерения, проведенные до установки магнитных экранов и после нее, ослабление магнитного поля за экраном составляет по меньшей мере 1:10, в то время как влияние экранов на поле в рабочем объеме практически незаметно. В настоящее время завершается аппроксимация поля полиномами для каждой компоненты.

Авторы благодарят сотрудников группы искрового спектрометра ИТЭФ /Москва/, а также профессора Б.А.Долгошеина и А.Е.Ханзмиряна за помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анджеак Р. и др. ОИЯИ, 13-3588, Дубна, 1967.
2. Vohn G. et al. ANL-8055, 1975.
3. Порубай Н.И. Препринт ИТЭФ-58. Москва, 1973.
4. Долгий С.А. и др. ОИЯИ, 13-11603, Дубна, 1978; ПТЭ, 1979, №5, с.200.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 октября 1981 года.