

УЧРЕЖДЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

Г.С. Виллевальд, Т.А. Всеволожская,  
В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ  
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА

ИЯФ 2011-5

Новосибирск  
2011



## 1. Линза на вводе в синхротрон [1]

Линза запитана от источника постоянного тока. Расчетные параметры: градиент  $G = 1$  кЭ / см, ток  $I = 4.1$  А. По нагреву ток не должен превышать 4 – 5 А. Линза не симметричная, расстояния между полюсами различные: по вертикали  $\Delta z = 10$  мм, по горизонтали  $\Delta r = 15$  мм. Длина наконечников полюсов 85 мм.

Датчик Холла установлен на вертикальную составляющую.

Проход по вертикали (по оси  $z$ ) при токе  $I = 6$  А,  $r = 0$ :

**Таблица 1.** Рис. 1а – 1.

$z, \text{мм}$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$V, \text{мТл}$	7.2	6	4.7	3.2	1.7	0.2	-1.5	-3.2	-4.8	-6.4	-8

Проход по горизонтали при токе  $I = 6$  А,  $z = 0$ :

**Таблица 2.** Рис. 1а – 2.

$r, \text{мм}$	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	-1
$m\text{Тл}$	70.3	59.3	48.5	38.4	28.5	19.1	9.6	5
$r, \text{мм}$	0	1	2	4	6	8	10	11
$m\text{Тл}$	0.4	-4.2	-8.8	-18.1	-27.3	-36.8	-46.7	-51.8

В обоих распределениях неплохая линейность. Кривая намагничивания, снятая при  $r \sim 10$  мм,  $z = 0$ :

**Таблица 3,** Рис. 2а – 1.

$I, \text{А}$	0	0.5	1	2	3	4	5	6	6.5	7
$m\text{Тл}$	3	18.9	28.8	35.3	39.65	42.5	44.7	46.8	47.7	48.7

Замагничивание начинается уже от тока  $I \sim 0.5$  А, а от  $\sim 4$  А практически прямая линия, т.е. полное насыщение.

Оценка интегральной длины линзы при токе  $I = 4$  А,  $z = 0$ ,  $r \sim 10$  мм:

**Таблица 4,** Рис. 2б

$L, \text{мм}$	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-10
$m\text{Тл}$	5.9	10.2	17.4	28.2	38.1	43.2	45	46.2	46.3	46
$L, \text{мм}$	60	55	50	45	40	35	30	25	20	10
$m\text{Тл}$	6.3	10.4	17.8	28.4	40.2	44.4	46.3	46.8	46.7	46.2

Интегральная длина оказывается равной ~98 мм.

Обмотки линзы включены встречно, т.е. образован диполь. Измерения  $B_z(r)$  проведены на малом зазоре (10 мм) при токе  $I = 2$  А:

**Таблица 5**, Рис. 1а – 3.

г, мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
мТл	25.8	26.1	27.1	28.8	31.2	34.6	38.8	43.9	49.8	56.1	62

С целью проверки, сильно ли уйдет поле с центра в насыщенном варианте, а также сильно ли исказится квадрупольное поле за счет насыщения железа квадрупольным током, была снята кривая насыщения и распределение по  $r$  при токе 7 А.

Кривая насыщения (снята при  $r = 18$  мм,  $z = 0$ ):

**Таблица 6**, Рис. 2а – 2.

I, А	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7
мТл	4.3	17	31	45.8	61.8	86.2	100	108	115	120.5

Распределение по  $r$  при токе  $I = 7$  А:

**Таблица 7**, Рис. 1а – 4.

г, мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
мТл	52.1	53.6	56.2	60.1	65.7	73.2	82.3	93.5	106	120	133

Сравнение таблиц 5 и 7 дает очень слабую зависимость от степени насыщения: отношение величин  $B(r = 20)$  к  $B(r = 0)$  при токе 2 А дает величину  $62 / 25.8 = 2.4$ , а при токе 7 А величину  $133 / 52.1 = 2.55$ , т.е. разница небольшая. Чувствительность дипольной составляющей поля от тока при насыщенном состоянии железа от квадрупольных токов составляет не более 50 Гс/А, в ненасыщенном состоянии эта величина более 300 Гс/А (в точке  $r = 18$ ,  $z = 0$ ). На оси эти величины соответственно равны  $50/(120/52.1) \approx 22$  Гс/А и  $300/(56.1/25.8) \approx 140$  Гс/А.

Проведена серия измерений с целью исследования чувствительности ( $I * w$ ) дипольной составляющей от изменения токов в основных обмотках. Каждая обмотка включалась от отдельного источника. В положении  $r = z = 0$  при разных токах измерялось поле  $B$ , затем находилось расстояние по  $r$ , где  $B = 0$ . При смене опорного тока, перед изменением тока в другой обмотке, устанавливались  $B = 0$  в точке  $r = z = 0$ . Токи устанавливаются с приемлемой точностью, но со временем при тех же показаниях I-приборов и неизменном положении  $r$  и  $z$  величина  $B$  могла уходить до ~50% !? Повторяемость уста-

новки +I и -I приборов (судя по соответствующему им полю +B и -B ) примерно такая:

**Таблица 8.**

I, А	5	4	3	2	1	0.5
$\Delta B(0,0)$ , мТл	0	0.12	0.2	0.2	0.1	-0.8

Остаточная намагниченность в линзе  $B_z$  (г) при  $z = 0$ :

**Таблица 9, Рис. 1б – 1.**

г, мм	-0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	
мТл	1.46	1.65	1.88	2.15	2.47	2.78	3.18	3.76	4.29	
г, мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
мТл	1.43	1.29	1.19	1.13	1.11	1.13	1.19	1.31	1.48	1.67

Остаточная намагниченность в линзе  $B_z$  (z) при  $r = 0$ :

**Таблица 10, Рис. 1б – 2.**

z, мм	0	-4	-8	-12	-16	-20	4	8	12	16
мТл	1.42	1.39	1.21	0.91	0.56	0.23	1.26	0.98	0.67	0.37

Была сделана попытка улучшить эффективность линзы в насыщенном состоянии железа. На линзе были намотаны 4 дополнительные обмотки по ~13 витков в каждой: 2 – на основные обмотки (в основных обмотках по 4600 витков) и 2 – прямо сверху, через щеки – для создания соленоидального поля на оси для смещения пучка (этот вариант может быть эффективнее предыдущего в насыщенном от квадрупольного тока состоянии железа). Хотелось сравнить эффективность обеих пар обмоток (включенных последовательно) в ненасыщенном и насыщенном состоянии железа. Мешают остаточные поля, они того же порядка величины, так как их уровень при  $W_{квдр.} / W_{смещ} = 4600 / 13 \approx 350$  и при квадрупольном поле ~ 0.1 Тл составляет ~ 0.3 мТл, что меньше остаточных полей.

## 2. Квадрупольная линза протонного синхротрона

Расчетные параметры линзы:  $E=600$  мэВ,  $dB/dr = 4.5$  кГс/см,  $I_M = 14.4$ кА,  $I_{эфф} = 2.28$ кА. Было предложено проводить измерения на малых полях, так как первый вариант синхротрона предполагалось исследовать при энергии 70 – 80 мэВ. Линза запитывалась током  $I = 1.2$  кА через трансформатор с коэффициентом трансформации  $n = 30$ . Измерения проводились с помощью

узкой интегрирующей индукционной катушки длиной 180 мм, закрепленной на изоляционном стержне. Если смотреть на линзу со стороны цилиндрической части (токоподвод вдали, подходит снизу), то принятые направления координат следующие: по горизонтали – координата  $r$  (влево «+», вправо «-»), по вертикали –  $z$  (вверх «+», вниз, в сторону токоподвода, «-»). Интегрирующую катушку не удалось установить относительно полюсов точнее 1% (по соотношению  $B_{\max}(r)$  и  $B_{\max}(z)$ ). Не лучше и точность установки по  $V(0)$ . Не настроиться точнее и так, чтобы  $V(+15)$  было равно  $V(-15)$ . Основная причина – отношения величин  $V(+r, z)$  к величинам  $V(-r, z)$  при одинаковых абсолютных величинах  $r, z$  не одинаковы, различаются и в разных фазах, длительностях.

Значения интегралов  $B_z(r, F)$  при  $z = 0$ , снятых при  $t_m = 3.2$  мс:

**Таблица 11.** Рис. 3а.

$F \setminus r$	-15	-12	-9	-6	-3	3	6	9	12	15
$5^\circ$	-36.3	-29.1	-21.8	-14.5	-7.51	7.32	14.2	21.4	28.6	35.77
$15^\circ$	-97.3	-78.0	-58,3	-38.9	-20.1	19.8	38.31	57.84	76.9	96.25
$45^\circ$	-235	-188	-140	-93.6	-48.2	48.4	93.15	138.9	186.4	233.3
$90^\circ$	-315	-252	-188	-125	-64.2	65.7	125.9	188	251.2	314.2

Распределение интегралов  $B_z(z)$  при  $r = 0$ ,  $t_m = 3.2$  мс, фаза  $90^\circ$ :

**Таблица 12,** Рис. 3б – 1.

$Z$	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15
$B$	-8.8	-7	-5.4	-3.8	-2	-0.2	1	2.16	3.37	5	6.66

Распределение интегралов  $B_z(F)$  при  $r = z = 0$ ,  $t_m = 3.2$  мс:

**Таблица 13,** Рис. 4б – 1.

$F$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$25^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
$B(3.2\text{мс})$	-0.2	-0.35	-0.46	-0.6	-0.56	-0.46	-0.34	-0.18

Таблица 13, Рис. 4б,1.

Измерительная катушка повернута на горизонтальную составляющую.

Распределение  $B_r(F, z)$  при  $r = 0$ ,  $t_m = 2.5$  мс:

**Таблица 14,** Рис. 4а – 1; Рис. 4б – 2.

$Z \setminus F$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$25^\circ$	$35^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
$z=15$	37.8	70.46	100.6	154.4	200	237.2	278.7	303.7	311.8
$z=0$	-0.1	-0.17	-0.22	-0.24	-0.22	-0.20	-0.13	-0.07	-0.02

Распределение  $B_r(r)$  при  $z = 0$ ,  $t_m = 2.5$  мс,  $F = 90^\circ$ :

**Таблица 15**, Рис. 36 – 2.

r	15	12	9	6	3	0	-3	-6	-9	-12	-15
B	-6.8	-5.1	-3.8	-2.5	-1.2	-0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.15

Распределение  $B_r(r)$  при  $z = 0$ ,  $t_m = 3$  мс,  $F = 90^\circ$ :

**Таблица 16**, Рис. 36 – 3.

r	15	12	9	6	3	0	-3	-6	-9	-12	-15
B	-6.5	-4.5	-2.7	-1	0.16	0.7	1.0	1.2	1.3	1.35	1.38

Распределение  $B_r(F, z)$  при  $r = 0$ ,  $t_m = 3$  мс:

**Таблица 17**, Рис. 4а – 2; Рис. 4б – 3.

z \ F	5°	15°	45°	90°	z F	5°	15°	45°	90°
z = 15	37.55	99.8	235.4	307.2	z = -15	-37.6	-99.7	-234.4	-305.3
z = 0	0.18	0.406	0.614	0.664					

Видно, что не все зависимости между собой стыкуются.

Рассмотрим вопросы линейности распределений интегралов полей в зависимости от координат, фазы и длительности импульса тока. Разности величин  $\Delta B$  интегралов в соседних координатах  $l_i$  и  $l_{i+1}$ , то есть  $\Delta B = B(l_i) - B(l_{i+1})$ , отнесенные к разности координат  $\Delta l = (l_i - l_{i+1})$ , практически представляют градиенты полей на этих участках. Стабильность градиентов можно оценить, сравнив разности соседних измерений в соответствующих фазах. Формы кривых как  $\Delta B_z(r)$  (см. таблицу 11), так и  $\Delta B_r(z)$  в различных фазах тока подобны, поэтому в таблицу 18 сведены результаты измерений только в фазе  $90^\circ$  при различных длительностях импульсов тока, приведены абсолютные величины  $\Delta B$ ,  $t_m$  указано в мс. Из таблицы видно, что зависимость  $\Delta B$  от длительности импульса тока мала, от координат – существенная, обе не везде понятные. В таблице 19 приведены результаты измерений  $B_z(r)$  с шагом 1 мм при длительности  $t_m = 3$  мс. В таблице 20 представлены величины  $\Delta B$  аналогично таблице 19 (величины  $\Delta B$  взяты на длине 3 мм). Максимальный разброс  $\Delta B \sim 2.5\%$ . Как видно из таблицы, градиент справа ( $r < 0$ ) больше, чем слева, в среднем на  $\sim 2\%$ . Похожие соотношения и на других длительностях: при  $t_m = 2.5$  мс на  $\sim 2.2\%$ , при  $t_m = 1.6$  мс на  $\sim 2.5\%$ . Похожая зависимость и  $B_r(z)$ , но она существенно слабее; сверху градиент больше,

чем внизу: при  $t_m = 1.6$  мс на  $\sim 0.6\%$ , при  $t_m = 2.5$  мс на  $\sim 0.2\%$ , при  $t_m = 3$  мс на  $\sim 0.4\%$  (в пределах координат  $\pm 12$  мм).

**Таблица 18.**

$t_m \setminus \Delta r$		15 – 12	12 – 9	9 – 6	6 – 3	3 – 6	6 – 9	9 – 12	12 – 15
1.6	$B_z(r)$	63.5	60.4	61.2	62.5	64	63.3	61	60.4
1.6	$B_r(z)$	56	62	62.8	62.6	62.9	62.9	62.4	61
2.5	$B_z(r)$	63.5	60.7	60.7	63.8	65	63	61	59
2.5	$B_r(z)$	55.3	63	63.5	62.3	63.2	63	62.4	60.6
3	$B_z(r)$	62.8	61.4	61.5	62.1	63	63	62	61.5
3	$B_r(z)$	57	61.8	62	62.1	63	62.6	61.3	60.3

**Таблица 19.**

r	13	12	11	10	9	8	7	6	5
$B_z(r)$	270	249.8	229.6	209.2	188.4	167.7	146.9	126.7	106
r	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4
$B_z(r)$	85.6	64.9	44.2	23.7	3	-17.7	-38.3	-59.1	-79.9
r	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13
$B_z(r)$	-100.8	-121.8	-142.8	-163.7	-184.6	-205.5	-226.5	-247.5	-268.4

**Таблица 20.**

$\Delta r$	12 – 9	9 – 6	6 – 3	3 – 0	0 – 3	-3 – 6	-6 v 9	-9 – 12
$\Delta B$	61.4	61.7	61.8	61.9	62.1	62.7	62.8	62.9

**Таблица 21.**

$F \setminus r, z$	12	9	6	3	-3	-6	-9	-12
5°	2.61	2.62	2.64	2.61	2.7	2.74	2.8	2.85
15°	6.9	6.95	6.98	6.95	7.15	7.24	7.38	7.52
45°	15.84	15.96	16.07	16.08	16.35	16.55	16.86	17.15
90°	20.57	20.75	20.92	21.01	21.14	21.4	21.8	22.12
90°	20.99	21.04	20.9	20.92	20.67	20.76	20.75	20.64

В таблице 21 градиенты представлены как отношения величин полей на измеряемых координатах к величинам этих координат. В верхних строках – зависимость  $B_z(r) / r$  от  $r$  ( $z = 0$ ) и от фазы ( $t_m = 1.6$  мс), в нижней строке  $B_r(z) / z$  при  $r = 0$  в фазе 90°. Зависимости  $B_z(F)$  похожи с табл.11.

Причины заметного разброса результатов измерений различные.

Это может быть неточность установки измерительной катушки (непараллельность осей, неточность установки координат), недостаточная стабильность системы питания, некоторая несимметрия полеобразующих обмоток линзы и др.

### 3. Усредненные параметры элементов электрической схемы синхротрона

Параметры (индуктивности и активные сопротивления) определялись путем использования отношений времени до максимума тока  $t_m$  к длительности импульса тока  $\tau$  (при различных способах коммутации элементов в электрической схеме) по формулам:

$$R = \frac{\sin(2\pi t_m / \tau)}{\omega c} = \frac{\tau \sin(2\pi t_m / \tau)}{\pi c},$$

$$L = \frac{\sin^2(\pi t_m / \tau)}{\omega^2 c} = \frac{[\tau \sin(\pi t_m / \tau)]^2}{\pi^2 c}.$$

1. Магниты. Индуктивности  $L$  и сопротивления  $R$  соответствующих типов магнитов: прямая модель:  $L_{ПМ} \sim 200$  нГн,  $R_{ПМ} \sim 0.023$  мОм, монолитный:

$$L_{ММ} \sim 700 \text{ нГн}, R_{ММ} \sim 0.1 \text{ мОм},$$

разборный:

$$L_{РМ} \sim 650 \text{ нГн}, R_{РМ} \sim 0.07 \text{ мОм}.$$

В насыщенном состоянии магнитов (при  $\sim 5$  Тл) их индуктивность падает на  $\sim 10 - 15\%$ , сопротивление на  $\sim 7 - 10\%$ . При подключенных всех  $90^\circ$ -х магнитах паразитная индуктивность составляет  $\sim 20\%$ , сопротивление  $\sim 50\%$ .

2. Кольцевой токосборник с закоротками четырех магнитов:  $L \sim 90$  нГн,  $R \sim 0.08$  мОм.

3. Горизонтальный и вертикальный переход от трансформатора до кольцевого токосборника:  $L \sim 30$  нГн,  $R \sim 0.03$  мОм.

4. Трансформатор. На сердечник железа трансформатора одевается 8 пакетов ("блинов"), в каждом из которых намотано по 12 витков, т.е. всего 96 витков, представляющих первичную обмотку трансформатора. Блины, представляющие вторичную обмотку трансформатора, переключками соединены попарно, а с помощью других переключек меняется коэффициент трансформации  $n$  (один, два или четыре витка, образуя  $n = 96, 48$  или  $24$ ). Не коммутируя часть витков блинов, можно тоже менять коэффициент трансформации. Например, исключив витки одного блина, в указанных выше случаях, получим  $n = 84, 42, 21$ ; отключив два блина, будет  $n = 72, 36, 18$  и т.д. Исключение

витков блина из схемы первичной обмотки дает прирост индуктивности рассеяния  $\sim 40$  нГн. Индуктивность витка вторичной обмотки (блина) составляет  $\sim 70$  нГн, потому что при последовательном соединении двух, четырех витков она будет соответственно 140 и 280 нГн. Следует заметить, что при подключенной к трансформатору индуктивности более 1700 нГн при  $\tau \sim 10$  мс (включено, например, 3 поворотных магнита) при полях в магнитах  $\sim 3$  Тл начинается насыщение железа трансформатора, т. е. требуется размагничивание.

5. Квадрупольные линзы. Линза электронного синхротрона:  $L \sim 600$  нГн,  $R \sim 0.4$  МОм, протонного:  $L \sim 500$  нГн,  $R \sim 0.3$  МОм.

#### 4. Поворотные магниты

Измерения полей проводились в трех типах магнитов: в прямой модели (ПМ) (описание см. в препринте ИЯФ 2006-5 [2]), в  $90^\circ$ -поворотном монолитном магните (ММ) и в  $90^\circ$ -разборном варианте поворотного магнита (РМ). Во всех магнитах размеры полеобразующих токовых шин и расстояния между ними одинаковы, однако различия в конструкции железа, возможные неточности установки шин (непараллельность и др.), различие длительностей импульсов тока при измерении полей могут влиять на результаты измерений.

В таблице 22 приведены отношения полей в апертуре к полю на равновесной траектории (показан один квадрант) в магнитах ПМ, ММ и РМ при полях в них 5 Тл (на равновесной траектории, на “столике”).

Вертикальная ось –  $z$ , горизонтальная –  $r$ , координаты датчиков в прямоугольной измерительной матрице  $z = 0; \pm 7.3; \pm 14.6$ ,  $r = 0; \pm 3.75; \pm 7.5$  мм. Датчики наматывались медным проводом диаметром 40 мк на капроновые каркасики диаметром 3.5 мм и высотой 3 мм, длина навивки 2.3 мм, число витков 1300, активное сопротивление  $180 \pm 4$  Ом, величина  $WS = 40 \pm 3$  (витков\* мм<sup>2</sup>).

**Таблица 22.**

ПМ			ММ			РМ		
0.944	0.96	0.989	0.942	0.954	0.982	0.942	0.955	0.983
0.988	0.992	1.007	0.987	0.993	1.006	0.989	0.996	1.009
1.0	1.002	1.008	1.0	1.002	1.009	1.0	1.006	1.011

Видно, что распределения полей отличаются мало. В таблице 23 показано распределение полей в квадранте магнита ММ в зависимости от фазы поля (максимальное поле тоже 5 Тл).

**Таблица 23.**

	5°			9°			15°		
0.9965	0.997	0.9985	0.997	0.9985	0.9994	0.9965	0.999	1.0008	
0.998	0.9985	0.9985	0.9982	0.9994	0.999	0.9984	0.999	5 0.9996	
1.0	0.998	0.9994	1.0	0.999	0.9999	1.0	0.9994	0.9999	
	23°			33°			45°		
0.989	0.9946	1.004	0.9774	0.986	1.0066	0.9664	0.977	1.0042	
0.9975	0.999	1.001	0.996	0.9984	1.0022	0.994	0.997	1.0041	
1.0	0.9995	1.001	1.0	1.0003	1.002	1.0	1.0004	1.003	
	59°			75°			90°		
0.9565	0.968	0.998	0.948	0.958	0.99	0.942	0.953	0.982	
0.9914	0.9955	1.005	0.989	0.994	1.006	0.987	0.993	1.006	
1.0	1.001	1.0051	1.0	1.0014	1.007	1.0	1.002	1.0093	

Анализ полных интегральных длин на различных координатах апертуры проводится в препринте ИЯФ 2007-7. В нем же рассматриваются варианты коррекции полей в апертуре с помощью корректирующих обмоток (на Рис. 16 обмотки показаны только с одной стороны, внизу апертуры; в таких условиях и проводились измерения). В препринте ИЯФ 2006-5 на Рис. 7 показан вариант коррекции поля коротким импульсом, перед выводом ускоренных частиц, с помощью трехвитковой обмотки. (Замечу попутно, что в этом препринте имеет место опечатка: на странице 19, в 16-й строке вместо слова миллисекунды напечатано микросекунды). В препринтах указан ряд принципиальных сложностей, связанных с корректирующими обмотками (ниже обмотки обозначаются КО).

**Таблица 24.**

ПМ			КО			ПМ+КО		
0.998	1.004	1.003	0.969	0.973	0.977	0.986	0.9992	1.0008
1.001	1.0014	1.002	0.977	0.975	0.974	1.0004	1.0002	1.0001
1.0	1.0007	1.001	1.0	0.993	0.972	1.0	1.001	0.9992
1.001	0.9995	0.9991	1.194	1.106	0.902	1.008	1.005	0.9995
1.0006	0.999	0.999	2.74	1.97	0.2	1.058	1.022	0.99

Рассмотрим некоторые эксперименты подробнее. В таблице 24 приведены результаты измерений полей в магните ПМ в трех вариантах: включен только ПМ (КО отключена, поле в ПМ 0,5 Тл,  $t_m = 755$  мкс,  $\tau = 1760$  мкс), включена только КО (это двухвитковая обмотка, выполненная проводом диаметром 1.5 мм, координаты осей её витков:  $z = -18.5$  мм,  $r = \pm 5$  мм и  $r = \pm 6.5$  мм, ток в КО  $\sim 0.21$  кА,  $t_m = 45$  мкс,  $\tau = 110$  мкс), включены и ПМ и КО (максимумы их токов совмещены). Цифры в таблице соответствуют координатам в апертуре:  $z = 0; \pm 7.3; \pm 14.6$ ,  $r = 0; +3.75; +7.5$  мм. При 5 Тл поле в ПМ

на координатах  $r = 0$ ,  $z = \pm 14.6$  относительно к полю на координате  $r = z = 0$  упадет до 0.944 (см. таблицу 22), а величина 1.058 при пропорциональном увеличении тока в КО останется примерно такой же, что и обеспечит коррекцию:  $0.944 \cdot 1.058 \approx 1$ . Результаты измерений при поле 5 Тл приведены в таблице 25 (показана нижняя часть апертуры, где установлена КО).

**Таблица 25.**

ПМ			КО			ПМ+КО		
1.0	1.002	1.006	1.0	0.995	0.977	1.0	1.002	1.006
0.99	0.995	1.007	1.19	1.11	0.912	1.001	1.002	1.005
0.943	0.955	0.986	2.7	1.94	0.286	0.999	0.996	0.984

В экспериментах КО запитывались от отдельного источника тока. Можно рассмотреть вариант запитки КО параллельно с шинами ведущего поля магнитов, от одного источника тока. Возможны несколько вариантов. Рассмотрим для примера двухвитковую КО, описанную выше (см. таблицу 24). КО захватывает более половины основного магнитного потока магнита, что ограничивает применимость для запитки КО трансформатора. Можно запитать КО через дополнительную индуктивность. Токи магнита и КО отличаются в  $\sim 60$  раз. Индуктивность магнита  $\sim 0.7$  мкГн, индуктивность одной КО  $\sim 3$  мкГн. Добавив к каждой паре КО  $\sim 40$  мкГн (верхняя и нижняя КО соединены последовательно, их  $L \sim 6$  мкГн) можно их запитать параллельно шинам соответствующих магнитов. К сожалению, в начальных фазах ускорения, когда ведущее поле еще довольно однородное по апертуре (нет еще насыщения железа) такая КО вредна, даже в фазе  $\sim 20^\circ$  составляющая по  $r$  наведенного поля на краях апертуры по  $z$  (это и относительная величина 1.058 в табл. 24) достаточно велика, чтобы не оказывать заметное дефокусирующее действие на периферийные по  $z$  частицы ещё довольно большого по  $z$  пучка.

В препринте ИЯФ 2007-7 на рисунке 1, в приведена кривая насыщения железа магнита. Насыщение железа начинается при токе  $\sim 60$  кА (поле  $\sim 2$  Тл, фаза  $\sim 20^\circ$ ) и практически заканчивается при  $\sim 130$  кА (поле  $\sim 3,7$  Тл, фаза  $\sim 43^\circ$ ). Из графиков следует: для достижения поля 5 Тл потребовался бы ток: в безжелезном магните  $\sim 230$  кА, в магните с насыщенным железом около 190 кА, в магните с ненасыщающимся железом  $\sim 160$  кА, то есть эффективность (по току) использования железа в насыщенном варианте  $\sim 20\%$ , в ненасыщенном  $\sim 40\%$ , а если учесть, что железо и в насыщенном варианте существенно улучшает распределение полей в апертуре и при полях  $> 5$  Тл, то эффективность использования железа очевидна. Следует заметить, что с насыщением железа индуктивность магнита существенно уменьшается, что следует из зависимости, показанной в таблице 26, из которой следует, что к полю 5 Тл рост тока превышает рост напряжения на  $\sim 15\%$ , что снижает эффект насыщения. Это подтверждается и зависимостью величины поля от электрического напряжения  $U$ , питающего магнит, из которой следует, что снижение

амплитуды (уход от линейности) при 5 Тл  $\sim 5\%$ , тогда как в зависимости поля от тока ( из кривой намагничивания) эта величина составляет  $\sim 20\%$ .

**Таблица 26, Рис. 5.**

U, кВ	0.514	0.683	1.366	2.185	2.732	3.415	3.5
I, кА	23.65	31.79	65.35	110.5	141.8	181.1	186
V, Тл	0.758	1.012	2.07	3.27	4.01	4.89	5.0

Параметры, указанные в таблице 26, сняты на прямой модели магнита (см. препринт ИЯФ 2006-5, Рис.1). В модели магнитопровод состоит из двух частей: полукольца внутреннего магнитопровода (его максимальный диаметр  $\sim 100$  мм) изготовлены из конструкционной стали марки Сталь 08КП, наружного (его наружный диаметр  $\sim 180$  мм) – из фосфатированной стали Э420. Было проверено влияние внешнего железа: на распределение поля оно практически не влияет, а на величину поля – да (при 5 Тл оно дает добавку  $\sim 10\%$ ). Длительность импульсов, при которых снимались зависимости: при малых полях  $\tau = 1.43$  мс,  $t_m = 0.668$  мс, при  $\sim 5$  Тл  $\tau = 1.34$  мс,  $t_m = 0.607$  мс.

В таблице 27 представлена зависимость поля от фазы в центре апертуры внутри магнита ( $r = z = 0$ ) и на координате  $r = 0, z = 14.6$  мм (см. таблицу 23) при максимуме поля  $\sim 5$  Тл ( в таблице поле в кГс),  $t_m = 1.2$  мс,  $\tau = 2.9$  мс.

**Таблица 27, Рис. 5.**

Z \ F	3°	5°	9°	15°	23°	33°	45°	59°	75°	90°
z=0	3.44	5.64	9.82	15.69	22.84	30.51	37.96	44.35	48.65	49.92
z=14.6	3.43	5.62	9.79	15.64	22.59	29.82	36.68	42.42	46.12	47.02

Во всех магнитах протонного синхротрона была проведена большая серия измерений интегральных длин (ИД) при максимальных полях 4 Тл. Как показано выше, при этом поле железо в магнитах практически полностью насыщено. В таблице 28 представлена относительная картина распределения ИД в фазах  $5^\circ$  и  $90^\circ$  на “столике” (внутри магнита). ИД на равновесной траектории, к которым отнесены ИД на других координатах, равны соответственно 44 см и 43.98 см.

**Таблица 28.**

		$5^\circ$					$90^\circ$			
1.0055	1.005	1.0034	1.003	1.0034	1.004	0.978	0.967	0.972	0.995	
1.0017	1.002	1.002	1.0005	1.0004	1.011	0.996	0.992	0.988	1.001	
1.0011	1.0017	1.0	1.0018	1.0016	1.010	1.002	1.0	1.001	1.006	
1.0018	1.0019	1.0027	1.0014	1.0001	1.006	0.999	0.994	0.995	1.002	
1.0061	1.0045	1.0042	1.0031	1.0052	0.998	0.976	0.97	0.974	0.996	

В таблице 29 приведены полные ИД, на равновесной траектории они соответственно равны 67.73 и 67.58 см, длительность импульса тока  $t_m = 2.5$  мс. Координаты индукционных катушек в измерительной матрице:  $r = 0; \pm 3.75; \pm 7.5$  мм,  $z = 0; \pm 5.75; \pm 11.5$  мм. Числа в левом верхнем углу представляют относительные величины сигналов с датчиков, расположенных в верхней части апертуры магнита у его внутренней шины (координаты углового датчика  $r = -7.5$  мм,  $z = 11.5$  мм), правые датчики - у наружной шины, нижние – внизу апертуры.

**Таблица 29.**

					5°					90°				
1.01	1.0056	1.0035	1.0025	1.0026	1.005	0.976	0.968	0.971	0.994					
1.004	1.003	1.002	1.0008	1.0006	1.012	1.001	0.994	0.993	1.001					
1.0006	1.002	1.0	1.0013	1.0006	1.009	1.006	1.0	0.998	1.002					
1.002	1.0012	1.001	0.9998	0.998	1.005	0.995	0.992	0.996	1.001					
1.004	1.002	1.001	1.001	1.004	0.998	0.97	5.97	0.978	0.999					

Для оценки влияния краев магнитов на ИД длина измеряемой трассы была увеличена до 80 см (при радиусе магнита 43 см поворот на 90° обеспечивается на длине 67.5 см), а вся длина поделена на 3 части: участок в области токопровода (0-8 см), столик (8-72 см) и район закоротки шин (72 – 80 см). Край шины со стороны токопровода соответствует координате 3 см, край закоротки – 78 см, край набора шихтовки железа со стороны токопровода 6.5 см, со стороны закоротки 73.5 см. Максимальная неоднородность поля в сечении апертуры – напротив края железа. Распределение поля в этом сечении показано в таблице 30, где приведено сравнение распределений против края железа (а) и на столике (б) при полях:

1. Вдали от насыщения железа (обозначены соответственно 1а и 1б), поле на столике 2.64 кГс.
2. В насыщенном состоянии (обозначены 2а и 2б), поле на столике 47 кГс.

**Таблица 30.**

1а		1б		2а		2б	
1.39	1.37	1.0007	0.9964	1.271	1.156	1.0024	0.9482
1.07	1.062	1.001	0.9997	1.06	1.0354	1.0057	0.9922
1.006	1.0	1.0016	1.0	1.011	1.0	1.009	1.0

Поля в центрах апертуры в приведенных сечениях соответственно равны 2.64, 3.45, 33 и 47 кГс. Видно, что поля в углах апертуры отличаются значительно, но это различие быстро спадает с удалением от края железа и не оказывает большого влияния на полные ИД. В таблице 31 представлено распределение ИД на обозначенных участках. Значения ИД на равновесных траекториях этих участков соответственно равны 2.468, 63.373 и 1.692 см. ИД по-

казаны в фазе  $90^\circ$  при поле 4 Тл, длительность импульса тока  $t_m = 1.5$  мс. Картина ИД в сечении существенно несимметрична, поэтому для оценки интегралы приведены к одному квадранту. В таблице 32 приведена зависимость ИД на участках от фазы (на равновесной траектории, максимальное поле 4 Тл).

**Таблица 31.**

	0 – 8			8 – 72			72 – 80		
0.956	0.955	0.9736	0.9744	0.9808	1.0048	0.9139	0.9352	0.971	
0.9732	0.9779	0.9877	0.9942	0.9956	1.0045	0.9855	0.972	0.9849	
1.0	0.9858	0.998	1.0	1.0006	1.0035	1.0	0.994	0.999	

**Таблица 32, Рис. 6.**

$\Delta \setminus F$	$5^\circ$	$12^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
0 – 8	2.3337	2.3488	2.3091	2.3894	2.468
8 – 72	63.7697	63.7464	63.566	63.4276	63.3728
72 – 78	1.5127	1.5354	1.5279	1.6166	1.6922
0 – 78	67.6161	67.6306	67.403	67.4336	67.533

Некоторая особенность распределения в области до  $\sim 40^\circ$  – не ошибка в измерениях – это следствие сложения скиновых и насыщающих железо эффектов (см. таблицу 26). Можно привести более подробную картину распределения ИД вдоль магнита (таблица 33). Здесь хорошо видно, что с ростом фазы на одних участках ИД растут, на других падают, вдали от краев (20 – 56 см) почти не меняются.

**Таблица 33.**

$\Delta \setminus F$	$5^\circ$	$12^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
0 – 2	0.0141	0.0167	0.0206	0.0264	0.0326
2 – 4	0.1393	0.1506	0.1666	0.1937	0.2154
4 – 8	2.1803	2.1815	2.1219	2.1693	2.220
8 – 12	3.952	3.945	3.864	3.818	3.79
12 – 20	8.0016	8.002	8.008	7.991	7.977
20 – 56	35.989	35.991	35.9986	36.0013	36.0043
56 – 64	7.9987	7.998	7.993	7.992	7.988
64 – 68	3.996	3.9956	3.997	3.9832	3.9744
68 – 72	3.8324	3.8148	3.7054	3.6421	3.6391
72 – 74	1.102	1.0974	1.0648	1.0933	1.1214
74 – 76	0.3561	0.3716	0.3934	0.4386	0.4724
76 – 78	0.0546	0.0664	0.0697	0.0847	0.0984

**Таблица 34.**

1.5 мс			2.5 мс			3 мс		
0.9744	0.9808	1.0048	0.9682	0.9742	0.9965	0.9642	0.97	0.9925
0.9942	0.9966	1.005	0.9918	0.9943	1.0035	0.99	0.992	1.003
1.0	1.0004	1.0055	1.0	1.0005	1.007	1.0	1.0006	1.008

Таблица 34 показывает зависимость распределения ИД на столике от длительности импульса тока (фаза  $90^\circ$ , поле 4 Тл). В таблице 35 приведено распределение полных ИД при указанных длительностях импульса тока (фаза  $90^\circ$ , поле 4 Тл). Распределения в фазе  $5^\circ$  отличаются слабо ( в пределах точности измерений) и поэтому не приводятся. ИД на равновесных траекториях соответственно  $t_m$  равны: в фазе  $5^\circ$  67.62, 67.69, 67.75 см, в фазе  $90^\circ$  67.53, 67.59, 67.63 см; заметно, что с увеличением  $t_m$  разность ИД между  $5^\circ$  и  $90^\circ$  чуть растет (0.9, 1, 1.2 мм).

**Таблица 35.**

1.5 мс			2.5 мс			3 мс		
0.973	0.9800	1.0025	0.968	0.974	0.999	0.9646	0.972	0.996
0.994	0.995	1.0033	0.9915	0.994	1.0037	0.9894	0.993	1.004
1.0	0.999	1.0037	1.0	1.0002	1.0058	1.0	1.0003	1.0072

В таблице 36 для сравнения представлены зависимости полных ИД от длительности импульса тока  $t_m$  на равновесной траектории и в крайних измеряемых точках апертуры (фаза  $90^\circ$ , поле 4 Тл). Из таблиц видно, что с ростом длительности импульсов тока ИД в фазе  $90^\circ$  на краях токоведущих шин ( $z \sim 7$  мм и  $>$ ) уменьшаются, в середине ( $z \sim 0$ ) растут. Данные таблицы 36 показывают не только качественную картину зависимости ИД в различных точках апертуры от  $t_m$ , но в данной геометрии токовых шин позволяют оценить и количественно.

**Таблица 36, Рис. 6.**

N	r, z, мм	$t_m = 1.5$ мс	$t_m = 2.5$ мс	$t_m = 3$ мс
1	r = 0, z = 0	67.53	67.59	67.63
2	r = 0, z = 11.5	65.71	65.43	65.24
3	r = 7.5, z = 11.5	67.72	67.52	67.36
4	r = 7.5, z = 0	67.74	67.98	68.12

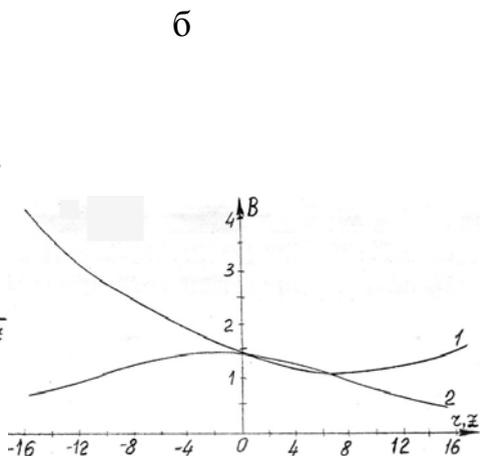
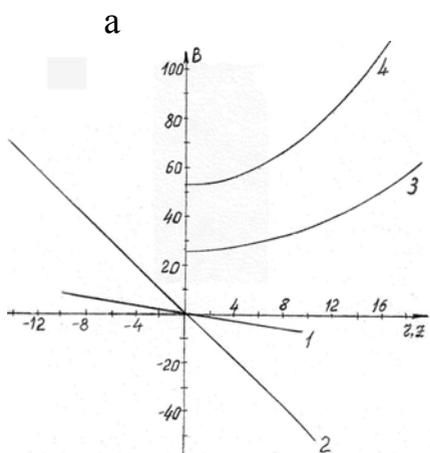


Рис. 1а,б.

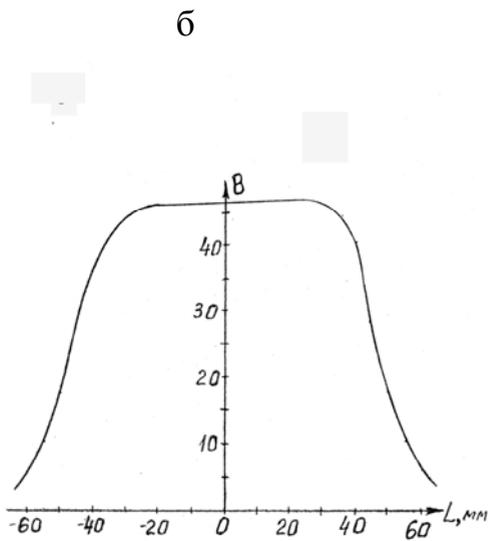
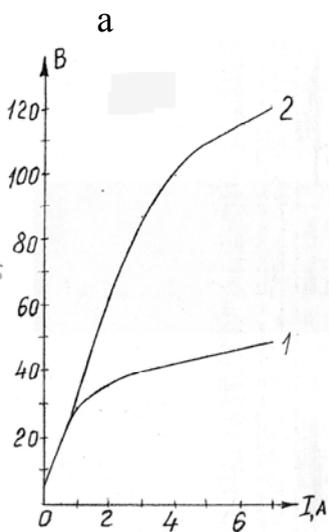


Рис. 2а,б.

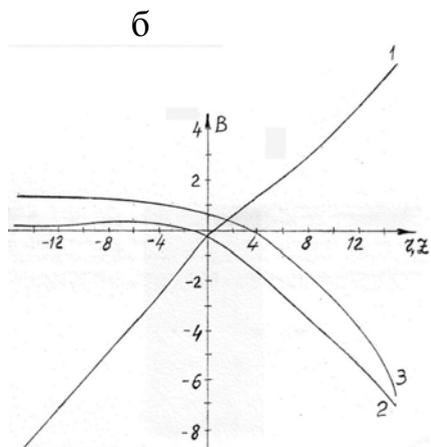
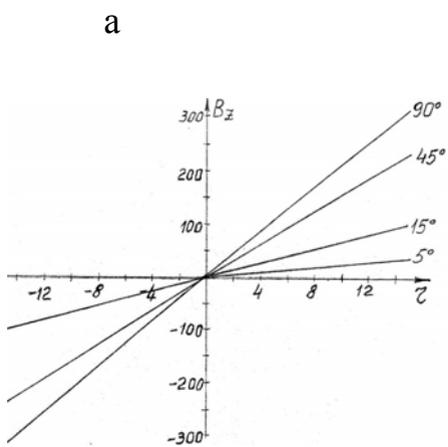


Рис. 3а,б.

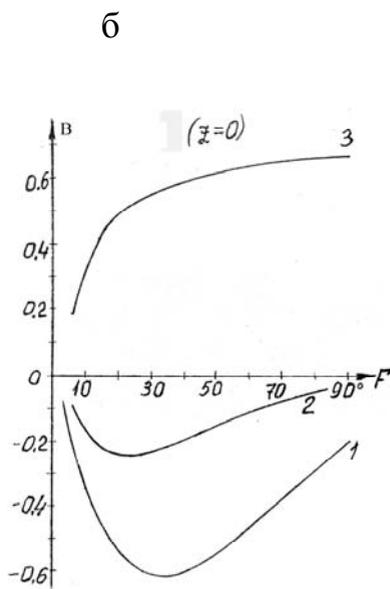
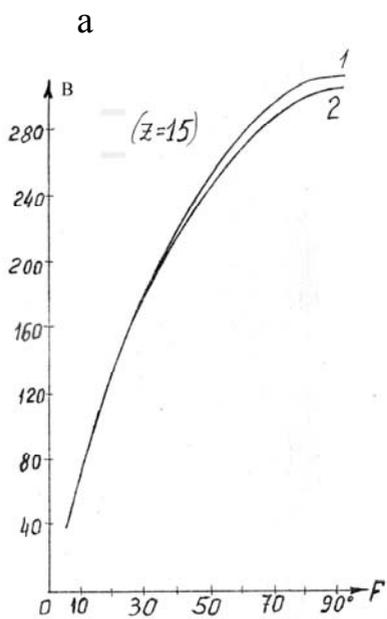


Рис. 4а,б.

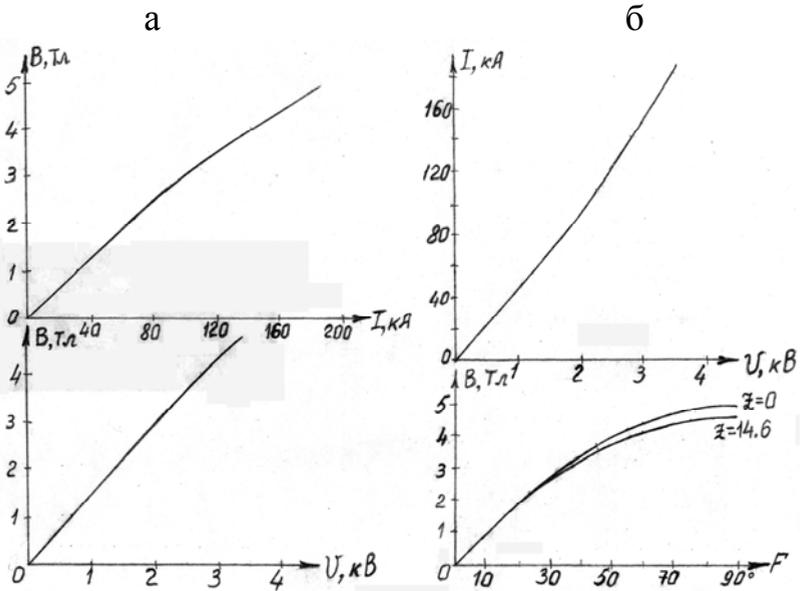


Рис. 5а,б.

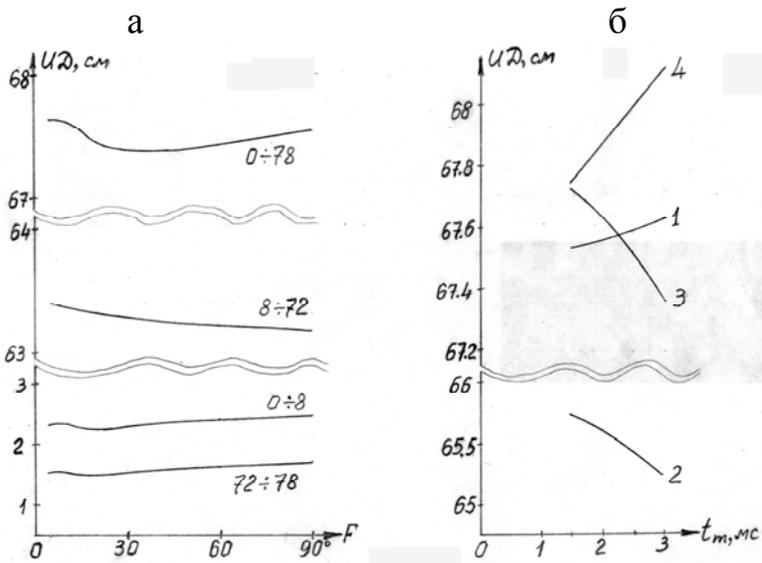


Рис. 6а,б.

## Литература

- [1] *И.И. Авербух, Г.С. Виллевальд, В.Г. Волохов, Т.А. Всеволожская, Л.Л.Данилов, П.А.Довгерд, В.Н.Карасюк, М.М.Карлинер, В.Н.Марусов, Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин.* Проект малогабаритного протонного синхротрона на энергию 200 Мэв. // Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989, т.2, с.305; Европейская конференция по ускорителям частиц. Рим 1988, т.1, с.413, на английском языке.
- [2] *Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров, Т.В. Соколова.* Экспериментальные сильнополевые поворотные магниты. // Препринт ИЯФ 2006-5, Новосибирск, 2006.

Г.С. Виллевалд, Т.А. Всеволожская,  
В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров

**Результаты измерений в элементах  
протонного синхротрона**

G.S. Villevald, T.A. Vsevolzhskaya  
V.N. Karasyuk, G.I. Silvestrov

**The measurements results  
in the proton synchrotron elements**

ИЯФ 2011-5

Ответственный за выпуск А.В. Васильев  
Работа поступила 17.03. 2011 г.

---

Сдано в набор 18.03. 2011 г.  
Подписано в печать 21.03. 2011 г.  
Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.  
Тираж 80 экз. Бесплатно. Заказ № 5

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11