

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 357

9-88-224

**Н.И.Азорский, В.С.Александров, Г.В.Долбилов,
Н.Ю.Казаринов, Н.И.Лебедев, В.И.Миронов,
В.А.Петров, В.Н.Разувакин, А.В.Рашевский,
А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев,
А.Е.Черемухин, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АДГЕЗАТОР КУТИ-20**

1988

Исследования, проведенные на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов электронными кольцами /ПКУТИ/^{1/}, показали, что однооборотная система инъекции с корректором траектории^{2/} позволяет получить интенсивные электронные кольца^{3/}. Вместе с тем ряд вопросов остался неясным. Например, в работах^{4,5/} предложен вариант согласованной однооборотной инъекции, реализующей захват пучка с максимально возможным при заданной апертуре импульсным разбросом частиц в пучке. Ожидаемым следствием этих предложений было повышение коэффициента захвата в 1,5-2 раза /по расчету - с 50-60%^{5/} до 90%/. Экспериментальная проверка этих предложений входила в задачу данной работы. Рассмотрено также влияние пространственного заряда на величину захваченного тока и потери частиц пучка, циркулирующего на равновесной орбите.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка схематично представлена на рис.1. Магнитное поле на равновесной орбите радиуса R_0 создавалось двумя парами катушек, что позволяло, не меняя суммарной индукции $V_{\Sigma} = V_1(R_0) + V_2(R_0)$, в широких пределах варьировать значение показателя спада $n_{\Sigma} = (n_1 V_1 + n_2 V_2) \cdot V_{\Sigma}^{-1}$. Большинство экспериментов проводилось при двух азимутальных положениях корректора: $\theta_1 = 103^\circ$ и $\theta_2 = 130^\circ$, то есть в узлах радиальных бетатронных колебаний в поле с $n_{1\Sigma} = 0,18$ и $n_{2\Sigma} = 0,54$. Из работы^{4/} следовало, что для согласованной инъекции необходимо формировать спадающее по радиусу поле корректора, а в^{5/} была предложена форма его высоковольтного электрода, позволяющего получить требуемое распределение поля. В экспериментах мы опробовали такой электрод с поперечным сечением в виде двух наклонных пластин /2 на рис.2а/, а также рассмотрели конфигурацию 1, рис.2а. Соответствующие им расчетные распределения радиальной компоненты электрического поля представлены на рис.2б. При перемещении электрода 2 по радиусу можно было получать в зоне, занятой при коррекции орбиты частицами пучка /по расчету^{5/} 33-39 см/, как растущие $/R_k \leq 39 \text{ см}/$, так и спадающие $/R_k \geq 42 \text{ см}/$ зависимости $E_r(R) / E_z(R)$ - радиальная компонента электрического поля/.

Объединенный институт
ядерных исследований
БНБ ИЛРСТЕНА

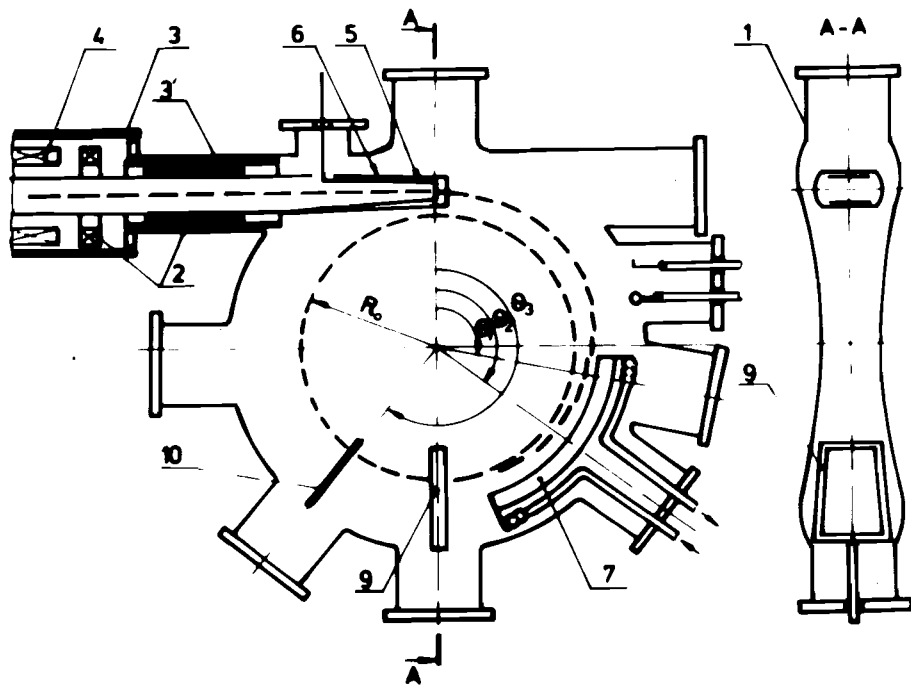


Рис.1. Схема установки: 1 - металлическая вакуумная камера, 2 - магнитные линзы, 3, 3' - ферромагнитные экраны, 4 - соленоид, 5 - токовая петля инфлектора, 6 - экран инфлектора, 7 - высоковольтный электрод корректора, 9 - пояс Роговского, 10 - ламельный датчик для измерения распределения плотности тока пучка.

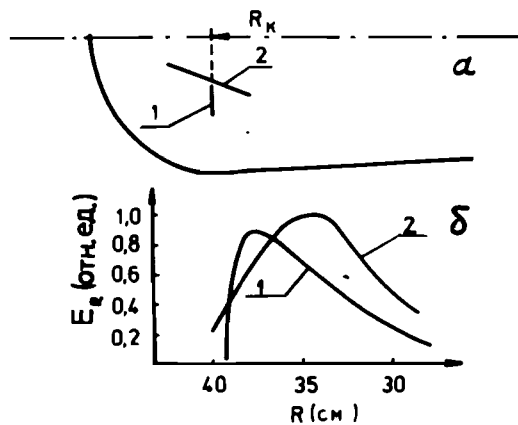


Рис.2. Конфигурации высоковольтных электродов корректора /а/ и соответствующие им распределения электрического поля /б/. Радиальные координаты электродов и распределений совмещены / $R_k = 40$ см/.

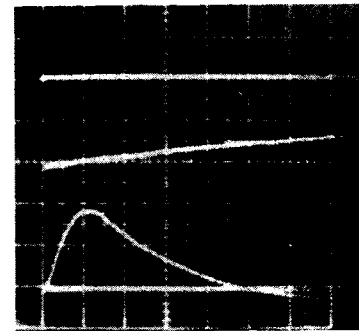


Рис.3. Калибровочные осциллограммы показаний индукционных датчиков. Сверху вниз - нулевая линия и импульс тока имитатора электронного кольца, сигнал индукционных датчиков и его нулевая линия. Развертка - 100 мкс/дел.

Измерения захваченного тока пучка проводились с помощью пояса Роговского /9 на рис.1/ с постоянной времени интегрирования 600 нс и переходным временем ~ 10 нс, а также датчиками индукционного типа, располагавшимися вне камеры. Форма импульса этих датчиков обусловлена двумя конкурирующими процессами: проникновением поля кольца сквозь металлическую стенку вакуумной камеры с характерным временем ~ 50 мкс и уменьшением сигнала с постоянной времени интегрирующей цепи. В результате /рис.3/ они имеют максимальную чувствительность через $\Delta t = 100$ мкс после инжекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Рис.4, 5 иллюстрируют влияние поля корректора на размеры пучка в точке $\theta = 180^\circ$, близкой при $p \approx 0,18$ к азимуту максимума колебаний дисперсионной функции. Распределения плотности пучка без включения корректора /рис.4б, 5в/ получены при снижении уровня магнитного поля во избежание ухода пучка из области регистрации датчика. Из рис.4 видно, что при применении электрода 1 /см.рис.2а/ радиальный размер резко увеличивается, чего не происходит для двух наклонных пластин. Более детальные исследования показали, что в последнем случае размер пучка на больших радиусах уменьшается, а частицы, попадающие в зону, где $\frac{d|E_R|}{dR} > 0$, дефокусируются. Однако, как показали исследования захвата, число частиц, выходящих при этом за акцептанс адгезатора, было небольшим.

Основной характеристикой, определяющей эффективность системы инжекции, является коэффициент захвата $\eta = J_{захв}/J_{инж}$. Из численного моделирования следовало, что потери частиц из циркулирующего пучка заканчиваются через 7-9 оборотов, то есть через 50-65 нс. Экспериментальные данные /см., например, рис.7а/ также свидетельствуют о том, что в первые 50-70 нс наблюдается уменьшение тока пучка. Дальнейший спад сигнала соот-

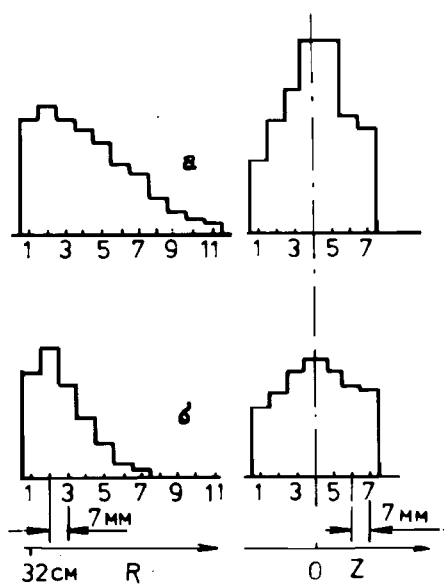
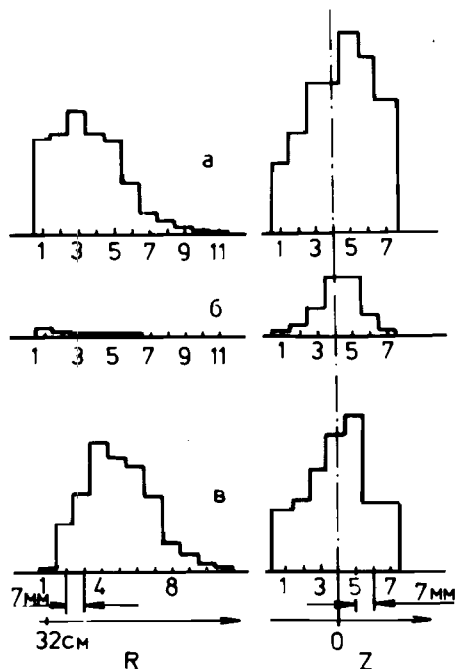


Рис.4. Влияние корректора с электродом 1 /рис.2/ на распределение плотности пучка, $\theta_{изм} = 180^\circ$; а - корректор включен, б - выключен /магнитное поле уменьшено/.

Рис.5. Влияние корректора с электродом 2 /рис.2/ на распределение плотности пучка, $\theta_{изм} = 180^\circ$; а - корректор включен; б - корректор выключен; в - корректор выключен и магнитное поле ослаблено.



ветствует постоянной времени интегрирования пояса. Поэтому ток электронов кольца, измеренный через 100 нс после инжекции, является стационарным, или захваченным: $J_{захв} \approx J / 100 \text{ нс}$. Осциллограмма тока инжектируемого пучка $J_{инж}$ приведена на рис.6. Амплитуда тока в большинстве экспериментов не превышала 300 А, а длительность "плоской" вершины импульса была несколько меньше длительности одного оборота /~ 7,3 нс/, то есть доля частиц, захваченных на других



Рис.6. Осциллограмма тока инжектируемого пучка. Развертка - 10 нс/дел.

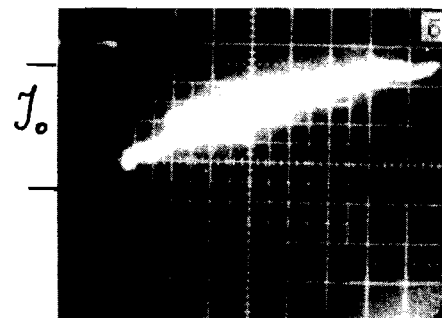


Рис.7. Осциллограммы сигналов, измеренных с помощью пояса Роговского /9 на рис.1/: а - при $p = 0,18$; б - при $p = 0,54$. Развертка: а - 50 нс/дел, б - 100 нс/дел.

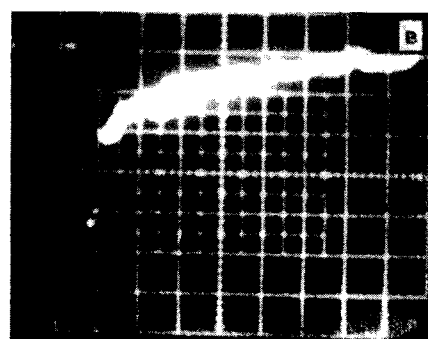
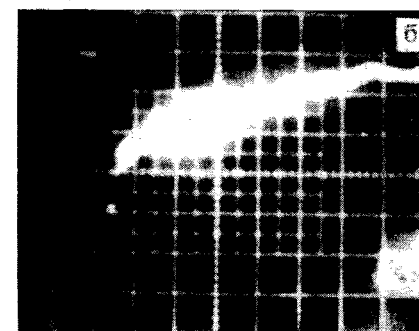
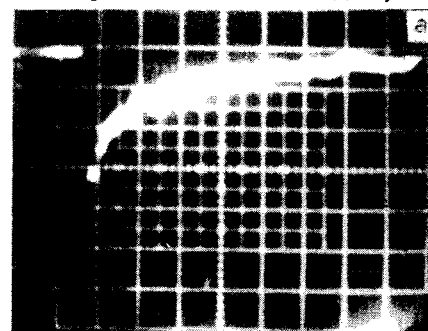


Рис.8. Осциллограммы сигналов, измеренных с помощью пояса Роговского, при различных положениях корректора: а - $R_k = 39 \text{ см}$, б - $R_k = 40 \text{ см}$, в - $R_k = 42 \text{ см}$.

оборотах, оказывалась незначительной. При проведении контрольных измерений вместо $J_{инж}$ измерялся максимальный нестационарный ток J_0 /см. рис.7/, с точностью $\pm 10 \div 15\%$ совпадавший с током частиц, прошедших корректор, и $J_{инж}$. Измерение $J_{инж}$ в каж-

дом импульсе ускорителя было неудобным, поскольку наличие пояса Роговского за входным окном инфлектора снижало захваченный ток на $10 \div 20\%$. Поэтому с указанной систематической погрешностью в качестве коэффициента захвата принималась величина

$$\eta_{\text{захв}} = \frac{J/100 \text{ нс}}{J_0}$$

в нашем случае реализован достаточно высокий коэффициент захвата: $\eta_{\text{захв}} \approx 0,8 \pm 0,1$.

На рис. 8 показаны осциллограммы захваченного тока при различных радиусах корректора R_k . При $R_k = 42$ см коэффициент захвата и захваченный ток уменьшаются несмотря на некоторый рост J_0 . В случае $R_k = 39$ см величина $\eta_{\text{захв}}$ увеличивается, но падает J_0 вследствие уменьшения апертуры. Оптимальным является $R_k = 40$ см. Отметим, что при энергии электронов $E \geq 2,5$ МэВ коэффициент захвата не зависит от интенсивности пучка во всем диапазоне экспериментально наблюдаемых значений захваченного тока, вплоть до $J_{\text{захв}} \leq 230$ А или до числа электронов в кольце $N_e \leq 10^{13}$ /рис.9/.

Размеры сечения сформированного электронного кольца определялись методом перекрытия части апертуры подвижной мишенью.

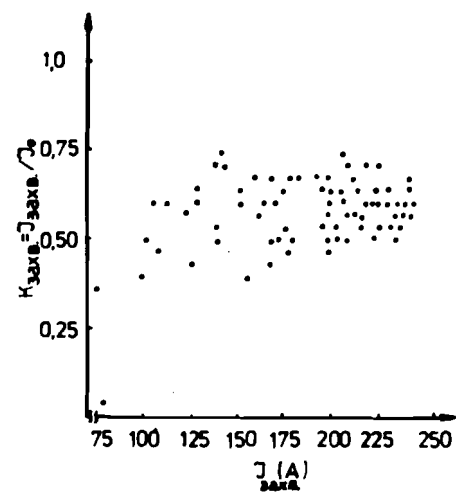
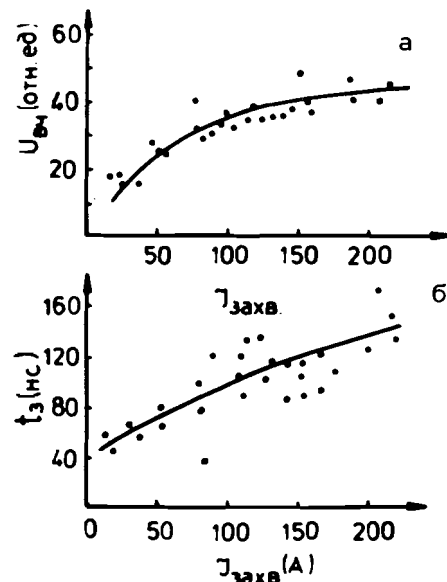


Рис.10. Зависимость начальной амплитуды /а/ и времени ее 10-кратного уменьшения от интенсивности захваченного пучка.

Рис.9. Зависимость коэффициента захвата от интенсивности захваченного пучка.



Эти исследования показали, что радиальный полуразмер $a_R \leq 3$ см, а в аксиальной дорожке ± 2 см от медианной плоскости сосредоточено не менее 50% частиц.

В первые $100 \div 150$ нс после инъекции сигнал с пояса Роговского промодулирован /см.рис.7/ частотой $f \approx 140$ МГц, соответствующей частоте обращения электронов на равновесной орбите радиуса $R \approx 34$ см. Синхронно с модуляцией наблюдается сигнал с ВЧ-антенн на этой же частоте. Этот сигнал затухает с характерным временем $t_3 \leq 120 \div 160$ нс, а зависимость амплитуды этого сигнала от тока пучка $J_{\text{захв}}$ является более слабой, чем линейная /рис.10/. Потеря частиц, коррелирующих с ВЧ-сигналом, не наблюдается. Эти факты свидетельствуют о том, что формируемые в узкой металлической камере кольца устойчивы по отношению к азимутальным неустойчивостям типа НОМ при энергии $E \geq 2,5$ МэВ и $N_e \approx 10^{13}$. Имеющиеся же начальные азимутальные вариации плотности исчезают благодаря разбросу частот обращения частиц в пучке $\Delta\omega$, приводящему к времени затухания ~ 150 нс. Отсюда имеем $\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Delta E}{E} \approx 2 \cdot 10^{-2}$. Для такого разброса и $a_R \approx 3$ см трудно оценить верхнюю границу эмиттанса захваченного пучка:

$\epsilon_{\text{захв}} \leq 60\pi$ мрад.см /для $\mu \approx 0,54$ /. Сравнивая эту величину с зависимостью эмиттанса инжектируемого пучка от интенсивности /рис.11/, получим, что ожидаемый коэффициент захвата не должен превышать 0,8 при 100-процентной эффективности системы инъекции. Отметим, что погрешность таких оценок достаточно велика / $\sim 25\%$ / в основном вследствие большой ошибки в оценке энергетического разброса захваченного пучка.

Индукционные датчики, как правило, регистрировали ток электронов кольца J_d меньший, чем $J_{\text{захв}}$, то есть в первые 100 мкс после инъекции происходили потери частиц.

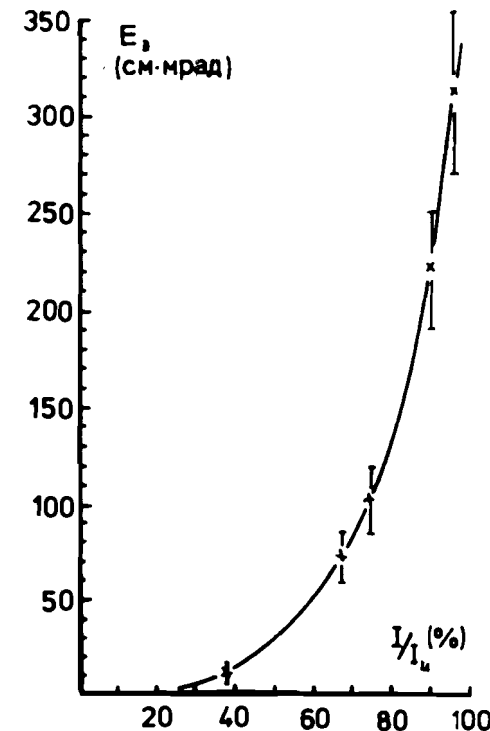


Рис.11. Распределение площади, занимаемой частицами на фазовой плоскости.

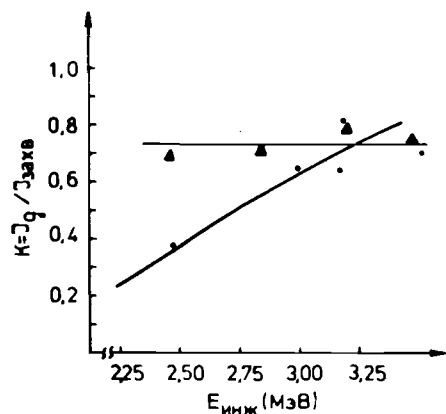


Рис.12. Отношение тока электронов кольца, регистрируемого индукционными датчиками, к захваченному при различных энергиях инъекции: \blacktriangle - $n = 0,54$; \bullet - $n = 0,18$.

На рис.12 представлены зависимости отношения $k = J_d / J_{захв}$ от энергии инъекции $E_{инж}$ при различных значениях показателя спада. Для $n = 0,18$ с уменьшением $E_{инж}$ величина k резко падает, в то время как при

$n = 0,54$ зависимость между $E_{инж}$ и k , с точностью до ошибки измерений, отсутствует. Абсолютные значения $J_{см. таблицу} / J_d$ при $n = 0,54$ пропорциональны току инжектируемого пучка в интервале энергий $2,2 \div 3,0$ МэВ, а в случае $n = 0,18$ убывают с уменьшением энергии значительно быстрее инжектируемого тока. Зависимость $J_{инж}(E_{инж})$ обусловлена ростом эмиттанса со снижением энергии при ограниченной пропускной способности канала инъекции. Полученные экспериментальные зависимости $k(E_{инж})$ удовлетворительно согласуются с предсказаниями теории поперечной когерентной неустойчивости^{/6/}. Для примера в таблице приведены теоретические значения предельных токов J_T при рассогласовании медианных плоскостей вакуумной камеры и магнитного поля $\delta = 2,5$ мм. Для $n = 0,54$ J_T лежат значительно выше достигаемых экспериментально значений, и, следовательно, в этом случае не должна наблюдаться зависимость $k(E_{инж})$ от энергии. При $n = 0,18$ величины J_T оказываются сравнимыми с наблюдаемыми.

Таблица

Энергия инъекции, МэВ	$n = 0,18$				$n = 0,54$			
	$J_{инж}$	$J_{захв}$	J_d	J_T	$J_{инж}$	$J_{захв}$	J_d	J_T
2,2	200	120	25	86	220	110	75	260
2,7	320	220	120	127	320	220	150	316

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально достигнут коэффициент захвата $\geq 0,7$, который практически полностью определяется отношением акцептанта адгезатора к эмиттансу инжектируемого пучка.
2. В формируемых в узкой металлической камере электронных кольцах неустойчивость отрицательной массы подавлена для $N_e \leq \leq 10^{13}$ при энергии инъекции $E_{инж} \geq 2,5$ МэВ и $(\Delta E/E) \approx 2 \cdot 10^{-2}$.
3. Экспериментальные зависимости предельного стационарного тока /с временем жизни ~ 100 мкс/ от энергии электронов не противоречат предсказаниям теории поперечной когерентной неустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.
2. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10053, Дубна, 1976.
3. Долбилов Г.В. и др. - В кн.: II Симпозиум по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1976.
4. Казаринов Н.Ю., Щеулин А.С. ОИЯИ, Р9-83-920, Дубна, 1983.
5. Александров В.С. и др. ОИЯИ, 9-87-223, Дубна, 1987.
6. Алексахин Ю.И., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, Р9-12335, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 апреля 1988 года.