

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4561/2-80

22/9-80
9-80-317

О.И.Бровко, В.П.Вадеев, М.А.Воеводин,
Е.Д.Донец, В.Г.Дудников, В.П.Заболотин,
Л.П.Зиновьев, А.С.Исаев, И.И.Карпов,
А.Д.Коваленко, Н.А.Коруков, Л.Г.Макаров,
А.И.Михайлов, В.П.Овсянников, В.Н.Перфеев,
А.И.Пикин, Ш.З.Сайфулин, И.Н.Семенюшкин,
С.В.Федуков, В.И.Черников, К.В.Чехлов,
Д.И.Шерстянов, И.Н.Яловой

СИНХРОФАЗОТРОН ОИЯИ.

РАБОТА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ

(IV квартал 1979 г.)

1980

1. РАБОТА УСКОРИТЕЛЯ И НАУЧНАЯ ПРОГРАММА

В IV квартале 1979 г. было запланировано 1237 ч работы ускорителя. Оказалось, что на физические исследования и совершенствование синхрофазотрона использовано 1022 ч. /82,6%/, в том числе на физический эксперимент - 927 ч. /74,9%/, на совершенствование - 95 ч. /7,7%/. Технологическая подготовка заняла 112 ч. /9%/, потери времени по причине простоев составили 102 ч. /8,2%/. Прочие затраты - 0,2%.

Соответственно на 1979 г. было запланировано 4202 ч. работы ускорителя. На физические исследования и совершенствование синхрофазотрона использовано 3722 ч. /88,6%/, в том числе на физический эксперимент - 3413 ч. /81,2%/, на совершенствование ускорителя - 309 ч. /7,4%/. На технологическую подготовку затрачено 251 ч. /6,0%/, потери времени по причине простоев - 223 ч. /5,3%/, прочие потери - 0,1%.

В IV квартале ускорялись дейтроны, ядра гелия и углерода.

Интенсивность ускоряемых частиц в импульсе и коэффициент использования ускорителя для физических экспериментов

	IV квартал		1979 г.	
	\bar{N}	$N_{\text{макс}}$	\bar{N}	$N_{\text{макс}}$
p	-	-	$5,3 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
d	$2,0 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^{11}$
He	$0,6 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$0,6 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$
C	$0,4 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
K		1,9		1,7

На синхрофазотроне за прошедший квартал выполнены исследования по изучению дифракционного взаимодействия легких ядер с разными мишенями, измерению жесткой части импульсных спектров α - ^3t фрагментации, изучению взаимодействия релятивистских ядер $^3\text{He}_2$ с протонами. Проведено исследование характеристик пучкового триггера для исследований гиперядер на СКМ-200, отработана связь установки ДИСК-2 с ЭВМ ЕС-1040.

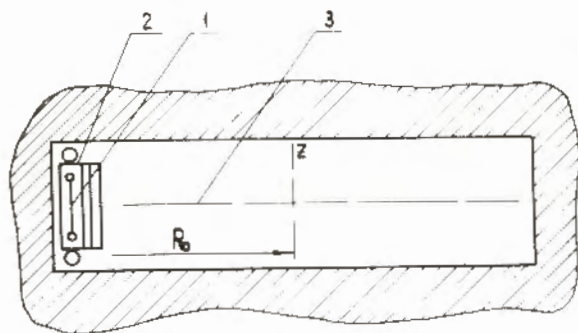


Рис.1. Схема размещения модели секции криогенной откачки в вакуумной камере синхрофазотрона. 1 - криопанель, 2 - радиационный экран. 3 - вакуумная камера синхрофазотрона.

2. МОДЕЛЬ СЕКЦИИ КРИОГЕННОЙ ОТКАЧКИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛЬ СПАДА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОФАЗОТРОНА

В соответствии с предложением понизить давление остаточного газа в синхрофазотроне^{1/} вблизи внутренней стенки вакуумной камеры ускорителя должны быть размещены секции криогенной откачки.

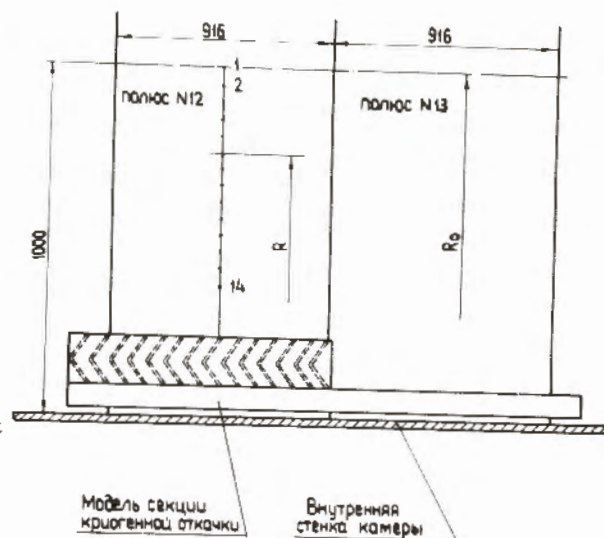
Для измерения величины искажения показателя спада магнитного поля синхрофазотрона индуцированными токами в секции криогенной откачки была изготовлена модель секции в натуральную величину. Модель была помещена внутри вакуумной камеры ускорителя /рис.1/, вблизи вертикальной стенки на внутреннем радиусе. На двух соседних полюсах электромагнита в присутствии модели и без нее были проведены магнитные измерения.

Модель секции криопанели была изолирована от корпуса вакуумной камеры.

Все элементы секции, кроме шевронов, изготовлены из нержавеющей стали, шевроны - из меди. При охлаждении до температуры кипения жидкого азота электропроводность нержавеющей стали меняется мало, медь же увеличивает свою электропроводность в 8 раз^{2/}. Для моделирования условий низких температур шевроны были изготовлены из листовой меди толщиной 3 мм /вместо 1 мм в рабочем варианте/, так что захватываемый шевронами магнитный поток увеличивался в 3 раза, и во столько же раз возрастала проводимость. Конструктивно модель изготовлялась так, чтобы в ходе магнитных измерений можно было оценить вклад шевронного экрана в искажение показателя спада поля без разборки экрана. С этой целью длина шевронного экрана была сделана в 2 раза меньшей, чем длина секции /рис.2/. Таким образом, проводя измерения распределения магнитного поля в двух соседних полюсах ЭМ, можно было учесть влияние шевронов.

Измерения показателя спада магнитного поля синхрофазотрона были проведены при помощи индукционного магнитометра^{3/}, дат-

Рис.2. Схема положений датчика и модели секции криогенной откачки в камере синхрофазотрона при магнитных измерениях.



чиком которого служит гармоническая катушка с высокой чувствительностью $\gamma = 1,85 \cdot 10^8 \text{ В.Гс}^{-1} \text{ см.с}$ и избирательностью 40 дБ к 2-й гармонике /градиенту/ плоскопараллельного магнитного поля^{4/}.

Измерения проводились во внутренней части рабочей области ускорителя, где влияние модели секции криопанели на показатель спада должно быть наиболее значительно. Датчик располагался в медианной плоскости ($z = z_0$) и перемещался в направлении радиуса ускорителя с шагом 5 см /точки 1,2...14 на рис.2/.

Результаты магнитных измерений представлены в табл. 1 и 2. В табл.1 приведены значения величины показателя поля (μ) для поля инжекции $B_{инж} = 0,023 \text{ Т}$ в присутствии криопанели. В табл.2 - то же, но без криопанели. Анализируя результаты магнитных измерений, можно сделать вывод, что модель секции криопанели дает такое незначительное /~1%/ увеличение показателя спада магнитного поля в области измерений, корректировать которое нет необходимости.

3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Некоторое время после запуска ускорителя высокочастотная ускоряющая система оставалась в том виде, в каком была спроектирована. Она включала в себя два восьмикаскадных широкополосных усилителя /ШПУ/, каждый из которых питал высокой частоты /ВЧ / соответствующий ускоряющий электрод и обеспечивал на нем амплитуду ВЧ 20 кВ в диапазоне /0,2÷1,5/ МГц.

Впоследствии прямолинейный промежуток, где размещался один из ускоряющих электродов, был занят для системы медленного вывода пучка из ускорителя. В 1974 г. после запуска инжектора

Таблица 1

Криопанель установлена в камере

$\Delta R = R_0 - R$ (см)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Полоса I2	0,67	0,656	0,643	0,629	0,614	0,603	0,597	0,597	0,611	0,614	0,562	0,519	0,530	0,557
Полоса I3	0,671	0,660	0,651	0,637	0,627	0,618	0,608	0,600	0,613	0,615	0,565	0,521	0,535	0,569

Таблица 2

Криопанель удалена из камеры

$\Delta R = R_0 - R$ (см)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Полоса I2	0,669	0,656	0,645	0,630	0,616	0,601	0,597	0,597	0,611	0,618	0,556	0,511	0,522	0,551
Полоса I3	0,67	0,659	0,654	0,638	0,630	0,618	0,609	0,601	0,612	0,616	0,567	0,520	0,533	0,567

ЛУ-20 на энергию частиц, в 2 раза превышающую энергию прежнего инжектора ЛУ-9М, появилась необходимость повышения амплитуды ВЧ до 30 кВ. Однако получение такой амплитуды ограничивается электрической прочностью ускоряющих зазоров и связано с форсированием режимов отдельных элементов ШПУ, что в итоге приводит к снижению надежности работы ускоряющей системы в целом.

В последние годы ведутся работы по реконструкции ускоряющей системы. Основные цели, преследуемые при этом, заключаются в расширении диапазона модуляции частоты и получении 10-кратного перекрытия вместо 7-кратного, присущего старой системе, а также в повышении надежности за счет снижения амплитуды высокочастотного напряжения на ускоряющем электроде. Эти задачи могли быть решены посредством изменения конструкции индуктивности колебательного контура, емкостью которого является ускоряющий электрод, а также путем применения феррита с большей /примерно в 2 раза/ начальной магнитной проницаемостью и повышением кратности ускорения, с ростом которой увеличивается эффективность ускоряющего электрода. При выборе кратности учитывалось и то обстоятельство, что с ростом ее растет и верхняя граничная частота ШПУ, что усложняет его схему и увеличивает потери в феррите. Наиболее оптимальным оказался режим ускорения на второй кратности с диапазоном модуляции частоты /0,3÷2,9/ МГц.

Расширение частотного диапазона и получение необходимой амплитуды в режиме второй кратности способствуют решению еще одной важной задачи - повышению интенсивности пучков ускоряемых ядер в 2 раза по сравнению с одноэтапным режимом ускорения /5/.

В процессе реконструкции ускоряющей системы проведен большой объем исследовательских, опытно-конструкторских, монтажных и наладочных работ. Проведена модернизация каскадов ШПУ с целью расширения полосы до 3 МГц. Использован принцип /6/ и разработана схема широтно-импульсного модулятора тока подмагничивания ферритов. Разработаны схемы автоматической перестройки частоты и регулирования амплитуды мощного колебательного контура.

После проведения стендовых испытаний колебательный контур был смонтирован и налажен на рабочем канале ускоряющей системы синхрофазотрона. В июле 1979 г. реконструируемая ускоряющая система была сдана в опытную эксплуатацию. В течение полугода она обеспечила ускорение в режиме второй кратности протонов, дейтронов, ядер гелия и углерода при амплитуде высокочастотного напряжения на ускоряющем электроде /12÷13/ кВ. В процессе опытной эксплуатации проводятся исследования различных парамет-

ров и характеристик отдельных узлов ускоряющей системы с целью изучения возможности дальнейшего повышения амплитуды ускоряющего напряжения.

4. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ИОНИЗАТОРЫ "КРИОН-1" И "КРИОН-2"

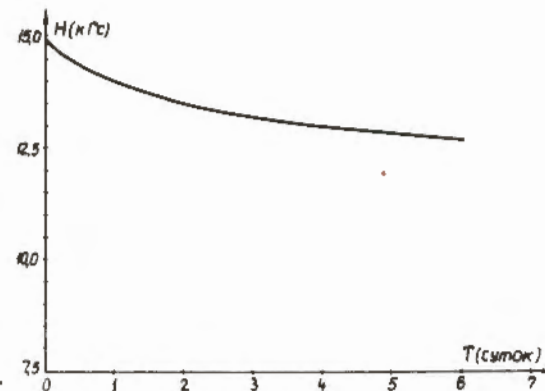
В октябре-ноябре 1979 г. состоялся очередной сеанс ускорения ядер углерода в синхрофазотроне с использованием ионного источника "Крион-1". По сравнению с предыдущим сеансом в источник не было внесено существенных изменений. Но по ряду причин провести достаточную его подготовку к сеансу не удалось. В результате этого в установленном на форинжекторе /ФИ/ источнике резко возрос поток отраженных электронов из области электронного коллектора. Основная часть тока отраженных электронов /~0,5 мА/ перехватывалась анодом электронной пушки. Это привело к ограничению тока пучка до величины ~70 мА, так как модуляция электронного пучка производится маломощным импульсом по аноду электронной пушки. Некоторое количество отраженных электронов высаживалось на элементах дрейфовой структуры, что привело к ухудшению вакуумных условий, и, как следствие, к ограничению времени ионизации до величины ~150 мс. Поэтому в итоге источник работал с меньшей плотностью и величиной тока ионизирующих электронов, нежели в двух предыдущих сеансах.

Основные параметры источника:

Ток электронного пучка	- $I_e = 65$ мА
Плотность тока ионизирующих электронов	- $j = 50$ А/см ²
Энергия ионизирующих электронов	- $E_e = 6$ кэВ
Время ионизации	- $t = 150$ мс
Ионный заряд на выходе источника	- $Q_i = 4,5 \cdot 10^9$ эл.зар./имп.
Интенсивность пучка ядер углерода после ускорения в линейном ускорителе	была $7,5 \cdot 10^7$ ядер/имп.

При анализе параметров работающего источника было обнаружено, что магнитное поле соленоида спадает во времени /рис.3/. Это приводит к некоторому снижению интенсивности и ухудшению фоновых условий, в связи с чем на протяжении сеанса один раз в двое суток одновременно с доливкой в криостат жидкого гелия производилась дозаправка тока в обмотку соленоида. По окончании сеанса предпринималась попытка уменьшить спад магнитного поля - были перепаены спай обмотки соленоида с перемычкой, однако положительного результата это не дало. На рис.3 показана зависимость индукции магнитного поля соленоида от времени. В декабре 1979 г. в рамках подготовки к очередному сеансу были начаты работы по ликвидации причин, которые привели к уменьшению тока ядер из источника "Крион-1".

Рис.3. Зависимость индукции магнитного поля соленоида от времени.



Электронно-лучевой ионизатор "Крион-2" использовался в стеновых условиях для экспериментов по получению ионов ксенона с зарядностью $q > 44+$. Как следует из таблиц Т.Карлсона и др.^{/8/},

энергия связи электронов (I_e) в L-оболочке 44-кратно ионизованного атома ксенона достигает ~8 кэВ. Известно также^{/9/}, что эффективное удаление связанного электрона в процессе электронно-ионного взаимодействия происходит в случае, если бомбардирующий электрон обладает энергией ~2,5 I_e . Поэтому эксперименты производились при энергиях электронного пучка 18-20 кэВ. Для получения электронного пучка такой энергии все системы, питающие катод и анод электронной пушки, а также вытягивающий электрод и первые элементы ионной оптики, были смонтированы на специальной платформе. На нее можно было подавать потенциал до 20 кВ. Командные сигналы для устройств, расположенных на платформе, передавались посредством линии оптико-электронной связи.

В качестве рабочего газа использовалась естественная смесь изотопов ксенона, так что среднее значение массового числа при анализе спектров зарядностей по времени пролета было 131,3. Калибровка время-пролетного анализатора была осуществлена по ионам кислорода от O^{1+} до O^{8+} .

Типичный режим работы ионизатора при работе с ксеноном был следующим: включение электронного пучка током ~120 мА /что соответствует плотности тока в пучке ~150 А/см²/; ввод ~10⁸ ионов ксенона в пучок за время ~1 мс, удержание ионов в пучке и их ионизация в течение определенного времени t_i /до 2,2 с/, вывод ионов из пучка за время ~50 мкс, анализ зарядового состава ионов по времени пролета. Спектры зарядностей ионов, соответствующие различным периодам времени удержания ионов в электронном пучке, регистрировались на экране осциллографа и фотографировались.

На рис.4 представлена картина эволюции спектра зарядностей ионов ксенона в интервале времени ионизации от 2 мс до 2,1 с.

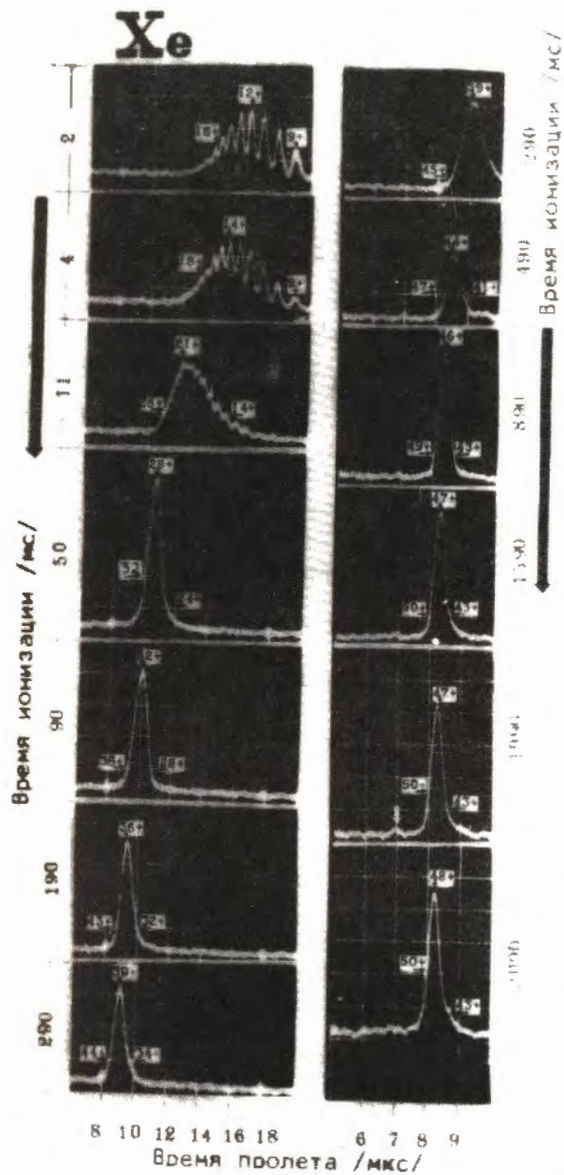


Рис. 4. Эволюция спектра зарядностей ионов ксенона.

Мы видим, что линии соседних зарядностей ионов ксенона достаточно хорошо разрешены лишь на первом снимке, при времени ионизации ~ 2 мс. В дальнейшем разрешение оказывается недостаточным, и в конце концов линии всех зарядностей, присутствующих в данном ионном сгустке, сливаются в один пик. Причинами недостаточного хорошего разрешения являются, во-первых, использование природной смеси изотопов, во-вторых - свойства динамики ионного пакета в самом анализаторе. В таких условиях для правильной идентификации зарядностей, присутствующих в ионном пакете, применялись такие приемы: 1/ предварительная калибровка анализатора по ионам кислорода, 2/ положение на оси времени пролета хорошо разрешающихся линий ксенона до Xe^{15+} , 3/ положение низкоинтенсивного, но достаточно ярко выраженного пика ядер фоновых газов с $A/Z=2$ /см. пик, указанный стрелкой на снимке $t_i=1990$ мс/.

На снимках идентифицированы зарядности ионов Xe в максимуме интенсивности, а также в двух точках слева и справа от максимума, что качественно показывает число зарядностей в спектре

Таблица 3
Результаты измерений по "кусту реперов"

№ цикла	Дата проведения	№ репера	S_{\max} мм	S_{ABC} мм	Средняя квадр. погрешность измер., мм
63	2.11.79	1	+0,02	-0,04	$\pm 0,043$
		2	0	-0,03	
		3	+0,01	+0,03	
		4	-0,04	-0,12	
64	26.12.79	1	+0,05	+0,01	$\pm 0,040$
		2	-0,02	-0,05	
		3	-0,15	-0,12	
		4	+0,13	+0,01	

Таблица 4
Результаты измерений по шкалкам, расположенным на колоннах

Дата проведения цикла	№ цикла измер.	№ квадранта	S_{\max}		S_{ABC}		Средняя квадр. погрешность измерений, мм
			$R_{вн}$	$R_{нар}$	$R_{вн}$	$R_{нар}$	
11.11.79	XXII	I	+0,17	+0,53	+0,10	+0,24	$\pm 0,050$
		II	0	+0,08	-0,24	-1,03	
		III	-0,04	-0,21	-0,52	-2,12	
		IV	+0,04	+0,06	-0,44	-0,99	

Таблица 5
Результаты измерений по шкалкам, расположенным на стойках магнита синхрофазотрона

Дата проведения	№ цикла измер.	№ квадранта	S_{\max}		S_{ABC}		Средняя квадр. погрешность измерений, мм
			$R_{вн}$	$R_{нар}$	$R_{вн}$	$R_{нар}$	
11.11.79	XXII	I	+0,07	+0,54	-1,13	-0,18	$\pm 0,070$
		II	+0,58	+0,08	-0,40	-0,61	
		III	-0,10	+0,20	-1,60	-1,03	
		IV	0	+0,18	-0,59	-0,59	

ре. Поправки на расширение линий за счет наличия нескольких изотопов Хе в природной смеси и аппаратурную ширину линии для одной зарядности дают уменьшение числа зарядностей в спектре на ≈ 2 .

Снимок при времени ионизации 2090 мс показывает, что в этом случае максимум интенсивности в ионном сгустке приходится на ионы Хе⁴⁸⁺, т.е. на углеродоподобный ксенон. Анализ представленного здесь пика показывает, что соответствующий сгусток состоит в основном из ионов зарядностей 48+, 47+ и 49+, а также 50+ и 46+. Количество ионов ксенона измерялось при помощи ионного коллектора, снабженного охранным цилиндром с отрицательным, относительно коллектора, потенциалом. При этом наблюдаются некоторые занижения ионного сигнала за счет вторичной ионной эмиссии с поверхности коллектора. Это явление требует разработки специальных устройств для регистрации столь высокозарядных ионов, какими являются ионы типа Хе⁴⁸⁺. В настоящее время мы можем лишь оценить, по-видимому, с некоторым занижением, количество ионного заряда в сгустке при времени ионизации 2090 мс / 10^9 эл.зарядов/имп./ . Это означает, что Хе⁴⁸⁺ получено $\sim 10^7$ ионов/имп. и \sim по $5 \cdot 10^6$ ионов Хе⁴⁹⁺ и Хе⁴⁷⁺.

Фоновые газы представлены в спектрах весьма слабо смесью зарядностей, имеющих $A/Z = 2$ при количестве, не превышающем 5% ионного заряда рабочего газа, что соответствует эффективному значению давления остаточного газа в объеме ионизации менее 10^{-12} Торр.

Выполненные эксперименты показали, что увеличение энергии ионизирующих электронов и времени ион-электронного взаимодействия в ионизаторе "Крион-2" приводит к соответствующему увеличению зарядности ионов ксенона. Это позволяет надеяться на получение еще более высокозарядных ионов, в частности, гелиеподобного ксенона (Хе⁵²⁺).

5. ГЕОДЕЗИЯ

На протяжении IV квартала было проведено 2 цикла измерений по кусту реперов и один цикл - по высотной сети в главном зале ускорителя. Результаты измерений приведены в табл.3-5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баландиков Н.И. и др. ОИЯИ, Р8-80-172, Дубна, 1980.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники под ред. М.П.Малкова. "Энергия", М., 1973.
3. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, 13-11855, Дубна, 1978.

4. Воеводин М.А. Авт.свид. СССР №31848 от 5 ноября 1978 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 3, №41, 1978, с.170.
5. Михайлов А.И. и др. ОИЯИ, 9-9901, Дубна, 1976.
6. Горюнов Э.П. "Вопросы радиоэлектроники", 1974, X, вып.6.
7. Блинные Н.Н. и др. ОИЯИ, 9-12409, Дубна, 1979.
8. Carlson T.A. et al. Atomic Data, 1970, vol.2, No.1.
9. Janes G.S. et al. Phys.Rev., 1966, vol.145, p.925.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1980 года.