

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ ^{48}Ca , ^{48}Ti И ^{54}Cr НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-280

OBTAINING HIGH-INTENSITY BEAMS OF ^{48}Ca , ^{48}Ti , AND ^{54}Cr IONS ON THE DC-280 CYCLOTRON

*А. А. Лукьянов, И. В. Калагин, В. А. Семин, К. Б. Гикал, А. А. Протасов, С. Л. Богомолов, Д. К. Пугачев,
К. И. Кузьменков, П. И. Виноградов, И. Г. Пищальников, Д. С. Яковлев*

*A. A. Lukianov, A. A. Protasov, I. V. Kalagin, V. A. Semin, K. B. Gikal, S. L. Bogomolov, D. K. Pugachev,
K. I. Kuzmenkov, P. I. Vinogradov, D. S. Yakovlev, I. G. Pishchalnikov*

Объединённый институт ядерных исследований, город Дубна, Московская область, Россия

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia

Успешная эпоха синтеза сверхтяжелых элементов с использованием ионов ^{48}Ca , бомбардирующих тяжелые актинидные мишени, завершилась. Для дальнейшего продвижения в область элементов с $Z > 118$, в качестве частиц, бомбардирующих физическую мишень, необходимо использовать высокоинтенсивные ускоренные пучки более тяжелых нейтронно-избыточных изотопов, таких как ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni и других [1]. При этом использование каждого нового изотопа для получения ускоренного пучка требует исследований, направленных на оптимизацию режимов работы ускорителя.

В работе представлены результаты получения высокоинтенсивных пучков ионов ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{54}Cr на циклотроне ДЦ-280 [2].

Введение

Прямой синтез элементов с $Z > 118$ в реакциях слияния, связан с переходом к бомбардирующим ядрам тяжелее ^{48}Ca , т.к. возможности наработки на ядерных реакторах мишенного материала ограничены производством изотопов ^{249}Cf . Ожидается, что сечения образования ядер с $Z = 120$ в реакции $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$ и ядер с $Z = 119$ в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$ будут примерно в 10-20 раз ниже сечения образования изотопов сверхтяжелых элементов (СТЭ) в экспериментах по синтезу 114 и 115 элементов в реакциях с ^{48}Ca . Поэтому для набора достаточной статистики в экспериментах по синтезу новых и детальному изучению свойств известных изотопов трансактинидных элементов необходимо существенное увеличение интенсивности пучка бомбардирующих ионов, что и является основной задачей ДЦ-280.

На данный момент ускоритель отработал более 20000 часов. Ведутся успешные эксперименты по получению и изучению свойств ранее откры-

тых элементов. Во время приостановки физических экспериментов или же обработки полученных данных по проведенным экспериментам, ускоритель переключается на работу, направленную на оптимизацию, отладку и модернизацию его систем. В том числе немаловажная часть времени без эксперимента посвящена подготовке к будущим физическим экспериментам – настройке и поиску оптимальных режимов работы ускорителя.

Параметры циклотрона ДЦ-280

Базовой установкой Фабрики сверхтяжелых элементов является ускоритель тяжелых ионов – изохронный циклотрон ДЦ-280 с проектной интенсивностью ускоренных пучков не менее 10 мкА частиц для ионов средних масс ($A \sim 50$), что существенно превышает интенсивность пучков на предыдущих ускорителях. Циклотрон предназначен для ускорения пучков положительно заряжен-

Таблица 1

Параметры циклотрона ДЦ-280

Параметры	Расчетные	Реализованные
Потребляемая мощность	550 кВт*ч	
Источник ионов	DECRIС-PM – 14 ГГц на В/В платформе ($U_{\max}=70$ кВ)	
Энергия инжекции	До 100 кэВ/Z	до 76 кэВ/Z
A/Z	4÷7,5	4,44 ($^{40}\text{Ar}^{+9}$) ÷ 6,86 ($^{48}\text{Ca}^{+7}$)
Диапазон энергий	4÷8 МэВ/нуклон	3,81÷7,46 МэВ/нуклон
Диапазон ускоряемых ионов	4-238	12($^{12}\text{C}^{2+}$)-84($^{84}\text{Kr}^{14+}$)
Максимальные интенсивности	>10 мкА частиц	10,4 мкА частиц ($^{40}\text{Ar}^{7+}$), 7,73 мкА частиц ($^{48}\text{Ca}^{10+}$)
Уровень магнитного поля	0,6÷1,3 Тл	0,8÷1,23 Тл
Напряжение на дуантах	130 кВ	130 кВ
Напряжение на дуантах флэт-топ системы	13 кВ	13 кВ
Эффективность ускорения	>50 %	56,28 % (^{48}Ca , 2,1 мкА частиц)
Эмиттанс	менее 30 пм·мрад	измерения не проводились

ных ионов с отношением массы A к заряду Z от 4 до 7,5 в диапазоне энергий 4-8 МэВ/нуклон [3].

Особенностями циклотрона ДЦ-280 является наличие высоковольтной платформы, снижающей влияние пространственного заряда пучка ионов в канале инжекции, и флэт-топ системы, снижающей энергетический разброс пучка и улучшающий его вывод из циклотрона.

Основные параметры циклотрона ДЦ-280 представлены в табл. 1.

Получение пучков ^{48}Ca

Для проведения экспериментов с ионами изотопа ^{48}Ca на физических установках Фабрики СТЭ в качестве ускоряемой частицы был выбран ион $^{48}\text{Ca}^{10+}$, это обусловлено отсутствием примесных ионов при сепарации пучка из ЭЦР-источника (рис. 1) [4].

Результаты, описывающие эффективность трансмиссии пучка ионов кальция от ЭЦР-источника до канала транспортировки, представлены в табл. 2. Для уменьшения нагрузки на элементы циклотрона процесс получения высокоинтенсивных пучков ионов $^{48}\text{Ca}^{10+}$ был разбит на 3 этапа. Первоначальная настройка производилась при токе из ЭЦР-источника 5,5 мкА частиц. На последующих этапах было плавное увеличение интенсивности. Ускорение осуществлялось на частоте ускоряющего поля 8,3 МГц. Настройка ускорителя во всех экспериментах производилась на цилиндр Фарадея, установленный в канале транспортировки (T0FC2) [5].

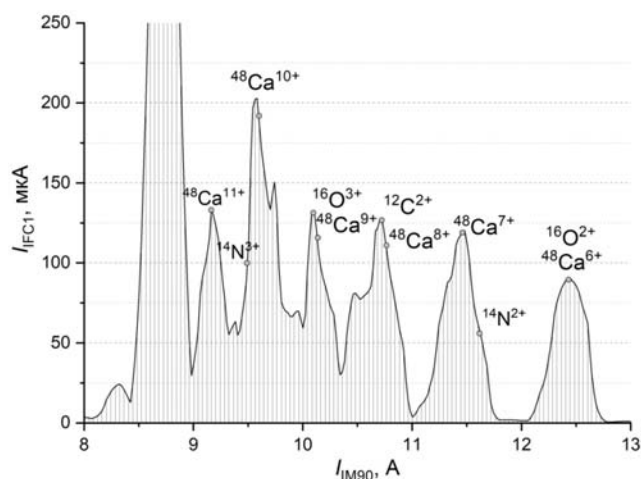


Рис. 1. Спектр ^{48}Ca , оптимизированный для $^{48}\text{Ca}^{10+}$

Как видно из табл. 2, увеличение интенсивности инжектируемого пучка ионов сказывается не только на его прохождении через систему аксиальной инжекции, но, и на захват в ускорение, и на вывод из циклотрона. Это, в свою очередь, снижает общий процент эффективности трансмиссии пучка от источника ионов до цилиндра Фарадея на канале транспортировки. Данное снижение, вероятно, обусловлено как увеличением объемного заряда пучка, так и качеством настройки ускорителя. Максимально полученная интенсивность – 7,73 мкА частиц, что является рекордом для циклотронов на данный момент.

Таблица 2

Трансмиссия пучка $^{48}\text{Ca}^{10+}$ при разных интенсивностях из источника ионов

Ион	Энергия (МэВ)	Интенсивность (мкА частиц)				Канал транспортировки	Эффективность (%)				
		аксиальная инжекция		циклотрон			аксиальная инжекция	захват	циклотрон	вывод	ВСЕГО
		горизонтальная часть	вертикальная часть	R=400 мм	R=1770 мм						
$^{48}\text{Ca}^{10+}$	245	5,5	5,1	3,9	3,4	2,51	92,2	76,3	87,1	75,0	46,0
		11,2	9,7	6,9	6,1	4,50	86,7	71,1	88,1	73,3	39,8
		20,4	17,6	12,4	11	7,73	86,6	70,5	88,4	70,4	38,0

Для успешного проведения физических экспериментов мало только получить высокую интенсивность, важно её удерживать длительное время. Так как стандартный физический эксперимент может длиться от одной недели до нескольких месяцев.

На рис. 2 представлен тренд интенсивности пучка $^{48}\text{Ca}^{10+}$ во время длительного эксперимента в июне 2022 г. на газонаполненном сепараторе DGFRS-2 при интенсивности ~ 4 мкА частиц. Колебания тока на цилиндре Фарадея ТЗFC7 (стоппер на физической установке) обусловлены не только интенсивностью пучка в канале транспортировки, но и количеством газа в камере сепаратора.

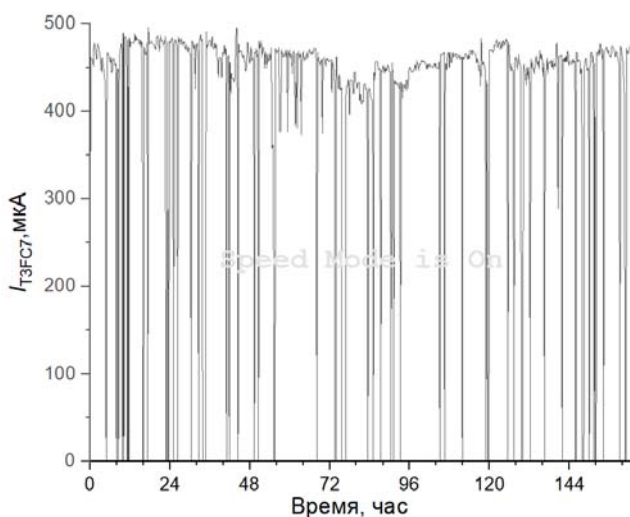


Рис. 2. Стабильность во времени ускоренного пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{10+}$ высокой интенсивности при проведении физического эксперимента (~ 4 мкА частиц)

Получение пучков ^{54}Cr

Для ускорения ионов ^{54}Cr , аналогично ^{48}Ca , были выбраны ионы $^{54}\text{Cr}^{10+}$ (рис. 3).

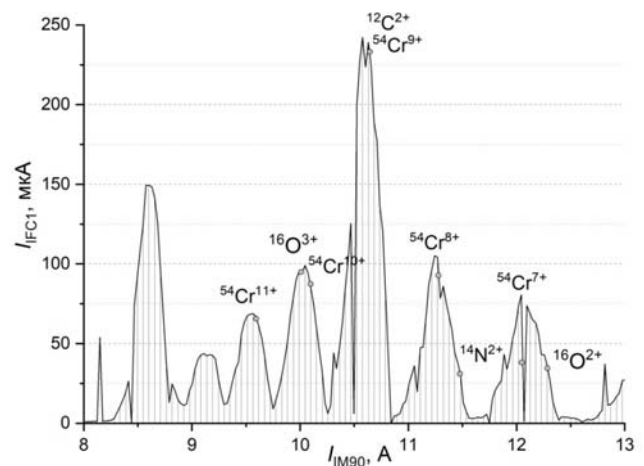


Рис. 3. Спектр ^{54}Cr , оптимизированный для $^{54}\text{Cr}^{10+}$

Вся сложность получения ускоренных высокоинтенсивных пучков ионов ^{54}Cr заключается в том, что с увеличением подаваемой СВЧ мощности в ЭЦР-источник, значительно ухудшается качество пучка. Это, в свою очередь, снижает как эффективность трансмиссии пучка от источника ионов до вывода из ускорителя, так и общую интенсивность. Для снижения влияния процессов, ухудшающих качество пучка, произведены работы по поиску наиболее оптимального режима работы ЭЦР-источника, при которых обеспечивается баланс между СВЧ мощностью и количеством по-

Таблица 3

Трансмиссия пучка ионов $^{54}\text{Cr}^{10+}$

Ион	Энергия (МэВ)	Интенсивность (мкА частиц)					Эффективность (%)				
		аксиальная инжекция		циклотрона		Канал транспортировки	аксиальная инжекция	захват	циклотрон	вывод	всего
		горизонтальная часть	вертикальная часть	R=400 мм	R=1770 мм						
$^{54}\text{Cr}^{10+}$	269	7,98	6,87	4,93	4,37	3,8	86,1	71,8	88,6	87	47,6
$^{54}\text{Cr}^{10+}$	276	9,75	8,22	58,4	56,6	4,32	84,3	71,05	89,46	79,56	44,3

даваемого вещества. Результатом этих работ стало получение ускоренного выведенного пучка интенсивностью 4,32 мкА частиц при 9,75 мкА частиц из ЭЦР-источника. Результаты представлены в табл. 3.

Также проводились исследования стабильности пучка во времени без подстройки источника ионов и ускорителя. Полученные результаты отражены на рис. 4. Было удержано ~4 мкА частиц на протяжении 21 часа.

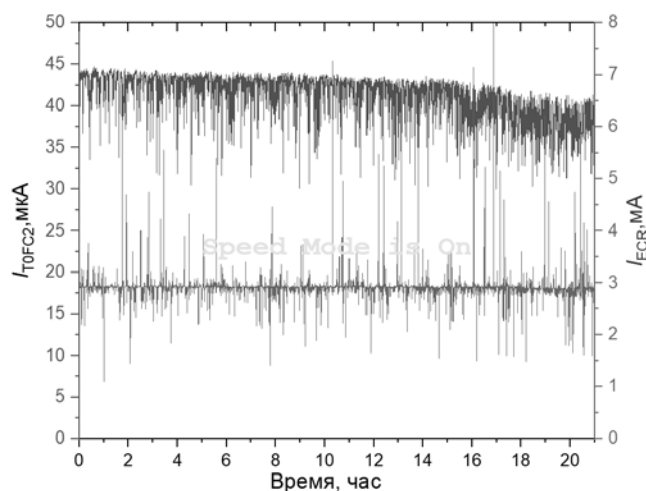


Рис. 4. Стабильность во времени ускоренного пучка ионов $^{54}\text{Cr}^{10+}$ высокой интенсивности (~4 мкА частиц) и общий ток ЭЦР-источника

Получение пучков ^{48}Tl

При проведении первоначальных работ по настройке ускорителя выбран титан природного изотопного состава, который включает в себя следующие изотопы: ^{46}Tl (7,95 %), ^{47}Tl (7,75 %), ^{48}Tl

(73,45 %), ^{49}Tl (5,51 %), ^{50}Tl (5,34 %). Преобладающим изотопом в данной смеси является ^{48}Tl . В дальнейшем, полученные результаты будут применены при работе с требуемым, для проведения экспериментов по синтезу СТЭ, изотопом ^{50}Tl .

Ионы ^{48}Tl были получены разными способами:

- $^{48}\text{Tl}^{9+}$ получен с применением компаунда титана $(\text{CH}_3)_5\text{C}_5\text{Tl}(\text{CH}_3)_3$ (метод MIVOC) [6];

- $^{48}\text{Tl}^{10+}$ получен с применением титановой фольги и SF6.

Максимальная интенсивность ионов $^{48}\text{Tl}^{9+}$, полученная при использовании метода MIVOC – 2,12 мкА частиц ускоренного пучка при 4,74 мкА частиц из ЭЦР-источника.

Помимо обычной настройки на максимальную интенсивность, исследовалось влияние изменения СВЧ мощности, подаваемой в ЭЦР-источник, на прохождение пучка ионов $^{48}\text{Tl}^{9+}$ через тракт инжекции и ускорение. Полученные данные представлены в таблице 4. Настройка осуществлялась на частоте ускоряющего поля 8,8 МГц.

Из табл. 4 видно, что с увеличением СВЧ мощности растёт и интенсивность из ЭЦР-источника, но при этом ухудшается качество пучка, что негативно сказывается на его прохождении как через канал аксиальной инжекции, так и через циклотрон. Это подтверждает и резкое возрастание суммарного тока ЭЦР-источника.

Представленные результаты показывают, что эффективность инжекции и ускорения ионов $^{48}\text{Tl}^{9+}$ падает с увеличением инжектируемого тока. Это может быть обусловлено большим (до 5 мА), по сравнению с аргонем и кальцием, общим током ионов, что значительно увеличивает влияние пространственного заряда. В то же время, самое эффективное полное прохождение (44,7 %) является

Таблица 4

Зависимость эффективности инъекции и ускорения ионов $^{48}\text{Ti}^{9+}$ от СВЧ мощности, подаваемой в ЭЦР-источник

Ион	СВЧ мощность (Вт)	Интенсивность (мкА частиц)					Эффективность (%)				
		аксиальная инъекция		циклотрон		Канал транспортировки	аксиальная инъекция	захват	циклотрон	вывод	всего
		горизонтальная часть	вертикальная часть	R=400 мм	R=1770 мм						
$^{48}\text{Ti}^{9+}$	115	2,35	2,12	1,46	1,23	1,1	90,2	68,9	84,2	89,4	46,8
$^{48}\text{Ti}^{9+}$	168	2,91	2,46	1,77	1,43	1,2	84,5	72	80,8	83,9	41,2
$^{48}\text{Ti}^{9+}$	198	4,74	4,09	3	2,64	2,12	86,3	73,3	88	80,3	44,7
$^{48}\text{Ti}^{9+}$	294	5,07	4,11	2,67	2,1	1,66	81,1	65	78,7	79	32,7
$^{48}\text{Ti}^{10+}$	310	14,49	10,65	4,63	4,09	3,26	73,51	43,46	75,82	79,72	22,51
$^{48}\text{Ti}^{10+}$	290	10,95*	9,49*	4,33*	3,96*	3,16*	86,6*	45,6*	77,6*	86,2*	28,8*

* – интенсивность с частично зажатым коллиматором (ICL1) на горизонтальной части аксиальной инъекции

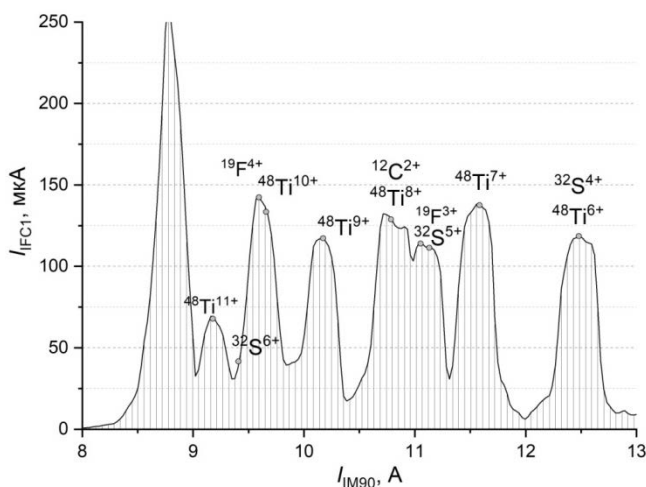


Рис. 5. Спектр ^{48}Ti , оптимизированный для $^{48}\text{Ti}^{10+}$

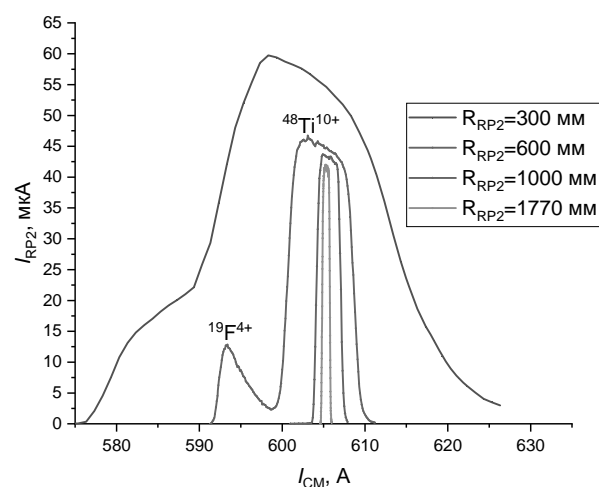


Рис. 6. Резонансная характеристика $^{48}\text{Ti}^{10+}$ и $^{19}\text{F}^{4+}$.

исключением (при СВЧ мощности 198 Вт). Можем сделать вывод о том, что этот режим работы источника ионов и ускорителя является оптимальным для работы с компаундом титана.

Ускоренный пучок ионов $^{48}\text{Ti}^{10+}$ максимальной интенсивности (3,26 мкА частиц) с лучшей стабильностью удалось получить при использовании титановой фольги и SF₆, СВЧ мощности 310 Вт (ток ионов $^{48}\text{Ti}^{10+}$ из ЭЦР-источника – 14,49 мкА частиц), при достаточно посредственном проценте

(22,51 %) полного прохождения. Такой низкий процент обусловлен присутствием в инжектируемом пучке ионов $^{19}\text{F}^{4+}$ вплоть до начальных радиусов ускорения. На спектре ^{48}Ti (рис. 5) видно, что ионы $^{48}\text{Ti}^{10+}$ и $^{19}\text{F}^{4+}$ находятся рядом в одном пике, но в процессе ускорения в циклотроне на радиусе 600 мм происходит их сепарация (рис. 6). Немного улучшить эффективность прохождения (до 28,8 %) с незначительным снижением интенсивности позволяет частичное закрытие коллиматора на гори-

горизонтальной части аксиальной инжекции, что способствует уменьшению количества примесных ионов в инжектируемом пучке.

Также проводились исследования стабильности пучка во времени без подстройки источника ионов и ускорителя. Полученные результаты отражены на рис. 7. Было удержано ~3 мкА частиц на протяжении 11 часов.

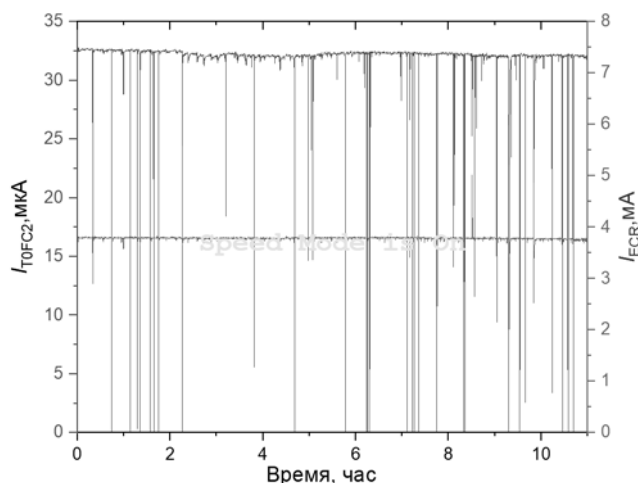


Рис. 7. Стабильность во времени ускоренного пучка ионов $^{48}\text{Ti}^{10+}$ высокой интенсивности (~3 мкА частиц) и общий ток ЭЦР-источника

Вывод

На циклотроне ДЦ-280 получены и стабильно удержаны во времени высокоинтенсивные пучки ионов $^{48}\text{Ca}^{10+}$, $^{48}\text{Ti}^{9+}$, $^{48}\text{Ti}^{10+}$ и $^{54}\text{Cr}^{10+}$. Основная цель эксперимента – оптимизация процесса получения пучков бомбардирующих ионов на циклотроне ДЦ-280 для проведения экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов с $Z > 118$.

Полученные результаты увеличивают возможности проведения экспериментов по синтезу новых и изучению ядерно-физических и химиче-

ских свойств ранее открытых сверхтяжелых элементов.

Список литературы

1. Гульбемян Г. Г., Дмитриев С. Н., Иткис М. Г. и др. Запуск циклотрона ДЦ-280 – базовой установки Фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 653–665 http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2019_6/40_Gulbehyan.pdf.

2. Виноградов П. И., Протасов А. А., Семин В. А. и др. Влияние «FLAT-TOP» резонансной системы ускорителя ДЦ-280 на пучок заряженных частиц // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2023. № 1. 2310502. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310502 <http://vmu.phys.msu.ru/file/2023/1/2310502.pdf>.

3. Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu. Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. ©NS 160^a. EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001. DOI:10.1057/epiconf/201613108001. URL: <https://inspirehep.net/files>.

4. Gikal K. B., Bogomolov S. L., Ivanenko I. A. et al. Peculiarities of producing ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{52}Cr beams at the DC-280 // RuPAC2021, Alushta, Russia <https://inspirehep.net/files/15a71803066eca600ee34087a32538d0>.

5. Semin V. A., Bogomolov S. L., Gikal K. et al. The experimental research of cyclotron DC-280 beam parameter // RuPAC2021, Alushta, Russia <https://inspirehep.net/files/7488d7a48d675ac6e46cd6a7cc057d48>.

6. Логинов В. Н., Богомолов С. Л., Бондарченко А. Е. др. Получение интенсивных пучков ионов никеля, хрома, кремния и кобальта на циклотроне ДЦ-60 // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 2(227). С. 153–157 www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_2/12_Loginov.pdf.