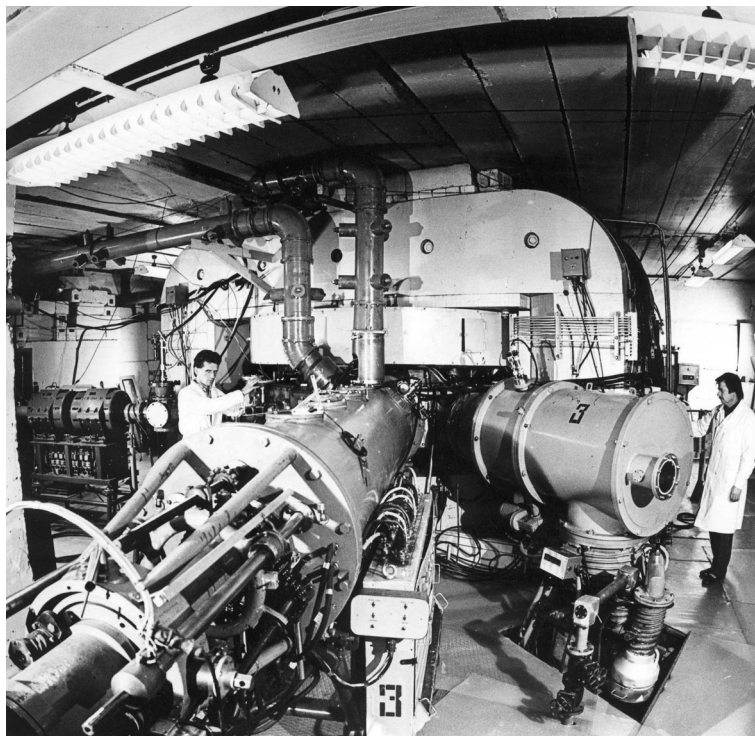


кими аналогами СТЭ: кимберлитовые трубки, солевые рассолы в зонах глубинных разломов земной коры (район южного Каспия, Красного моря и Калифорнии). Исследовались многочисленные образцы руд и минералов, обогащенные легкими гомологами сверхтяжелых элементов с атомными номерами $Z = 108-115$. Сюда можно отнести глубинные железо-марганцевые конкреции Тихого океана, которые к тому же могли содержать элементы из «космической пыли».

Были также проведены оригинальные исследования по поиску сверхтяжелых ядер в массовом спектре космических лучей (Г.Н.Флёров, В.П.Перельгин и др.). С этой целью травлением выявляли скрытые треки тяжелых частиц в кристаллах некоторых минералов, извлеченных из метеоритов, так как они «экспонировались» в космосе на протяжении геологических времен.

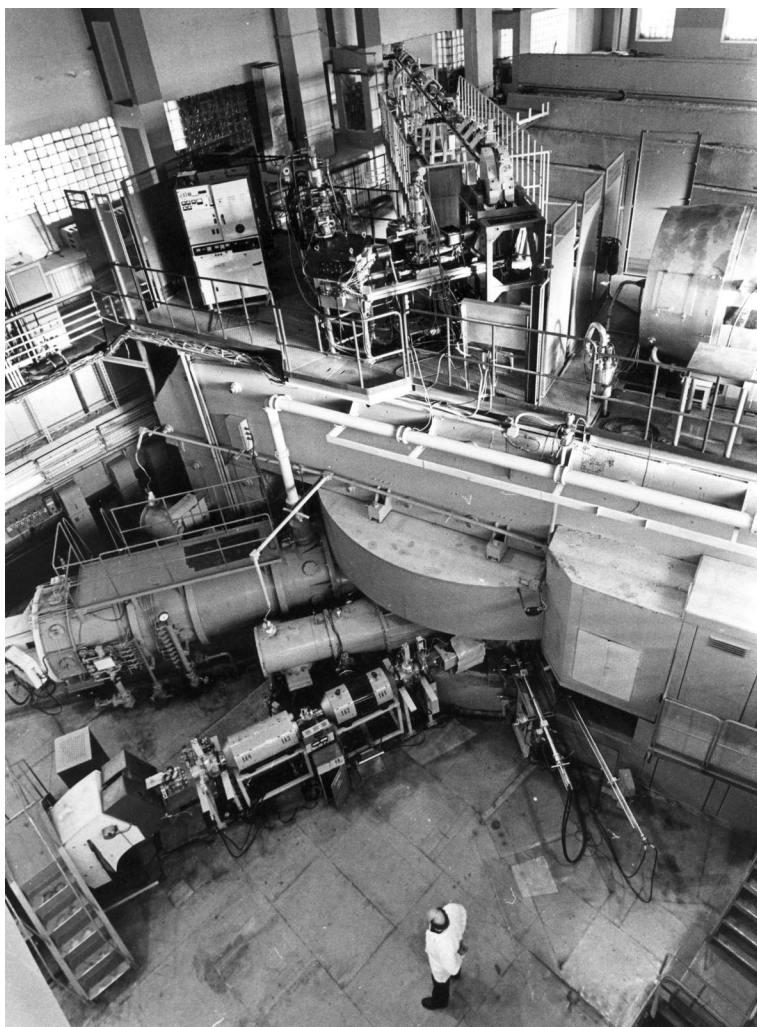
7. Развитие ускорительной базы ЛЯР

Развитие ускорительной базы Лаборатории ядерных реакций шло в направлении получения тяжелых ионов более высокой энергии, повышения интенсивности пучков, ускорения ионов большей массы. Циклотрон У-300 был классическим циклотроном, и это накладывало определенные ограничения на достижимую энергию тяжелых ионов. Она не могла превышать 10 МэВ на нуклон. Циклотроны следующего поколения должны были быть изохронными.



Двухметровый
циклотрон
У-200

В середине 60-х годов было принято решение о сооружении в ЛЯР изохронного циклотрона с диаметром полюсов 200 см (У-200) на основе имевшегося в то время в лаборатории классического циклотрона с диаметром полюсов 150 см. В основу конструкции изохронного циклотрона были положены новые идеи и технические решения, до этого практически не применявшиеся в циклотронной технике. Была создана компактная магнитная структура с высоким уровнем магнитного поля, дуанты с малой угловой протяженностью располагались в долинах магнитных полюсов, использовался многомодовый режим ускорения на различных гармониках высокочастотного электрического поля. Для вывода пучка ионов впервые в мире использован метод перезарядки ускоряемых ионов, предложенный в 1964 году Г.Н.Флёровым, Ю.Ц.Оганесяном и Г.Н.Вяловым. Создание изохронного циклотрона У-200 началось в 1966 году, первый пучок ионов получен в 1968 году. Впервые получены пучки тяже-



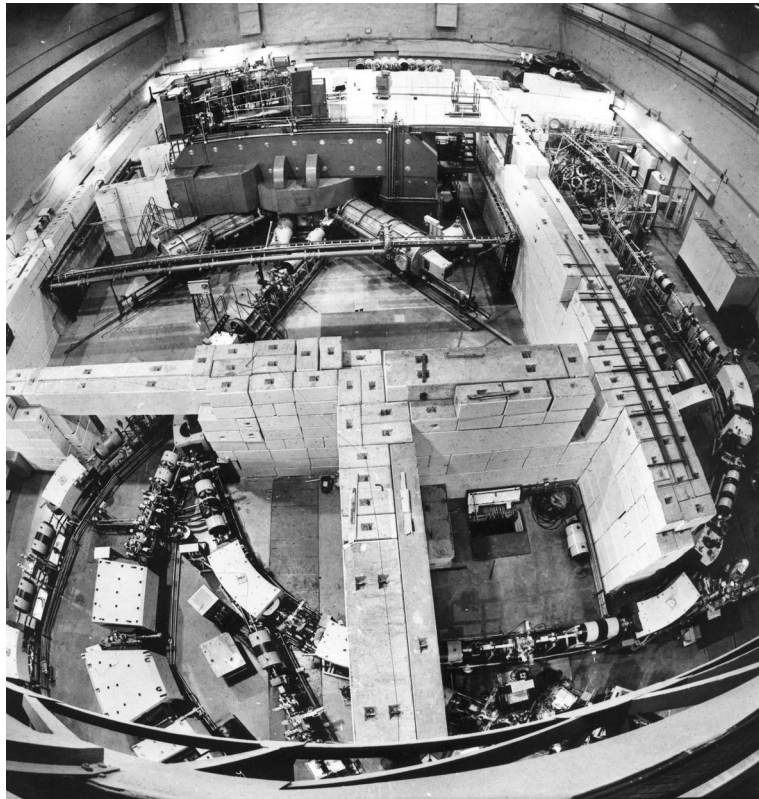
Циклотрон
У-400 с ЭЦР ион-
ным источником
(сверху на яре
циклотрона)

лых ионов с энергией более 10 МэВ на нуклон, вплоть до 20 МэВ на нуклон. У-200 был первым в СССР и странах-участницах ОИЯИ изохронным циклотроном тяжелых ионов.

В 1972 году циклотроны У-300 и У-200 были переведены в режим совместной работы. На их тандеме были впервые получены пучки ионов ксенона с энергией около 1 ГэВ и интенсивностью 10^{10} ионов в секунду. Это первый в мире циклотронный комплекс, ставший прообразом подобных комплексов, созданных позднее во Франции, США, КНР, Швейцарии, ЮАР и Японии.

Вместе с тем продвижение к области сверхтяжелых элементов требовало пучков тяжелых ионов исключительно высокой интенсивности. Лаборатория вновь обратилась к прямому методу ускорения с использованием одного большого циклотрона и высокоинтенсивного ионного источника дугового типа. В 1974 году было принято решение о сооружении в ЛЯР изохронного циклотрона с диаметром полюсов 400 см (У-400). В основу проекта У-400 был положен опыт сооружения и эксплуатации циклотрона У-200. Циклотрон У-400 проектировался в ЛЯР, изготавливался, в основном, в Опытном производстве ОИЯИ, монтировался силами сотрудников ЛЯР. Работами по проектированию и сооружению У-400 руководил Ю.Ц.Оганесян.

Первые детали У-400 начали изготавливать в июле 1975 года, монтаж и сборка ускорителя были закончены в августе 1978 года. В декабре того же года пучок тяжелых



Циклотрон
У-400М и зал экс-
периментальных
установок

ионов был доведен до конечного радиуса и выведен из камеры ускорителя. Циклотрон У-400 позволял получать пучки тяжелых ионов с энергией от 0,5 до 25 МэВ на нуклон. На нем ускорен большой набор тяжелых ионов, включая ионы редких разделенных нуклидов. Интенсивность пучков в указанном энергетическом интервале оставалась рекордной в мире на протяжении многих лет. Дальнейшее развитие циклотрона У-400 связано с созданием в 1996 году системы аксиальной инжекции пучка из ECR-источника с частотой 14,5 ГГц. Целенаправленное повышение эффективности этой системы дало возможность получать пучки ^{48}Ca с интенсивностью $(3-5) \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$ при расходе рабочего вещества всего 0,4 мг/ч, что имело решающее значение для успешного синтеза сверхтяжелых элементов с атомными номерами от 112 до 118.

Последний проект реконструкции У-400 предполагает уменьшение энергетического разброса частиц до 10^{-3} , плавную вариацию энергии тяжелых ионов с точностью $5 \cdot 10^{-3}$, увеличение интенсивности пучков при одновременном уменьшении в четыре раза энергозатрат на электропитание магнита циклотрона.

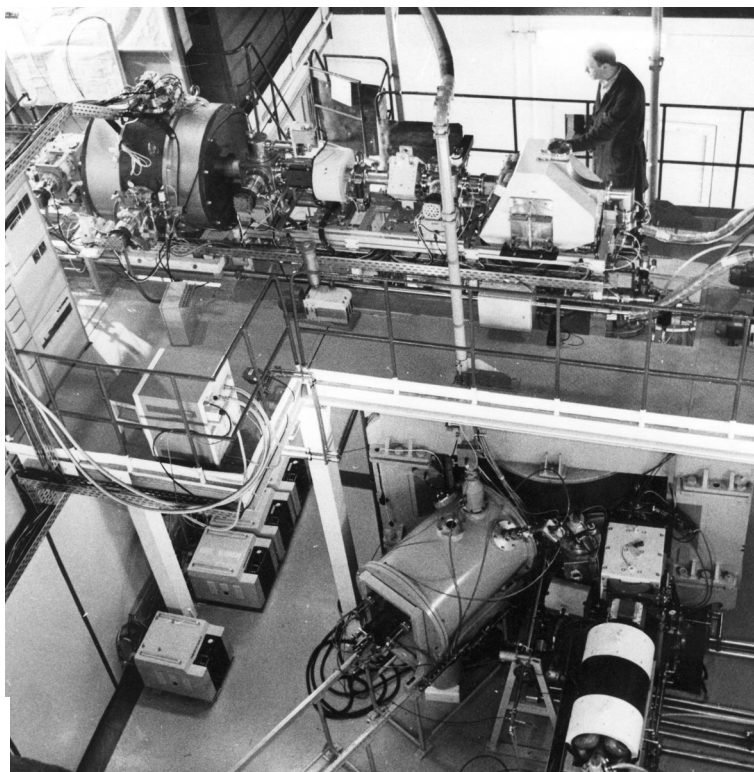
В конце 80-х годов было принято решение о радикальной реконструкции циклотрона У-300. Задача была увеличить диаметр полюсов его магнита до 400 см и ввести аксиальную инжекцию тяжелых ионов из ECR-источника, созданного в ЛЯР. Рекон-



Камера микро-
трона МТ-25 —
ускорителя
электронов

струкция была начата в 1989 году, а в мае 1991 года на У-400М был получен пучок ${}^4\text{He}$ с энергией 30 МэВ на нуклон. В течение 1992–1994 годов была создана разветвленная система каналов транспортировки пучка, оборудованная необходимыми средствами диагностики и контроля. На этих каналах был размещен ряд новых экспериментальных установок.

В последние годы все большую роль в ядерно-физических исследованиях начинают играть пучки экзотических изотопов легких элементов, обладающие большим избытком нейтронов, такие, например, как ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$. Эти изотопы получают исключительно в ядерных реакциях, они радиоактивные (часто очень короткоживущие) и поэтому обычно говорят о «радиоактивных пучках». В ЛЯР для этих целей как раз и используется циклотрон У-400М, на котором пучки необходимых радионуклидов получают за счет фрагментации ядер ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{15}\text{N}$, ускоренных до энергий (35–45) МэВ на нуклон и он-лайн магнитного разделения продуктов реакций. Интенсивность вторичных пучков ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ составляет, соответственно, $1 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при энергии 25 МэВ на нуклон. Существенно большие возможности для исследований с радиоактивными пучками открывает создаваемый в ЛЯР комплекс DRIBs. В первой фазе проекта (DRIBs-I) используется комбинация циклотронов У-400М и У-400 и ионопровод длиной ~ 100 м для транспорта пучка от первого ускорителя ко второму. Циклотрон У-400М служит для получения радиоактивных изотопов, которые с использованием он-лайн ионного источника и ускорения до низкой энергии передаются в



Циклотрон
ИЦ-100 с
ЭЦР-источником



ЭЦР-источник, созданный в ЛЯР

У-400 для их ускорения до необходимой энергии. Эта комбинация циклотронов позволит получать пучки ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ с энергиями от 6 до 16 МэВ на нуклон при интенсивности, соответственно, 10^{10} и 10^7 с $^{-1}$.

Вторая фаза проекта (DRIBs-II) предназначена для исследований с пучками тяжелых радиоактивных ядер с массовыми числами 70–140. Она включает микротрон МТ-25 – ускоритель электронов до энергии 25 МэВ. Тормозным излучением пучка электронов вызывают деление ядер в урановой мишени и из осколков деления формируют пучки радиоактивных ядер. Далее, как и в DRIBs-I, пучки будут транспортироваться в циклотрон У-400 и ускоряться до конечной энергии. Наибольший интерес для исследований представляют пучки нейтроноизбыточных ядер, таких как ${}^{132}\text{Sn}$, ${}^{133}\text{Sb}$, ${}^{134}\text{Te}$. Они могут быть ускорены до энергий ~ 10 МэВ на нуклон при интенсивности $\sim 3 \cdot 10^6$ частиц в секунду.

Для проведения прикладных исследований в 1986 году в ЛЯР был создан малый циклотрон ИЦ-100. В 2003 году он реконструирован в изохронный циклотрон с ЭЦР-источником. Новый ИЦ-100 позволяет получать пучки ионов от В до Хе с энергиями (0,5–1,2) МэВ на нуклон. Он оснащен ЭЦР-источником 18 ГГц и сверхпроводящей магнитной системой.

В создание ускорительной базы ЛЯР на разных этапах ее развития наиболее существенный вклад внесли: Ю.Ц.Оганесян, В.С.Алфеев, В.В.Бехтерев, С.Л.Богомолов, П.А.Веселов, Б.Н.Гикал, А.А.Гринько, Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, Б.А.Загер, А.И.Иваненко, В.В.Игумнов, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, А.Ф.Линев, В.Н.Мельников, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, В.Н.Покровский, Н.И.Пронин, А.В.Решетов, К.И.Семян, Ю.П.Третьяков, А.Н.Филипсон, И.А.Шелаев.