

УДК 621

## Разделение изотопов лития в плазме методом ионного циклотронного резонанса

Н. М. Горшунов, Д. А. Долголенко, Г. Е. Зотин,  
А. И. Карчевский, В. С. Лазько, Ю. А. Муромкин,  
В. Г. Пашковский, А. Т. Пешков

Институт молекулярной физики, РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

*Представлены результаты экспериментов, посвященных изучению процесса разделения изотопов лития методом селективного ионного циклотронного резонанса (ИЦР) нагрева. Проведены эксперименты по разделению изотопов лития с использованием коллекторных систем различной конфигурации (цилиндрической и плоской) для отбора селективно нагретых ионов. Эти коллекторные системы могли располагаться как в однородном, так и в расходящемся магнитном поле. В экспериментах достигнуто содержание 83 %  ${}^6\text{Li}$  в продукте (коэффициент разделения  $\alpha \approx 60$ ) при коэффициенте извлечения целевого изотопа из плазменного потока  $\gamma = 0,6$ . При средней концентрации  ${}^6\text{Li}$  в продукте 62 % коэффициент извлечения достигал 0,15.*

К настоящему моменту при разделении изотопов ИЦР-методом получены высокие коэффициенты разделения [1—3]. Однако данных, характеризующих степень извлечения целевого изотопа из плазменного потока, в литературе приводится мало. В работах [4—6] сообщалось, что при разделении изотопов лития при высоких коэффициентах разделения коэффициент извлечения  ${}^6\text{Li}$  не превышал 10 %. Практическое применение ИЦР-метода разделения требует повышения коэффициента извлечения целевого изотопа. Первая задача — увеличение доли нагретых частиц среди ионов выделяемого изотопного компонента. Очевидно, что вследствие эффекта Допплера и некоторых других причин не все частицы в потоке плазмы нагреваются. Важную роль здесь играет распределение нагревающего ВЧ электрического поля в плазме. Измерения структуры нагревающих ВЧ-полей для магнитной и электрической компоненты проводились ранее и были опубликованы в [7, 8]. Вторая задача связана с отбором нагретых частиц. Не все нагретые частицы собираются на коллектор. Дело не только в геометрии коллекторной системы, но, возможно, и в том, что электрические поля, связанные с разделением зарядов при задерживающем потенциале на коллекторе, ограничивают ионный поток на коллектор. В данной работе представлены результаты экспериментов по изменению коэффициента извлечения изотопа  ${}^6\text{Li}$  при отборе селективно нагретых ионов  ${}^6\text{Li}^+$  на коллекторные системы различных конструкций.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1, а. В вакуумной камере в постоянном магнитном поле, создаваемом внешними магнитными катушками 8, возбуждался продольный разряд в парах лития между катодом 2 и сетчатым анодом 5 ( $I_d = 50$ — $100$  А;  $U_d = 20$ — $30$  В). В области катода внутренней катушкой 4 создавалось дополнительное магнитное поле. Длина разрядного промежутка составляла в данных экспериментах около 20 см. Сетча-

тый анод был постоянно соединен с цилиндрическим анодом 3. Литий подавался в катод в жидком виде с помощью поршневой системы подачи 9. В катоде, имевшем подогреватель (2 кВт), литий испарялся и выходил в разрядный промежуток в виде пара через отверстия в катоде. При подаче лития  $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$  г/с пробой в промежутке катод — сетка происходил при напряжении около 100 В. Плазма распространялась за сетку вдоль магнитного поля к противоположному торцу установки. На участке с однородным магнитным полем длиной 0,8 м ( $\Delta B/B < 0,01$ ) осуществлялся селективный ионный циклотронный нагрев. Вращающееся электрическое поле, ускоряющее ионы, создавалось индукционно четырехзаходной винтовой антенной длиной 65 см. Шаг винта проводников совпадал с длиной антенны ( $\lambda$ -антенна). Коллектор обогащенного лития 7 располагался либо непосредственно за зоной нагрева ( $B \approx 0,24$  Тл), либо в ослабленном магнитном поле ( $B \approx 0,24$  Тл), места расположения коллекторной системы показаны на рис. 1, б.

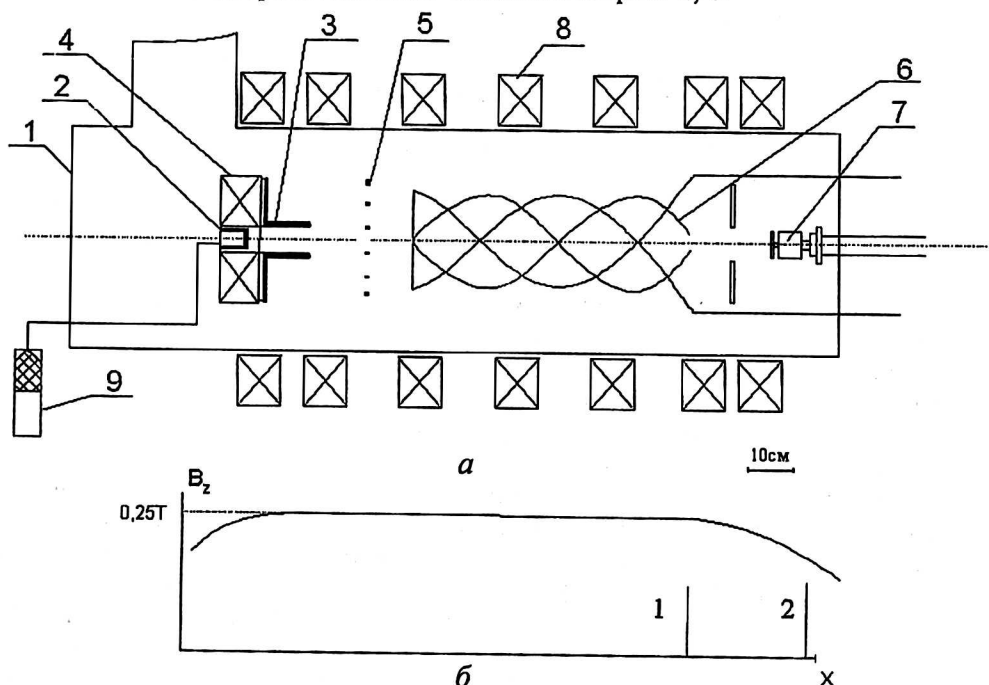


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а):

- 1 — вакуумная камера; 2 — катод; 3 — цилиндрический анод; 4 — дополнительная катушка магнитного поля; 5 — сетчатый анод; 6 — ВЧ-антенна; 7 — коллекторная система;
- 8 — катушки магнитного поля; 9 — система подачи жидкого лития;

величина магнитной индукции на оси установки (б):

- 1 — положение коллекторной системы в области однородного магнитного поля;
- 2 — в области расходящегося магнитного поля

Основные параметры установки: однородное магнитное поле 0,2—0,27 Тл; плотность литиевой плазмы  $n_e = 10^{12}$  см<sup>-3</sup>; диаметр плазменного шнура в зоне нагрева 6 см; начальная температура электронов и ионов  $T_e, T_i = 4 \div 10$  эВ; температура ионов, нагретых в условиях ИЦР, 100—150 эВ; частота ВЧ-поля  $f = 658$  кГц; амплитуда электрического ВЧ-поля при величине тока в антенне, равной  $I_a = 100$  А, составляет в вакууме около 50 В/м. Резонансное значение магнитного поля для иона  ${}^6\text{Li}^+$  для этой частоты без учета эффекта Доплера равно 0,259 Тл. Для диагностики ИЦР использовался анализатор энергии ионов, описанный в работе [3].

В экспериментах с коллекторными системами магнитное поле выбиралось таким образом, чтобы его величина соответствовала крылу резонансной кривой ионов  ${}^6\text{Li}^+$ , удаленному от резонансной кривой ионов  ${}^7\text{Li}^+$ , и равнялось 0,234 Гл. Время отбора составляло 3 мин. Конструкция цилиндрической коллекторной системы приведена в [8]. В данных экспериментах для отбора ионов целевого изотопа, кроме водоохлаждаемого цилиндра диаметром 16 мм, использовался неохлаждаемый полый цилиндр диаметром 64 мм. Цилиндры были закрыты от потока плазмы, соответственно, дисковым и кольцевым экранами. Остальное вещество осаждалось на приемнике отвала.

В плоской коллекторной системе для отбора ионов целевого изотопа использовались четыре медные пластины длиной 50 мм, шириной 30 мм и толщиной 4 мм, также защищенные от потока плазмы экраном.

Экраны и приемники отвала находились под плавающим потенциалом относительно плазмы, а на коллекторные пластины относительно них подавался положительный задерживающий потенциал  $V_r = 0-60$  В.

### Исследование зависимости коэффициентов разделения и извлечения от степени ИЦР нагрева

Эксперименты по изучению влияния степени ИЦР нагрева на разделение изотопов лития проводились с использованием цилиндрической коллекторной системы. Для определения коэффициентов разделения  $\alpha$  и извлечения  $\gamma$  измерялось количество лития, собранного на различные части коллекторной системы, а также изотопный состав.

Коэффициент разделения  $\alpha$  определялся по формуле  $\alpha = C(1 - C_0)/C_0(1 - C)$ , где  $C$  — концентрация целевого изотопа в продукте, а  $C_0$  — исходная концентрация.

Коэффициент извлечения  $\gamma$  определим как отношение количества целевого изотопа, собранного на коллекторе, к количеству этого изотопа, собранному на всей коллекторной системе:  $\gamma = M_{\text{col}}/M_{\Sigma}$ .

Как было показано в работе [6], концентрация  ${}^6\text{Li}^+$  в осажденном веществе начинает существенно уменьшаться на расстоянии 2—3 см от начала коллектора, что примерно соответствует шагу спирали траектории иона. Зависимости концентрации  ${}^6\text{Li}$  и коэффициентов извлечения  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  для первых 20 мм коллектора при  $V_r = +60$  В от тока антенны показаны на рис. 2. Видно, что коэффициент извлечения  $\gamma({}^6\text{Li})$  при увеличении тока ВЧ-антенны имеет тенденцию к насыщению, а концентрация целевого изотопа имеет максимум при  $I_a = 100$  А.

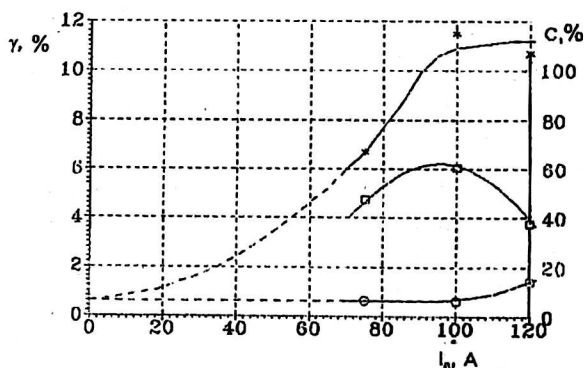


Рис. 2. Зависимость коэффициентов извлечения изотопов  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  на первые 20 мм цилиндрического коллектора и концентрации  ${}^6\text{Li}$  в продукте от тока антенны:

\* —  ${}^6\text{Li}$ ; о —  ${}^7\text{Li}$ ; □ —  $C({}^6\text{Li})$ . Напряжение задержки  $U_r = +60$  В; магнитное поле  $B = 0,243$  Тл

Причина насыщения потока ионов  ${}^6\text{Li}^+$  на коллектор и роста потока ионов  ${}^7\text{Li}^+$  при токах антенны более 100 А еще не изучена. Аномальный нагрев ионов  ${}^7\text{Li}^+$  в этих условиях, возможно, связан с возбуждением плазменной неустойчивости. В дальнейших экспериментах величина тока антенны составляла  $I_a = 100$  А.

### Отбор обогащенного лития на коллекторные системы при их расположении в однородном и расходящемся магнитных полях

При движении заряженной частицы из области сильного магнитного поля в слабое ее поперечная энергия частично переходит в продольную (вследствие сохранения  $W_{\perp}/B$ ). Нагретые ионы целевого изотопа в этом случае приобретают большую продольную скорость и должны осаждаться на коллекторе значительно дальше, чем нерезонансные ионы. В результате должно происходить дополнительное разделение изотопов по длине коллектора. Эти вопросы ранее изучались экспериментально и теоретически [9, 10].

На рис. 3 показано распределение концентрации  ${}^6\text{Li}$ , а на рис. 4, а, б — линейной плотности осаждения изотопов лития по длине цилиндрического коллектора в однородном и расходящемся магнитных полях при отталкивающем потенциале  $V_r = 60$  В.

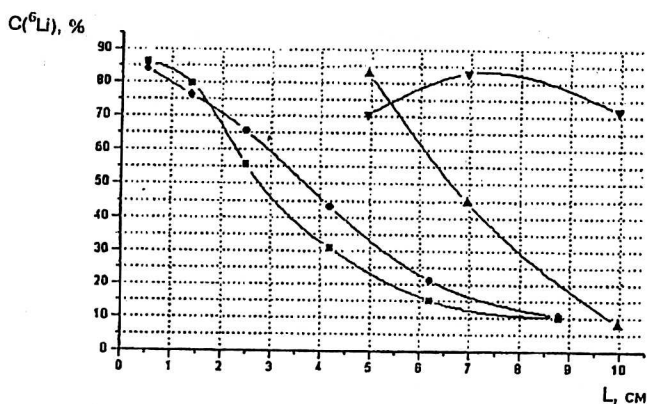


Рис. 3. Распределение концентрации  ${}^6\text{Li}$  по длине цилиндрического коллектора:

■ — центральный и ▲ — дополнительный цилиндры в однородном магнитном поле; ● — и ▼ — центральный и дополнительный цилиндры в расходящемся магнитном поле

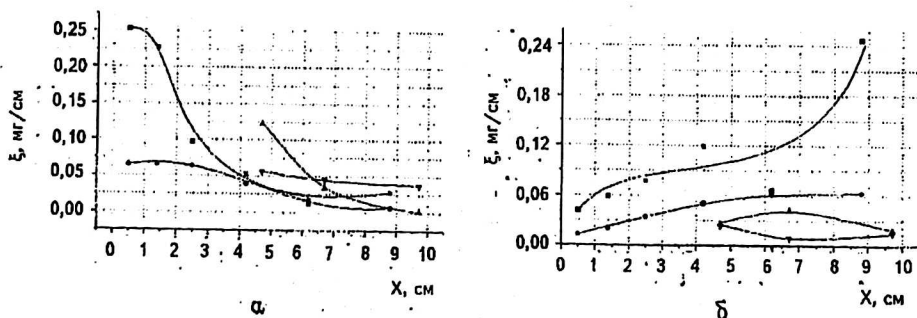


Рис. 4. Распределение плотности осажденного лития по длине коллектора:

а — кривые для изотопа  ${}^6\text{Li}$ ; б — для изотопа  ${}^7\text{Li}$ ; ■ — центральный и ▲ — дополнительный цилиндры в однородном магнитном поле; ● — и ▼ — центральный и дополнительный цилиндры в расходящемся магнитном поле

Из рис. 3 и 4 видно, что при размещении цилиндрической коллекторной системы в ослабленном магнитном поле плотность осажденного  ${}^6\text{Li}$  спадает медленнее по длине коллектора, чем в однородном поле. Это свидетельствует о том, что в ослабленном магнитном поле продольная скорость ионов  ${}^6\text{Li}$  действительно увеличилась. Увеличение плотности осаждения  ${}^7\text{Li}$  в конечной части коллектора связано с частичным испарением вещества с пластин отвала. Для последующих экспериментов требуются изменения конструкции коллекторной системы, обеспечивающие улавливание отвального лития.

Результаты, полученные с использованием плоской коллекторной системы, также свидетельствуют об увеличении продольной скорости ионов  ${}^6\text{Li}$  в расходящемся магнитном поле. При отборе обогащенного лития на этой коллекторной системе достигнут коэффициент извлечения целевого изотопа  $\gamma$ , в два раза больший, однако его концентрация оказалась на уровне 60 %. Более детально эти данные представлены ниже.

### Обсуждение результатов

Прежде чем переходить к интегральным характеристикам отбора обогащенного лития и представить величины средней концентрации шестого изотопа лития и коэффициента его извлечения  $\gamma$ , сделаем некоторые замечания.

По мере распространения в расходящемся магнитном поле, поперечные размеры замагниченного плазменного потока возрастают:  $BS = \text{const}$ . Некоторые ионы с периферии потока уже не могут осаждаться на коллекторную систему, размеры которой выбраны для более сильного поля. Мы провели эксперименты в умеренно ослабленном поле (70 % от основного), когда плазменный поток еще полностью собирался на коллекторную систему.

Для описанных выше экспериментов ( $U_r = 60$  В) были рассчитаны средние концентрации и его коэффициенты извлечения  $\gamma({}^6\text{Li})$  при суммировании осадка на разных участках коллекторных пластин (если концентрация  ${}^6\text{Li}$  в данной фракции больше заданной). Эти результаты приведены в табл. 1 и 2. Масса лития дана в миллиграммах, концентрация и коэффициент извлечения — в долях.

Таблица 1

Концентрация и степень извлечения  ${}^6\text{Li}$  в экспериментах с плоской коллекторной системой

Основное магнитное поле					Ослабленное магнитное поле				
Фракции	$m$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$m$ ( ${}^7\text{Li}$ )	$c$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$\gamma$ ( ${}^6\text{Li}$ )	Фракции	$m$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$m$ ( ${}^7\text{Li}$ )	$c$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$\gamma$ ( ${}^6\text{Li}$ )
Экраны	3,769	41,101	0,084	0,482	Экраны	2,208	28,212	0,073	0,413
$c > 09\%$	1,880	2,613	0,418	0,240	$c > 09\%$	0,651	0,871	0,427	0,122
$c > 20\%$	1,759	1,839	0,489	0,225	$c > 20\%$	0,604	0,667	0,475	0,113
$c > 30\%$	1,615	1,372	0,541	0,207	$c > 40\%$	0,487	0,413	0,542	0,091
$c > 40\%$	1,436	1,024	0,584	0,184	$c > 50\%$	0,384	0,282	0,576	0,072
$c > 50\%$	1,157	0,717	0,617	0,148	$c > 55\%$	0,207	0,117	0,639	0,039
$c > 60\%$	0,818	0,444	0,648	0,105	$c > 60\%$	0,155	0,079	0,662	0,029
$c > 65\%$	0,404	0,209	0,658	0,052	$c > 65\%$	0,063	0,028	0,689	0,012
$c > 66\%$	0,175	0,088	0,667	0,022					
Коллектор	1,957	3,562	0,355	0,250	Коллектор	0,619	0,727	0,460	0,116
Отвал	2,094	61,372	0,033	0,268	Отвал	2,518	40,773	0,058	0,471
Суммарно	7,820	106,035	0,069	1,000	Суммарно	5,435	69,712	0,071	1,000

Таблица 2

Концентрация и степень извлечения  ${}^6\text{Li}$  для цилиндрической коллекторной системы

Основное магнитное поле					Ослабленное магнитное поле				
Фракции	$m$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$m$ ( ${}^7\text{Li}$ )	$c$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$\gamma$ ( ${}^6\text{Li}$ )	Фракции	$m$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$m$ ( ${}^7\text{Li}$ )	$c$ ( ${}^6\text{Li}$ )	$\gamma$ ( ${}^6\text{Li}$ )
Экраны	3,941	47,187	0,077	0,441	Экраны	3,161	42,231	0,070	0,338
$c > 09 \%$	1,010	1,495	0,403	0,113	$c > 09 \%$	0,676	0,711	0,488	0,072
$c > 20 \%$	0,899	0,586	0,605	0,101	$c > 20 \%$	0,651	0,490	0,570	0,070
$c > 40 \%$	0,794	0,348	0,695	0,089	$c > 40 \%$	0,584	0,268	0,685	0,062
$c > 50 \%$	0,691	0,221	0,758	0,077	$c > 50 \%$	0,507	0,168	0,752	0,054
$c > 20 \%$	0,557	0,113	0,831	0,062	$c > 70 \%$	0,425	0,124	0,774	0,045
$c > 80 \%$	0,375	0,067	0,849	0,042	$c > 75 \%$	0,263	0,069	0,816	0,028
$c > 83 \%$	0,253	0,041	0,860	0,028	$c > 80 \%$	0,204	0,041	0,833	0,022
Коллектор	1,014	1,550	0,396	0,113	$c > 83 \%$	0,065	0,012	0,840	0,007
Отвал	3,984	67,900	0,055	0,446	Коллектор	0,644	0,617	0,511	0,069
Суммарно	8,939	116,637	0,071	1,000	Отвал	5,542	74,228	0,069	0,593
					Суммарно	9,347	117,076	0,074	1,000

Как видно из табл. 1 и 2, значительная часть потерь целевого изотопа приходится на экраны. Полнота извлечения целевого изотопа из потока плазмы, прошедшего за экраны, характеризуется его концентрацией в отвале. Сравнение результатов в основном и в ослабленном магнитном поле показывает, что во втором случае большее количество ионов  ${}^6\text{Li}$  проходит мимо коллектора.

Для наглядности эти данные, а также значения, полученные в предыдущих экспериментах [6], показаны на рис. 5.

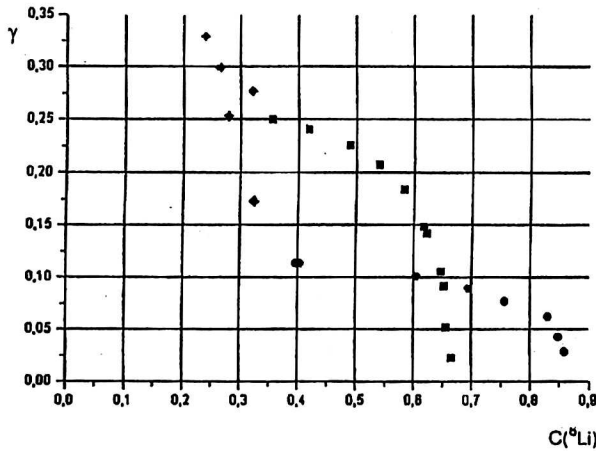


Рис. 5. Коэффициент извлечения  $\gamma$  изотопа  ${}^6\text{Li}$  из плазменного потока, сопоставленный с его концентрацией в продукте:

◆ — цилиндрическая коллекторная система; ■ — и ● — обозначения аналогичны обозначенным на рис. 3 и 4

### Заключение

Результаты проведенных экспериментов по исследованию зависимости коэффициентов разделения  $\alpha$  и извлечения  $\gamma$  от напряженности нагревающего электрического поля показали, что имеется оптимальное значение мощности ВЧ-нагрева для разделения изотопов. С помощью плоской коллекторной системы получены более высокие значения коэффициента извлечения целевого изотопа, а с помощью цилиндрической системы — максимальный коэффициент разделения ( $\alpha \approx 60$ ).

## Литература

1. Mussetto M., Romesser T. E., Dixon D., Strawitch C., Tang J. Isotope separation using selective ion cyclotron resonance heating in metallic plasmas//IEEE Int. Conf. on Plasma Science, San Diego, Calif. 1983; IEEE Conf. Records-Abstracts. 1983. P. 70.
2. Louvet P. Review of isotopic plasma separation processes//Proceedings of the 2<sup>th</sup> Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Versailles. 1989. V. 1. P. 42.
3. Карчевский А. И., Лазько В. С. и др. Исследование разделения изотопов лития в плазме при изотопически селективном ИЦР-нагреве//Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 3. С. 411—419.
4. Dolgolenko D. A., Karchevsky A. I., Laz'ko V. S., Muromkin Yu. A., Pashkovsky V. G., Ustinov A. L., Usage of the full-scale collector unit in ICR separation method//Compte rendu des Journees sur les Isotopes Stables. P. 348—353. 24—25 November, 1993, Saclay, France.
5. Dolgolenko D. A., Ezubchenko A. N., Laz'ko V. S., Karchevsky A. I., Muromkin Yu. A., Pashkovsky V. G., Ustinov A. L. Collection of isotopically enriched lithium in plasma by means of ion cyclotron resonance: ICPiG-XXIII, Toulouse. 1997. V. 2. P. 162—163.
6. Dolgolenko D. A., Karchevsky A. I., Laz'ko V. S., Muromkin Yu. A., Pashkovsky V. G. Measurements of extraction coefficient in experiments on lithium isotope separation by ICR-method. Separation Phenomena in Liquids and Gases, VI Workshop Proceedings. P. 344—350. 18—21 October, 1998, Nagoya, Japan.
7. Compant A. La Fontaine and V. G. Pashkovsky. Study of Selective Heating at Ion Cyclotron Resonance for the Plasma Separation Process//Phys. Plasmas. 1995. № 2(12). Dec. P. 4641—4649.
8. Dolgolenko D. A., Gorshunov N. M., Karchevsky A. I., Laz'ko V. S., Muromkin Yu. A., Pashkovsky V. G., Peshkov A. T., Zotin G. E. Experimental investigation of physical processes at lithium isotope separation in plasma by ion cyclotron resonance method: Conf Proc.: Seventh Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, July 24—28, Moscow, 2000. P. 163—174.
9. Долголенко Д. А., Карчевский А. И., Лазько В. С., Муromкин Ю. А., Пашковский В. Г. Изучение отбора изотопически обогащенного лития при размещении коллектора в зоне ослабленного магнитного поля установки: 2-я Всерос. конф. "Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул. 23.09—3.10, 1997. — Звенигород. Моск. обл./Сб. докл. — М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. С. 94—97.
10. Карчевский А. И., Потанин Е. П. Использование зоны ослабленного магнитного поля с целью повышения эффективности ИЦР установки для разделения стабильных изотопов//Физика плазмы. 1998. Т. 24. С. 301—306.

Авторы благодарны А. Г. Бабичеву  
за определение изотопного состава проб лития.

## Separation of lithium isotopes in plasma by ion cyclotron resonance method

N. M. Gorshunov, D. A. Dolgolenko, G. E. Zotin,  
A. I. Karchevsky, V. S. Laz'ko, Yu. A. Muromkin,  
V. G. Pashkovsky, A. T. Peshkov

Molecular Physics Institute, RRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

*In this work the results were presented of experiments devoted to the process of lithium isotope separation by selective ICR heating method. Experiments were carried out on separation of lithium isotopes with usage of collector systems of different design (cylindrical and plane) for collection of selectively heated ions. Collector systems could be placed in the main magnetic field as well as in the flared one. In experiments the content of <sup>6</sup>Li in product about 83 % was reached (separation coefficient  $\alpha \approx 60$ ) at coefficient of extraction of sixth isotope from the plasma flow  $\gamma = 0.06$ . At mean concentration of <sup>6</sup>Li in product about 62 % extraction coefficient reached 0.15.*