

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



B-226

3/11-75
12 - 8996

4299/2-75

В.М.Вахтель, Г.В.Винель, Ц.Вылов, И.И.Громова,
А.Ф.Новгородов, Ю.В.Норсеев, В.А.Халкин,
В.Г.Чумин

ГАЗОТЕРМОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД
ВЫДЕЛЕНИЯ АСТАТА.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВЫХОД ИЗОТОПОВ АСТАТА
ИЗ УРАНА.

1975

12 - 8996

В.М.Вахтель, Г.В.Винель, Ц.Вылов, И.И.Громова,
А.Ф.Новгородов, Ю.В.Норсеев, В.А.Халкин,
В.Г.Чумин

ГАЗОТЕРМОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД
ВЫДЕЛЕНИЯ АСТАТА.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВЫХОД ИЗОТОПОВ АСТАТА
ИЗ УРАНА.

Направлено в журнал "Радиохимия"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Ядерно-спектроскопические исследования изотопов с $Z \sim 82$ в широком диапазоне ядер от сильно нейтронодефицитных до сильно нейтроноизбыточных позволяют получать данные, необходимые как для выяснения справедливости существующих модельных представлений об основных и возбужденных состояниях ядер этой области, так и для проверки и уточнения новой модели альфа-распада^{/1/}.

Определенный интерес с этой точки зрения представляет астат. В реакциях глубокого расщепления ядер тория и урана протонами высоких энергий образуется большое количество нейтронодефицитных изотопов элемента. Наряду с ними, в принципе, вполне вероятно появление и нейтронообогащенных изотопов астата с $A > 220$, которые до сих пор еще экспериментально не наблюдались. Для исследований спектров нейтронодефицитных изотопов астата и поиска его нейтронообогащенных изотопов необходимы высокорadioактивные препараты короткоживущих нуклидов элемента в форме, пригодной для измерения альфа-спектров, разделения по массам на электромагнитном масс-сепараторе и сбора дочерних ядер нейтронообогащенных изотопов радона. Для получения таких препаратов астата требуется селективная, экспрессная радиохимическая методика.

“Мокрые” способы выделения^{/2-5/} из-за их относительно продолжительности в данном случае были непригодны. Более удобным казались методы, основанные на летучести астата /или его соединений/^{/6-15/}. Но ни один из них нельзя было взять в качестве прототипа для дальнейшей работы, поскольку процессы отделения и очистки астата в газовой фазе требовали не меньше времени,

чем в водных растворах. Однако сам принцип газовой термохроматографии, по нашему мнению, наиболее подходил для создания новой высокоэффективной методики, в которой одновременно осуществлялись бы процессы отделения астата от материала мишени, его очистки от радиоактивных загрязнений и получения препаратов для физических экспериментов.

Настоящая работа посвящена разработке газотермохроматографического метода получения высокоактивных, радиохимически чистых препаратов короткоживущих изотопов астата; применению метода для определения относительных выходов изотопов астата из урановой мишени и поиску гипотетических нейтронообогащенных изотопов пятого галогена.

Экспериментальная часть

Материалом мишени для получения астата служил металлический уран природного состава, чистотой 99,72%. Облучались металлические пластинки толщиной 1 мм и весом 5 ± 1 г.

Мишени экспонировались на внутреннем протонном пучке / $E_p = 660$ МэВ / синхроциклотрона ОИЯИ. Продолжительность облучения была 20 ± 10 мин, интегральная радиоактивность мишени после облучения достигала 10 г-экв радия.

Аппаратура для выделения и очистки астата, схема которой показана на рис. 1, в принципе, была такой же, как в работе^{16/}. Внесенные изменения были связаны, главным образом, с необходимостью проведения эксперимента в защитной камере с помощью копирующих манипуляторов. Для кислородно-гелиевой смеси использовали технические газы без дополнительной очистки. Металлические фильтры из меди, серебра или платины, служившие для очистки астата от радиоактивных загрязнений в процессе его переноса вдоль газотермохроматографической колонки /ТХК/, изготавливались из фольг, толщиной около 50 мкм, имели контактную поверхность $15-20$ см². ТХК представляла собой кварцевую

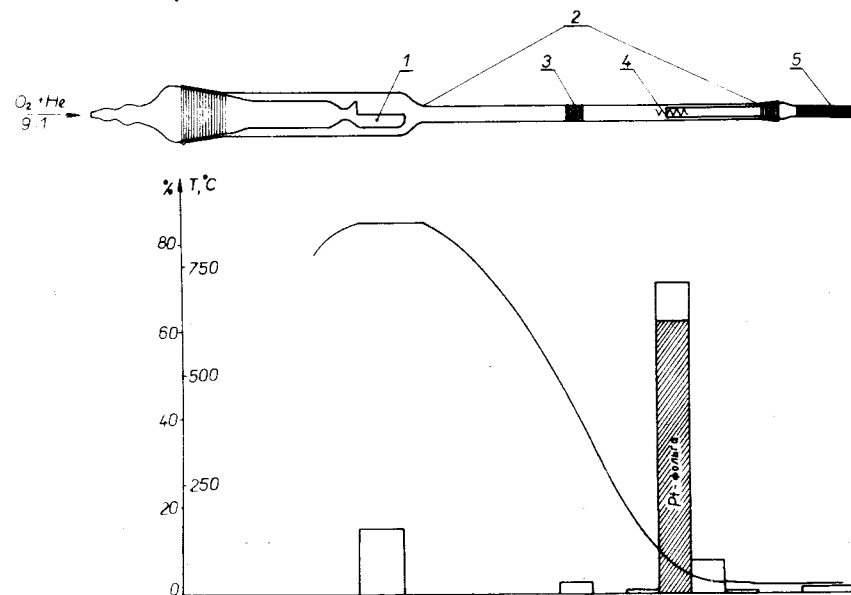


Рис. 1. Схема установки для газотермохроматографического выделения и очистки астата из урановой мишени. 1. Кварцевая лодочка для урановой мишени. 2. Кварцевая газотермохроматографическая колонка. 3. Серебряный фильтр $l = 1-1,5$ см, $S = 20-30$ см². 4. Отожженная в кислороде платиновая фольга. 5. Поглонитель с активированным углем. На нижней части рисунка кривая показывает распределение температуры вдоль ТХК, гистограмма - распределение At по ТХК. Заштрихованная часть гистограммы соответствует активности астата, осажденного на платиновой фольге, незаштрихованная - на кварце.

трубку диаметром 4 мм, длиной 300 мм и перепадом температуры по длине от 800 до 20°C /рис. 1/.

Анализ распределения летучих продуктов, вынесенных в ТХК, осуществлялся после окончания разделения. Для этого ТХК разрезалась на зоны длиной 3 см и каждая зона измерялась на гамма-спектрометре с Ge(Li) - детектором объемом 10 см³ и разрешением 3-4 кэВ. Идентификация присутствующих в зонах элементов проводилась по характерным гамма-линиям изотопов этих элементов.

При обработке гамма-спектров на ЭВМ "Минск-2" применялась программа ЭПОС-1¹⁷. Погрешности в определении относительного содержания элементов по зонам для значений $\geq 40\%$ не превышали 10% и для значений $< 40\%$ были не более 30%.

Сорбцию астата из газового потока проводили на полоске платиновой жести 30 x 3 мм², которую для лучшего извлечения элемента гофрировали и отжигали в атмосфере кислорода при 800-900 °С.

Разделение препарата астата по массам проводили на электромагнитном масс-сепараторе Отдела ядерной спектроскопии и радиохимии.¹⁸

Для получения ионов астата использовался плазменный ионный источник. Нагрев разрядной камеры источника осуществлялся раскаленным вольфрамовым катодом. Температура внутренних стенок разрядной камеры достигала ~1500 °С. Возгонка астата с платиновой фольги, которая помещалась в ампулу из нержавеющей стали /рис. 2/, происходила при нагревании печи /4/ и вольфрамового катода ионного источника.

Астат возгонялся с платиновой фольги в вакууме при температуре ~300 °С и адсорбировался на стенках трубки из нержавеющей стали при температуре ~20 °С.

Распределение температуры вдоль подводящей трубки /5/, измеренное во время работы ионного источника при ряде значений токов нагрева печи /4/, показано на рис. 2.

На основе данных, полученных при измерении эффективности разделения изотопов астата, выбирались оптимальные положения ампулы /2/ и тока накала печи /4/, при которых возгонка и поступление в разрядную камеру астата происходит равномерно. В этом случае ионизация астата происходит с наибольшей эффективностью. Чтобы снизить потери астата из-за осаждения на стенках трубок /5/ и /6/, рабочий газ - Хе подавался в разрядную камеру так, чтобы он обтекал ампулу /2/.

Выбранные таким образом условия позволили получить эффективность разделения изотопов астата $6 \pm 1\%$.

При поисках гипотетических нейтронообогащенных изотопов астата, для отделения и сбора возможных дочерних изотопов радона, препарат астата на платине

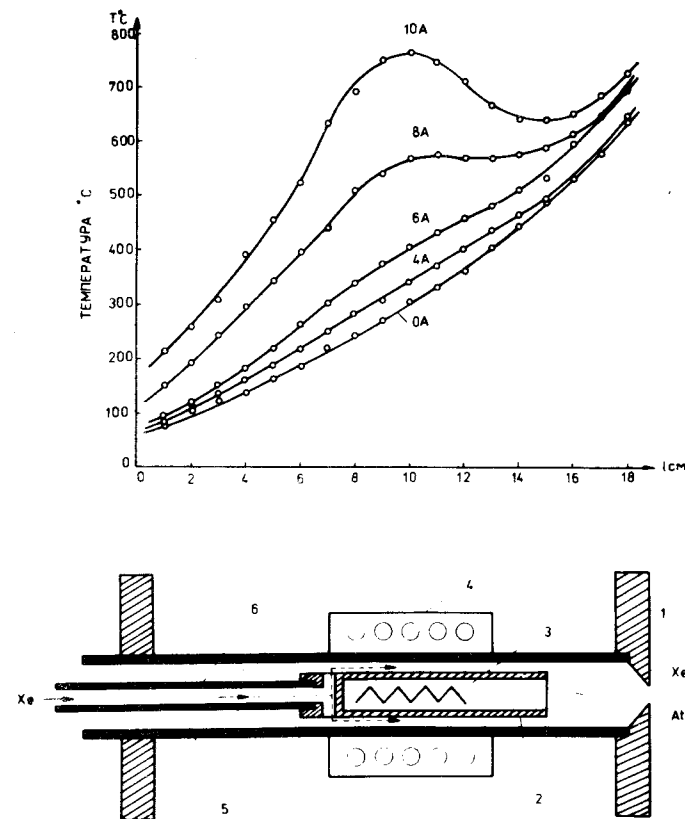


Рис. 2. Распределение температуры вдоль подводящей трубки ионного источника при токах накала печи: 0, 4, 6, 8 и 10 А и схема устройства для возгонки астата в ионном источнике масс-сепаратора. 1. Разрядная камера. 2. Ампула из нержавеющей стали. 3. Платиновая фольга с препаратом астата. 4. Печь. 5. Подводящая трубка из нержавеющей стали. 6. Шток, по которому подается газ (Хе) и которым задается положение ампулы.

через 2 мин после его выделения помещали в пробирку, через которую продували гелий. Поток гелия системой фильтров очищался от возможных загрязнений астатом и другими элементами и проходил через охлажденную

жидким азотом ловушку, в которой должен был вымораживаться радон. Ловушка представляла собой тонкостенный стеклянный сосуд, располагающийся над Ge(Li) детектором. Накопление радона начиналось через 20-25 мин после конца облучения. Время продувки гелия варьировалось от 5 мин до 2 час.

Радиохимически чистые препараты радона, необходимые для оценки относительных выходов нейтронодефицитных и нейтроноизбыточных изотопов этого элемента из урана в реакциях глубокого расщепления, получали при разделении смеси радиоактивных благородных газов методом газовой хроматографии на цеолитах /19/.

Результаты и обсуждение

Для получения астата в реакциях глубокого расщепления могут служить либо торий, либо уран. Сечения образования изотопов астата из тория почти на порядок выше, чем из урана /20/. Но из-за образования на его поверхности плотного слоя окислов металл даже при высоких температурах сгорает в атмосфере чистого кислорода очень медленно и в газовую фазу переходит лишь небольшая часть летучих продуктов ядерных реакций. Поэтому мы были вынуждены использовать в качестве мишени металлический уран, который начинает интенсивно взаимодействовать с кислородом уже при температуре 500 °С. Скорость его горения, в основном, зависит от скорости подачи кислорода. По нашим оценкам, оптимальная температура реакционной зоны - 850 ± 30 °С /рис. 1/. При такой температуре проводилось сжигание урана во всех экспериментах. При использовании в качестве газа-носителя чистого кислорода было замечено, что до момента полного сгорания урана кислород, в основном, расходуется на окисление урана и в это время происходит неполный вынос из реакционной зоны летучих продуктов в зону термохроматографической колонки /ТХК/ /рис. 1/. Для устранения этого нежелательного эффекта в кислород добавлялся гелий из расчета 10% /по объем/, что повысило скорость переноса летучих продуктов в ТХК во время сгорания урана в 2-3 раза.

Таблица 1

Распределение элементов по зонам ТХК /в %/. За 100% приняты количества элементов, вынесенных из зоны сгорания урана в ТХК. 0,5 г облученного урана, 15 мл (O₂ + He) в мин., /длина зон - 3 см, АУ - активированный уголь/

Температура зона °С	Элемент													
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
At	860- -785	785- -640	640- -500	500- -400	400- -330	330- -265	265- -205	205- -155	155- -110	110- -75	75- -50	50- -30	30- -25	
J									1,5	2,5	7	16	21	52
Br														1,5 98,5
Tс/Мо				2	0,2									4 56
Ru	0,3	3	4	2			0,1	0,3	9,1	14	4	13	21	29
Po		0,7	2	1,5	3	2	1	0,6	9	15	3	5	14	43
Bi	2	34	48	16										
Tl		17	67	16										
Te		20	80											
Ag	42	58												
	29	71												

Как показал радиохимический анализ, из зоны сгорания урана в потоке газа -носителя выносятся в ТХК $80 \pm 10\%$ At, Po и Bi и лишь относительно небольшое их количество остается в U_3O_8 . Относительный вынос в ТХК других элементов нами не определялся. Распределение элементов вдоль ТХК приведено в табл. 1. Наибольшей летучестью обладали At, J, Br, Tc/Mo и Ru, большая часть которых сорбировалась в конце ТХК, при температурах $< 50^\circ C$ или поглощалась активированным углем. Для очистки от этих элементов - загрязнений мы использовали экспериментально обнаруженный нами факт: существенно большую, чем у астата, высокотемпературную сорбцию их летучих продуктов некоторыми металлами из кислородсодержащей атмосферы /табл. 2/.

Различие в свойствах наиболее резко проявлялось на серебре в температурном интервале $450-500^\circ C$: фильтром задерживалась лишь небольшая часть астата и полностью извлекались из газового потока J, Br и Tc/Mo. Полностью удалялся из газовой фазы и рутений: треть его сорбировалась серебром, а остальное количество оседало на кварце сразу же после фильтра. Можно предполагать, что это было связано либо с восстановлением RuO_4 серебром, либо с каталитическим разрушением на поверхности серебра термически неустойчивой четырехокси. Возможно, что оба процесса протекали одновременно.

При температуре серебряного фильтра выше $500^\circ C$ становилось заметным уменьшение удерживания J и Br металлом, однако, сохранялась высокая эффективность очистки газового потока от этих галогенов, так как они, подобно рутению, осаждались на кварце непосредственно за фильтром. Этот факт можно объяснить образованием галогенидов серебра и их дальнейшим медленным переносом газовым потоком в низкотемпературную область /упругость паров AgJ и $AgBr$ при температуре $500^\circ C$ составляет $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст./^{21/}. Обнаруженное явление показывает, что процесс термического разложения бромидов и иодидов серебра при температурах $500-600^\circ C$ термодинамически столь маловероятен, что им нельзя объяснить перенос галогенов вдоль ТХК, заполненной металлическим серебром, как это предлагалось в работе /22/.

Таблица 2

Поглощение летучих продуктов /в %/ на фильтрах из меди, серебра и платины с контактной поверхностью $20-30$ см² и длиной $1-1,5$ см при различных температурах. Скорость подачи газовой смеси 100 мл/мин, вес облученного урана - $4-5$ г, продолжительность сжигания урана 10 мин.

Температура фильтра	Элемент в газовой фазе	At	J	Br	Tc/Mo	Ru	Po	Bi	Tl	Te
<u>Cu - ФИЛЬТР</u>										
160		90	100	100	*)	100	-	-	100	-
240		26	96	73	-	100	-	-	100	-
280		16	84	76	-	100	-	100	97	100
360		9	64	81	-	-	100	100	85	100
440		0	8	34	-	-	100	100	3	100
<u>Ag - ФИЛЬТР</u>										
250		20	89	100	-	-	100	100	-	100
270		19	92	100	100	100	-	100	-	100
300		26	95	100	-	-	100	100	-	-
320		-	90	99	100	100	100	100	100	100
400		20	100	100	-	-	100	100	-	-
425		-	100	100	100	100	100	100	25	100
450		13	100	100	-	30	100	100	-	100
480		3	100	100	100	32	100	100	5	100
540		0	86	100	-	-	97	100	-	-
<u>Pt - ФИЛЬТР</u>										
240		100	99	89	-	100	100	100	-	-
310		38	66	100	-	100	100	100	-	-
420		14	25	70	-	100	100	100	-	-
550		0	5	89	-	81	100	100	-	-

*) Анализ не проводился

Выполненные эксперименты не позволяют сделать достоверные предположения о том, в какой форме астат переносится в наших условиях вдоль ТХК и о механизме прохождения пятого галогена через серебряный фильтр.

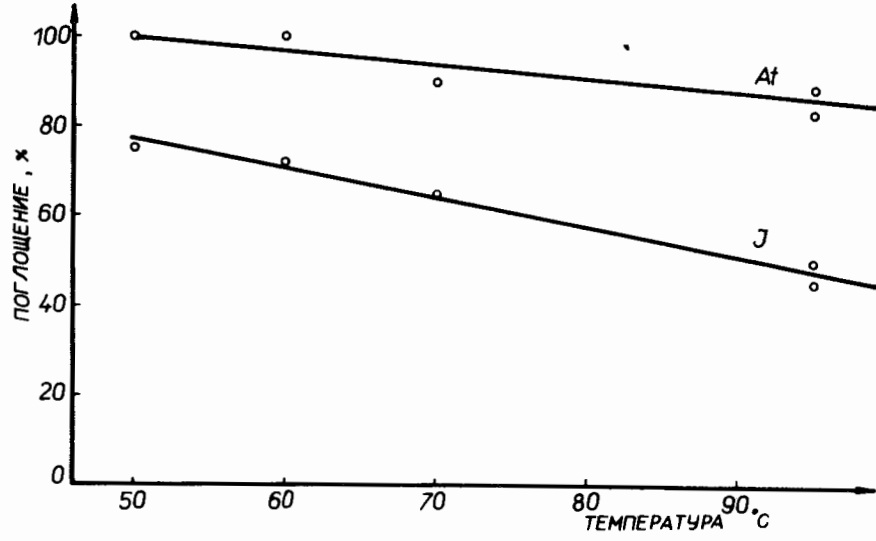


Рис. 3. Зависимость адсорбции At и J на покрытой окисным слоем платиновой фольге от температуры $V_{S_{Pt}} = 2 \text{ см}^2 \cdot 5 \text{ г} \cdot U$, сжигание 10 мин в смеси $O_2 + He / 100 \text{ мл/мин}$.

Но то, что на нем в изученном температурном интервале /250-540°C/ слабо сорбируется астат, однозначно, по нашему мнению, свидетельствует о низкой термодинамической устойчивости астагида серебра. Как показывают данные табл. 2, серебряный фильтр очень эффективно очищает астат практически от всех элементов, которые выносятся кислородно-гелиевой смесью в ТХК из зоны сгорания урана.

При использовании медных или платиновых фильтров глубокая очистка астага от брома и йода не достигалась /табл. 2/. Но с помощью этих металлов, и прежде всего платины, можно стабилизировать сорбционную зону астага. Зависимость абсорбции астага и йода на платине от температуры коллектора показана на рис. 3. При 50°C астат, адсорбированный на окисленной поверхности платины, прочно удерживается коллектором, и при обдувке газовой струей /~100 см³/мин/ в течение часа не переносится в более низкотемпературную область.

Таблица 3

Распределение летучих продуктов вдоль зон ТХК /в%/ /Длина зон - 3 см, АУ - активированный уголь, Pt - платиновая фольга/, урановая мишень 5 г, радиоактивность - 5 г-эке Ra. Расход газовой смеси (O₂ + He) 100 мл/мин, время выделения - 10 мин.

№ зоны	I		2		3		4		5*		6		7		8**		9		10		11		12	
	Температура зоны °C		870-810		810-735		735-650		650-530		530-320		320-215		215-100		100-45		45-25		25-20		20	
Элемент																								
At			0,01		0,2		3						I		I		I		9		0,5		0,2	
J					0,3		2		98															
Br							0,3		100															
Tс/Мо																								
Ru			0,05		0,1		0,2		0,7		99		65		2		0,02							
Po			0,03		0,2		0,09		0,5		32		65		2									
Bi			0,7		8		II		42		38													
Tl									96															
Te			0,2		0,6		3		44		53		9I		4									
As			II		3		3		23		60													

* Ag - фильтр L = 1 см, S = 20 см² помещен в центре зоны /425-475°C/.

** В центре зоны помещен гофрированный платиновый коллектор L = 1,5 см, S = 2 см².

Таким образом, сочетание 1/ сжигания урана в кислородно-гелиевой смеси, 2/ газотермохроматографического отделения астата от летучих радиоактивных продуктов с использованием кварцевой ТХК с серебряным фильтром и 3/ адсорбции астата из газовой фазы платиновым коллектором позволило нам создать методику экспрессного, не более 10 мин, получения радиохимически чистых препаратов астата.

В табл. 3 приводится распределение радиоактивных элементов в ТХК при оптимальных условиях выделения астата из урановой мишени. Чистота полученных препаратов оценивалась по результатам анализа гамма-спектров. Все наблюдавшиеся линии можно было приписать изотопам астата и продуктам их распада. Возможный уровень радиоактивных загрязнений, по нашим оценкам, не должен превышать 0,5%.

Спектры альфа-излучения препаратов астата измеряли на магнитном альфа-спектрографе. Их анализ позволил получить данные об относительных выходах изотопов с массовыми числами $203 \leq A \leq 211$ из урана, облученного протонами с энергией 660 МэВ /табл. 4/.

При измерении γ - и α -спектров препаратов астата мы, естественно, не могли наблюдать излучение, связанное с гипотетическими тяжелыми изотопами. Во-

Таблица 4

Относительный выход изотопов астата из урановой мишени, облученной протонами с $E_p = 660$ МэВ. Вес мишени - 5 г, время облучения - 30 мин, время выделения астата - 10 мин.

Массовое число	211	209	208	207	206	205	204	203
Относительный выход	0,7	1,0	0,4	0,5	0,3	0,14	0,09	0,02
Погрешность (%)	12	28	24	16	18	17	41	42

первых, они могли распадаться с испусканием только бета-частиц; а во-вторых, если предположить, что с максимальными выходами образуются $^{211,210,209}\text{At}$ и кривая, описывающая выходы изотопов астата в области нейтронообогащенных ядер, спадает также круто, как и в нейтронодефицитной, то ядра с $A > 220$ должны иметь относительные выходы на три порядка меньше, чем, например ^{209}At . Совершенно ясно, что обнаружить их прямыми измерениями на фоне других изотопов невозможно.

Правильность сделанной оценки о выходах тяжелых изотопов астата поддается экспериментальной проверке. Очевидно, что отношение выходов, например $^{211}\text{At}/^{222}\text{At}$ из урана должно быть примерно такое же, как $^{211}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$. Последнее отношение относительно легко определить при измерении гамма-спектров "состаренных", радиохимически чистых препаратов радона. Выполненный нами анализ показал, что при облучении урана протонами $E_p = 660$ МэВ/ отношение выходов $^{211}\text{Rn}/^{222}\text{Rn} \approx 2 \cdot 10^{-3}$, что хорошо совпадает с экстраполяционной оценкой.

Для обнаружения нейтронообогащенных изотопов мы предприняли две экспериментальные попытки. В первом случае было проведено разделение по массам препарата астата примерно через полчаса после окончания облучения урана. На коллекторе масс-сепаратора была найдена в области $A \geq 220$ лишь исчезающе малая радиоактивность, связанная со случайными загрязнениями нейтронодефицитными изотопами астата.

Во второй серии экспериментов была сделана попытка обнаружить тяжелые изотопы астата по накоплению дочерних изотопов радона с $221 \leq A \leq 224$. Сбор радона начинали через 15-20 мин после окончания облучения мишени. Условия измерения были таковы, что дочерние изотопы ^{221}Rn и ^{222}Rn надежно идентифицировались, если бы ^{221}At и ^{222}At имели период полураспада 10 мин или больше, 100%-ную долю β^- -распада и число их ядер в начальный момент накопления радона было бы не меньше 0,2% от присутствовавшего в препарате ^{209}At . В полученных гамма-спектрах мы не наблюдали гамма-линий изотопов, принадлежащих к цепочкам распада ^{221}Rn и

^{222}Rn . Поскольку в самом факте образования нейтронообогащенных изотопов астата в реакциях глубокого расщепления урана сомневаться не приходится, и предположения о доле β^- -распада и выходах ^{221}At и ^{222}At , вероятно, близки к истинным, отрицательный результат наших опытов, очевидно, связан с короткими, существенно меньше 10 мин, периодами полураспада искоемых изотопов.

Выводы

1. В кислородсодержащей атмосфере при температурах 250-540 °C соединения, образующиеся в реакциях паров астата с металлическим серебром, существенно менее термодинамически устойчивы, чем соединения йода и брома.

2. Это свойство астата обеспечивает его быструю и эффективную газотермохроматографическую /ГТХ/ очистку от радиоактивных изотопов галогенов и ряда других элементов, переходящих в газовую фазу при сжигании металлического урана в кислородно-гелиевой смеси.

3. ГТХ методика выделения астата из облученного протонами с $E_p = 660 \text{ МэВ}$ металлического урана позволяет получать радиохимически чистые, высокорadioактивные препараты в форме, удобной для дальнейших физических экспериментов, не позже чем через 10 минут после начала обработки.

4. Выделенный из урана астат обогащен относительно долгоживущими изотопами с $A \geq 209$, что связано с более высокими сечениями образования самих изотопов и их предшественников в радиоактивных цепочках распада.

5. Отрицательный результат поисков изотопов астата с $A > 220$, можно объяснить малыми, менее 10 минут, периодами полураспада нейтронообогащенных изотопов пятого галогена.

Литература

1. С.Г.Кадменский. *Материалы 7-ой зимней Школы ЛИЯФ, Ленинград, стр. 374, 1972.*
2. M.Lefort, G.Simonoff, X.Torrigo. *Bull.Soc.Chim., France, No. 10, 1726 (1960).*
3. Б.П.Белыев, Ван Юн-юй, Е.Н.Синозова, Л.Немет, В.А.Халкин. *Радиохимия, 2, 608 /1960/.*
4. Ю.В.Норсеев. *Диссертация, ОИЯИ-ЛГУ, М.-Л., 1965.*
5. М.Бочварова, До Ким Тюнз, И.Дудова, Ю.В.Норсеев, В.А.Халкин. *Радиохимия, 14, 6, 858 /1972/.*
6. A.W.Stoner, E.K.Hyde. *J.Inorg.Nucl., 4, No. , 77 (1957).*
7. R.W.Hoff, F.Asaro, J.Perlam. *J.Inorg.Nucl.Chem., 25, No. 11, 1303 (1963).*
8. R.M.Latimer, G.E.Gordon, T.D.Thomas. *J.Inorg.Nucl.Chem., 17, No. 1/2, 1 (1956).*
9. J.M.Dairski. *Thesis, UCRL-20412, 1970.*
10. P.E.Thoresen, F.Asaro, J.Perlman. *J.Inorg.Nucl.Chem., 26, No. 8, 1341 (1964).*
11. E.H.Appelman. *Thesis, UCRL-9025, 1960.*
12. R.Wolfgang, E.W.Baker, A.A.Caretto, T.V.Cumming, G.Frieland, T.Hudis. *Phys.Rev., 103, 394 (1956).*
13. Б.Айхлер. *ОИЯИ, P12-6661, Дубна, 1972.*
14. J.Merinis. *Thesis, Orsay, A. 21, 1965.*
15. Б.Айхлер. *ОИЯИ, P12-6662, Дубна, 1972.*
16. Б.Баяр, И.Воцилка, Н.Г.Зайцева, А.Ф.Новгородов. *Радиохимия, 16,3, 329 /1974/.*
17. Г.Элер, П.М.Гопыч, Г.В.Винель, В.Хабених, Л.А.Вылова, *ОИЯИ, P10-6817, Дубна, 1972.*
18. В.П.Афанасьев, А.Т.Василенко, И.И.Громова, Ж.Желев, В.В.Кузнецов, М.Я.Кузнецова, Д.Мончка и др. *ОИЯИ, 13-4763, Дубна, 1969.*
19. А.Колачковски, Ю.В.Норсеев. *ОИЯИ, P6-6923, Дубна, 1973.*
20. M.Linder, R.N.Osborne. *Phys.Rev., 103, 378 (1956).*
21. *Справочник химика, п/р Б.П.Никольского, Л.-М., 1962, т. 1, стр. 604.*
22. Б.Айхлер, В.П.Доманов. *ОИЯИ, P12-7928, Дубна, 1974.*

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июня 1975 года.