

-17

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Н.Г.Зайцева, Ло Ван-чжун

P-441

ИЗУЧЕНИЕ ВАЛЕНТНЫХ ФОРМ РАДИОЙОДА,
ПОЛУЧАЮЩЕГОСЯ ПРИ РАСЩЕПЛЕНИИ
ТЕЛЛУРА, ЦЕЗИЯ И ЙОДА
ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Радиохимия, 1960, т. 2, № 5, стр. 615-622

Дубна 1959 год

Н.Г.Зайцева, Ло Ван-чжун

P-441

ИЗУЧЕНИЕ ВАЛЕНТНЫХ ФОРМ РАДИОЙОДА,
ПОЛУЧАЮЩЕГОСЯ ПРИ РАСШЕПЛЕНИИ
ТЕЛЛУРА, ЦЕЗИЯ И ЙОДА
ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

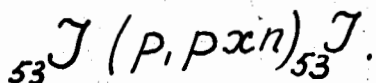
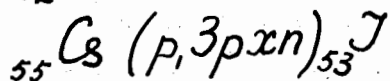
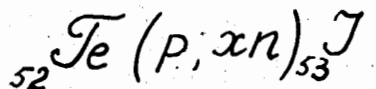
529/7 mp.

Объединяемый институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Изучение химического поведения и валентных форм радиоактивных атомов, возникающих в результате различных ядерных превращений, помимо самостоятельного научного интереса необходимо для правильной разработки и усовершенствования методов получения радиохимически чистых препаратов.

Большое число работ, имеющихся в литературе и посвященных этому вопросу /1-4/, выполнено, в основном, при облучении вещества мишени частицами малых и средних энергий /до 20 Мэв/. Но, за редким исключением /5/, в литературе нет данных по исследованию химического состояния продуктов ядерных реакций, протекающих при взаимодействии частиц высоких энергий /несколько сот Мэв/ с веществом.

В настоящей работе проводилось изучение валентных форм, в которых стабилизируются после растворения облученной мишени в воде радиоактивные изотопы йода, получающиеся при расщеплении теллура, цезия и йода быстрыми протонами по реакциям:



Согласно существующим представлениям, взаимодействие быстрой частицы со сложным ядром протекает в две стадии /6/. Первая стадия - нуклонный каскад внутри ядра, когда налетающая быстрая частица, проходя через ядро, передает часть своей энергии одному или нескольким нуклонам в ядре, что приводит к испусканию некоторого числа быстрых "каскадных" частиц и к возбужденному состоянию остаточного ядра.

Вторая стадия заключается в "успокоении" остаточного ядра, когда его энергия возбуждения, достигающая нескольких десятков и даже сотен миллионов электроновольт, снижается в связи с испарением различных частиц: протонов, нейтронов, дейтронов, тяжелых частиц α , Li , Be , а также γ -квантов.

Остаточное ядро йода после окончания процесса испарения имеет кинетическую энергию 2-3 Мэв /7/, что превышает энергию химических связей и достаточно для их разрушения. Состояние атома в момент его образования неизвестно, однако есть основания предполагать /4/, что "горячий атом" несет большой положительный заряд, но по мере замедления своего движения он присоединяет электроны, и его положительный заряд уменьшается.

В ряде работ высказаны предположения о том, в каких формах образуются продукты ядерных реакций. Атен /8/ считал, что продукты IN, P и IN, d - реакций следует ожидать в высших окисленных состояниях, так как бомбардирующие и вылетающие частицы, обладающие большой скоростью, могут выбивать электроны и образовывать положительные ионы.

В отношении продуктов реакций глубокого расщепления Рудстам /9/ сделал предположение, что они должны образовываться в низших окисленных формах.

Однако окончательное химическое состояние продуктов ядерных реакций будет определяться теми формами, в которых они стабилизируются в результате вторичных реакций с окружающими их атомами и молекулами как в твердой фазе, так и при растворении в воде. Поэтому без экспериментальной проверки невозможно получить правильное представление о химических формах стабилизации продуктов расщепления.

Выбранный нами в качестве объекта исследования йод был очень удобен, так как он обладает несколькими устойчивыми валентными формами /перйодат, йодат, йодид, молекулярный йод/, изотопного обмена между которыми можно избежать в условиях низкой кислотности раствора /10/. Радиойод, образующийся как продукт расщепления, имеет ряд сравнительно долгоживущих изотопов /11/, идентификация которых не представляет затруднений при определении изотопного состава валентных форм.

Экспериментальная часть

Облучение препаратов

Облучение химически чистых соединений теллура $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$, цезия $CsCl, CsNO_3, Cs_2SO_4$ и йода KJO_4, KJO_3, KI , проводилось

протонами с энергией 660 Мэв на синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований.

Наличие ряда соединений цезия и йода, довольно хорошо растворимых в воде, позволило нам изучить влияние аниона на относительный выход форм радиоiodа, образующегося при расщеплении цезия и йода.

Так как следы адсорбированной влаги и кислорода воздуха влияют на относительный выход валентных форм элементов, образующихся при ядерных реакциях /2/, в ряде опытов нами исследовалось влияние предварительной обработки мишени на образование различных валентных форм радиоiodа. С этой целью препараты перед облучением тщательно высушивались в замкнутой системе в атмосфере аргона при различных температурах / $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$ - при комнатной температуре, соли цезия - при $\sim 300^\circ C$, соединения йода - при $\sim 80^\circ - 80^\circ C$ /, вакуумировались и облучались в эвакуированных кварцевых ампулах. Невакуумированные соединения облучались в пакетах из алюминиевой фольги или в ампулах.

Теллуровая кислота облучалась рассеянным пучком протонов с интенсивностью 10^{10} протонов через мишень в секунду в течение 10-20 часов. При таком облучении, когда температура мишени не превышала $90^\circ C$, нам удалось избежать сильного нагрева и тем самым предотвратить разложение теллуровой кислоты до нерастворимой в воде двуокиси теллура.

Соединения цезия и йода облучались как рассеянным пучком протонов в течение 15-30 часов, так и внутренним сфокусированным пучком протонов с интенсивностью $\sim 5 \cdot 10^{12}$ протонов через мишень в секунду в течение 30-40 минут.

Следует заметить, что облучение сфокусированным пучком приводит к сильному нагреву мишени /примерно до $300-400^\circ C$ /, это безусловно будет сказываться на результатах эксперимента. Однако большинство радиохимических исследований проводится именно при облучении вещества мишени протонами с большей интенсивностью. Поэтому казалось интересным изучить образование различных форм радиоiodа в зависимости от интенсивности пучка протонов. Такое сравнение было выполнено при облучении солей цезия, йодата и йодида калия.

Идентификация валентных форм радиойода

Облученные препараты "остывали" около 12 часов для того, чтобы распались короткоживущие изотопы йода /12/, после чего мишени растворялись в свежеперегнанном бидистиллате. Поскольку растворы $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$, $CsNO_3$, $GeSO_4$ имели кислую реакцию, то для избежания возможного изотопного обмена между окисленными и восстановленными состояниями йода бидистиллат в этих случаях предварительно подщелачивался так, чтобы раствор имел нейтральную реакцию. Для анализа бралась аликвотная часть от общего раствора.

В основу методики изучения валентных форм радиоактивных изотопов йода, получающихся по реакциям глубокого расщепления и при последующем растворении вещества мишени в воде, легло хроматографическое разделение анионов йода IO_4' , IO_3' , I' / без носителя, описанное в литературе /13/ и модифицированное нами применительно к условиям нашего опыта.

Предварительная разработка метода разделения микроколичеств периодата, йодата, йодида и элементарного йода была выполнена с помощью $I^{131}'O_4'$, $I^{131}'O_3'$ и I^{131}' . Свободные от носителя периодат и йодат были синтезированы нами из препарата NaI^{131} , не содержащего носителя^{x/}.

Разделение анионов йода без носителей проводилось на колонке размером 100x2 мм, наполненной амберлитом $JR A-400$ в нитратной форме с размером зерна $\sim 30 \mu$. Элюентами служили для IO_4' - бидистиллат, для IO_3' и I' - раствор $1N KNO_3$ при $pH = 10,4$. После элюирования этих анионов мы определяли остающийся на смоле элементарный йод, для чего смола промывалась $1M$ раствором Na_2SO_3 , йод восстанавливался до йодида и последний вымывался $2N$ раствором $NaNO_3$ при $pH = 10,4$.

На рисунках 1 и 2 представлено хроматографическое разделение $I^{131}'O_4'$, $I^{131}'O_3'$, I^{131}' , I_2^{131}' без вещества мишени и в присутствии теллуровой кислоты /концентрация - 0,1 г/мл, общее количество 0,15 г/.

Как видно из рисунков, макроколичества $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$ не мешают разделению.

^{x/} Йодат / $I^{131}'O_3'$ без носителя / готовился окислением NaI^{131} в нейтральной или слабощелочной среде перманганатом калия; периодат / $I^{131}'O_4'$ без носителя / - окислением NaI^{131} в щелочной среде гипохлоритом натрия.

Аналогичные кривые были сняты и на фоне соединений цезия /концентрация 0,03-0,05 г/мл, общее количество 0,05 - 0,072 г/. Оказалось, что в присутствии $CsCl, CsNO_3$ и Cs_2SO_4 происходит частичное вытеснение йодата в периодатную фракцию, очевидно, макроколичествами ионов Ce' , NO_3' и SO_4'' . В этих случаях при идентификации валентных форм йода бралась сумма высших окисленных форм / J^{+7} и J^{+5} /.

Многочисленные опыты по разделению искусственной смеси анионов йода показали, что местоположение пиковых объемов не меняется. Однако, чтобы убедиться в том, что при идентификации валентных форм йода в облученной мишени они сохраняют такое же положение, мы проводили анализ на содержание радиоактивного йода в межпиковых объемах. Результаты анализа показали, что фракция X /между пиковыми объемами JO_4' и JO_3' / содержит 0,1 - 0,2% радиоактивного йода от общего его количества; фракция Y /между JO_3' и J' / около 3% ; фракция Z /между J' и J_2 / - 0,2 - 0,4%.

Следовательно, каждый пиковый объем сохраняет то местоположение, какое было получено при разработке метода.

Из-за сложного радиохимического состава продуктов расщепления теллура, цезия и йода нельзя было непосредственно снять кривую хроматографического разделения валентных форм радиоiodа в облученной мишени. Поэтому каждая йодосодержащая фракция после разделения нуждалась в дальнейшей очистке, для чего в нее вводились макроколичества носителя йода /10 мг/ в соответствующей валентной форме, и затем йод выделялся по дистилляционной и экстракционной методике /14/.

Для определения возможных потерь радиоактивного йода в процессе хроматографического разделения валентных форм сумма удельных активностей йода всех полученных после очистки фракций сравнивалась с удельной активностью йода, выделенного целиком из такого же объема раствора, какой был взят для определения валентных форм. Результаты показали, что потерь радиоактивного йода не происходит.

Параллельно хроматографическому разделению проводилось определение валентных форм йода аналитическим методом /15/; вначале отделялись восстановленные формы /йодид и элементарный йод/ экстракцией в CCl_4 из

раствора, имеющего $pH = 3-7$. После этого из оставшегося раствора при $pH = 3$ осаждался йодат в виде $Ba(IO_3)_2$. Перйодат осаждался из оставшегося после отделения осадка $Ba(IO_3)_2$ фильтрата, доведенного до $1 N$ по HNO_3 в виде $Bi(IO_4)_3$.

Относительный выход йода в той или иной валентной форме определялся по удельной активности осадка PdI_2 , полученного из каждой фракции йода.

Активности осадков измерялись торцовым счетчиком МСТ-40. Идентификация радиоактивных изотопов йода I^{123} , I^{124} , I^{126} , I^{130} в каждой мишени проводилась по периоду полураспада и типу излучения. Для сравнения относительных выходов изотопов I^{123} и I^{130} , имеющих одинаковый период полураспада, но разный характер излучения, измерения активности проводились с Be -поглотителем и без него /16/.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные нами результаты о формах стабилизации радиоактивных изотопов йода, образующихся по реакциям глубокого расщепления теллура, цезия и йода быстрыми протонами, после растворения облученных препаратов в воде представлены в таблицах 1,2,3.

Т а б л и ц а 1^{xx/}

Распределение радиойода по валентным формам при облучении теллуровой кислоты быстрыми протонами

Метод определения	%% уд. активности				Примечание
	Окисленные формы		Восстановл. формы		
	IO_4^-	IO_3^-	I_2	I^-	
хроматографич.	12	66	1	21	мишень не вакуумир.
химический	10	65		25	
хроматографич.	26	13	8	52	Вакуумир. мишень
химический		44		56	

x/ $I^{123} (K), T_{1/2} = 13 \text{ час};$

$I^{126} (\beta^-, K), T_{1/2} = 13 \text{ дн};$

$I^{124} (\beta^+, K), T_{1/2} = 4,5 \text{ дн};$

$I^{130} (\beta^-), T_{1/2} = 12,6 \text{ час}.$

xx/ Данные, приведенные во всех таблицах, представляют среднюю арифметическую величину 6-9 определений. Максимальное отклонение не превышало 3-5%.

Т а б л и ц а 2

Распределение радиоиода по валентным формам при облучении солей цезия.

Соединение	Метод определения	%% уд. активности				Примечание
		Окисленные формы		Восстановленные формы		
		JO_4'	JO_3'	J_2	J'	
$CsCl$	хроматографич. химический	48		5	47	Мишень не вакуумировалась, интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}$ р через мишень/сек.
		6	38		58	
	хроматографич. химический	2		38	60	Вакуумированная мишень и интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}$ р через мишень/сек.
		1		99		
	хроматографич. химический	98		2		Вакуумированная мишень, интенсивность 10^{10} р через мишень/сек.
		7	83	10		
$CsNO_3$	хроматографич. химический	39		5	58	Мишень невакуумированная, интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}$ р через мишень/сек.
		6	38		56	
	хроматографич.	13		6	81	Вакуумированная мишень, интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}$ р через мишень/сек.
	хроматографич. химический	46		21	33	Вакуумированная мишень, интенсивность 10^{10} р через мишень/сек.
		7	40		53	
Cs_2SO_4	хроматографич.	12		7	81	Вакуумированная мишень, интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}$ р через мишень/сек.
	хроматографич. химический	23		34	43	Вакуумированная мишень, интенсивность 10^{10} р через мишень/сек.
3		20		77		

Т а б л и ц а 3

Распределение радиоиода по валентным формам при облучении соединений йода /мишени вакуумированные/

Соединение	Метод определения	% уд. активности				Примечание
		Окисленные формы		Восстановлен. формы		
		IO_4'	IO_3'	I_2	I'	
KIO_4	хроматографический	92		3	5	Интенсивность $10^{10}P$ через мишень /сек.
	химический	9	87	4		
KIO_3	хроматографический	94		2	4	--
	химический	9	83	8		
	хроматографический	85		5	10	Интенсивность $\sim 5 \cdot 10^{12}P$ с через мишень /сек.
	химический	21	74	5		
KI	хроматографический	5		7	88	--
	химический	2	0,5	97		
	хроматографический	9		2	89	Интенсивность $10^{10}P$ через мишень /сек.
	химический	1,5	1,5	97		

Как видно из полученных данных, относительный выход валентных форм зависит от условий опыта, а именно, от предварительной обработки мишени /высушивание и вакуумирование/ и от интенсивности пучка протонов.

Наличие следов влаги и адсорбированного кислорода воздуха в облучаемом соединении увеличивает относительный выход окисленных форм радиоиода /таблица 4/.

Так, при облучении высушенных и вакуумированных мишеней выход радиоиода в форме периодата и йодата уменьшался для $H_2FeO_4 \cdot 2H_2O$ в два раза, для $CsNO_3$ в три раза, а для $CsCl$ - примерно в двадцать раз.

Т а б л и ц а 4

Выход окисленных форм радиойода /сумма удельных активностей периодата и йодата в %%/ в зависимости от состояния мишени

Соединение	%% активности в форме $JO_4' + JO_3'$	
	Мишень в условиях лабораторного хранения	Вакуумированная мишень
$H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$	78	39
$CsNO_3$	39	13
$CsCl$	48	2

Результаты таблицы говорят также о том, что выход окисленных форм зависит от химического состава соединения, а именно, чем меньше кислорода содержится в кристаллической решетке, тем меньше образуется окисленных форм радиойода /3-й столбец таблицы 4/.

Снижение интенсивности пучка протонов на два-три порядка приводит к увеличению выхода радиойода в окисленном состоянии /таблица 5/.

Т а б л и ц а 5

Выход окисленных форм радиойода /%%/ в зависимости от интенсивности пучка протонов /мишени вакуумированные/

Соединение	$\sim 5 \cdot 10^{12}$ p через мишень/сек.	10^{10} p через мишень/сек.
$CsCl$	2	94
$CsNO_3$	13	46
Cs_2SO_4	12	23
KJO_3	90	93
KJ	3	6

Увеличение содержания йода в окисленных состояниях, J^{+7} , J^{+5} , при облучении мишеней рассеянным пучком протонов /температура мишени не превышала $80^{\circ}-90^{\circ}C$ / по сравнению с результатами, полученными при облучении сфокусированным пучком /температура $\sim 300-400^{\circ}C$ /, можно, вероятно, объяснить следующим образом. Известно, что электроны, связанные с F -центрами окрашивания в кристаллической решетке /3/, освобождаются при

нагревании, и часть этих электронов может быть захвачена возникающими положительными ионами радиоактивного йода, что приводит к увеличению отрицательного заряда йода. Кроме того, можно предположить, что с ростом интенсивности облучения увеличивается образование продуктов радиационного разрушения вещества мишени, с которыми возникающие радиоактивные ядра йода могут реагировать как при движении "горячего" атома внутри кристалла, так и в момент растворения материала мишени в воде.

Действительно, если облученные в тех условиях растворить в водном растворе, содержащем $K_2^{131}O_4$ или $K_2^{131}O_3$ без носителя, то наблюдается восстановление перйодата и йодата /таблица 6/.

Т а б л и ц а 6

Изменение химического состояния микроколичеств йода /%%/ при взаимодействии $J^{131}O_4$, $J^{131}O_3$, J^{131} /каждого в отдельности/ с облученными быстрыми протонами $K_2^{131}O_4$, KNO_3 и K_2SO_4 . Начальная активность йода в каждой фракции принята за 100%.

Валентные формы, наблюдаемые после взаимодействия	KCl с			KNO_3 с			K_2SO_4 с		
	$J^{131}O_4$	$J^{131}O_3$	J^{131}	$J^{131}O_4$	$J^{131}O_3$	J^{131}	$J^{131}O_4$	$J^{131}O_3$	J^{131}
$J^{131}O_4 + J^{131}O_3$	1,3	72,0	0,5	96,0	97,6	19,6	61,0	78,0	0,8
$J_2^{131} + J^{131}$	98,7	28,0	99,5	4,0	2,4	80,4	39,0	22,0	99,2

Облученный же KNO_3 частично окисляет йодид и практически не восстанавливает перйодат и йодат. На основании результатов довольно большого числа работ о радиационном разрушении нитратов /17/ можно предполагать, что наблюдаемое окисление йодидов может быть результатом действия продуктов разложения нитрата / NO_2 и O /.

Сопоставление результатов таблиц 2 и 6 позволяет сделать заключение, что радиоiod, образующийся при облучении соединений цезия интенсивным пучком протонов, стабилизируется преимущественно в низшей валентной форме. Действительно, даже при облучении нитрата, когда можно было бы ожидать большего образования радиоiodа в окисленных формах, почти 90% радиоiodа обнаружено в восстановленных формах.

Рассматривая результаты таблицы 3, можно сказать, что при облучении соединений йода / KJO_4, KJO_3, KJ / основная часть образующегося радиоактивного йода была обнаружена в той форме, в какой он находился в облучаемом соединении, за исключением периодата, для которого 87% радиоактивного йода найдено в йодатной фракции. Интересно отметить, что аналогичные данные были получены и при облучении йодата и периодата тепловыми нейтронами /таблица 7/.

Т а б л и ц а 7

Задержка радиоактивного йода в облучаемых соединениях /%/

Соединение	Результаты нашей работы (Р, РХП)	Литературные данные (Р, Р)
KJO_4	9 - JO_4' 87 - JO_3'	4 - JO_4' 86 - JO_3' /18/
KJO_3	83	87/19/
KJ	97	-

Изотопный состав валентных форм радиоактивного йода, образующегося при расщеплении теллура и цезия быстрыми протонами, приведен в таблице 8.

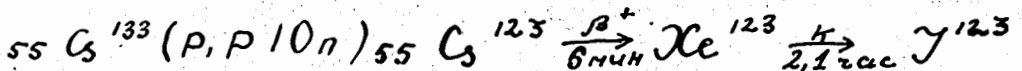
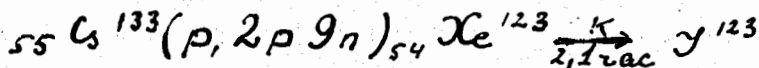
Т а б л и ц а 8

Изотопный состав отдельных валентных форм радиоioda /%/

Соединение	Валентная форма радиоioda	$J^{123x'}$	J^{124}	J^{126}	J^{130}
$H_2FeO_4 \cdot 2H_2O$	JO_4'	18	24	52	8
	JO_3'	12	38	47	5
	J_2'	14	33	47	6
	$\Sigma J_{xx'}$	13	35	47	5
$CsCl$	JO_4'	38	28	24	8
	JO_3'	35	31	28	8
	J_2'	30	33	33	4
	ΣJ	21	37	36	6
$CsNO_3$	JO_4'	33	35	29	3
	JO_3'	20	45	31	4
	J_2'	23	41	30	6
	ΣJ	38	31	27	4
	J_2'	25	40	29	6
	ΣJ	32	37	29	2

Как видно из таблицы, изотопный состав всех валентных форм практически одинаков, особенно, если учесть, что ошибка определения относительных выходов составляет 30-40%.

х/ Следует отметить, что изотоп J^{123} , получающийся при облучении Cs , может также образовываться из Xe^{123} по реакциям, которые можно схематически записать так:



xx/ ΣJ -мишень, полученная при выделении всего йода без разделения валентных форм.

В ы в о д ы

Изучение валентных форм, в которых происходит стабилизация радиоактивных изотопов йода, возникающих по реакциям глубокого расщепления Te , Ce и J под действием протонов с энергией 660 Мэв и при последующем растворении облученных мишеней в воде, показало, что:

1/ на относительный выход валентных форм радиоiodа влияет химический состав мишени, интенсивность пучка протонов, наличие следов влаги и воздуха в облучаемом препарате;

2/ при облучении высушенных и вакуумированных теллуровой кислоты и соединений цезия радиоiod стабилизируется, в основном, в низших валентных формах J_2 , J' . В присутствии следов адсорбированных влаги и кислорода воздуха возрастает выход радиоизотопов йода в окисленных формах JO_4' , JO_3' ;

3/ снижение интенсивности пучка протонов на два-три порядка при облучении сухих вакуумированных солей цезия и йода приводит к увеличению выхода йода в окисленных формах;

4/ есть основания предположить, что продукты радиационного разрушения вещества мишени оказывают свое влияние на стабилизацию йода в той или иной форме;

5/ изотопный состав всех валентных форм радиоiodа одинаков.

В заключение авторы приносят большую благодарность доктору химических наук А.Н. Мурину, кандидату химических наук В.А. Халкину и научному сотруднику М.Я. Кузнецовой за ценные замечания и участие в обсуждении результатов работы.

В выполнении экспериментальной части работы принимала участие техник Лаборатории Н.С. Мальцева.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 декабря 1959 года.

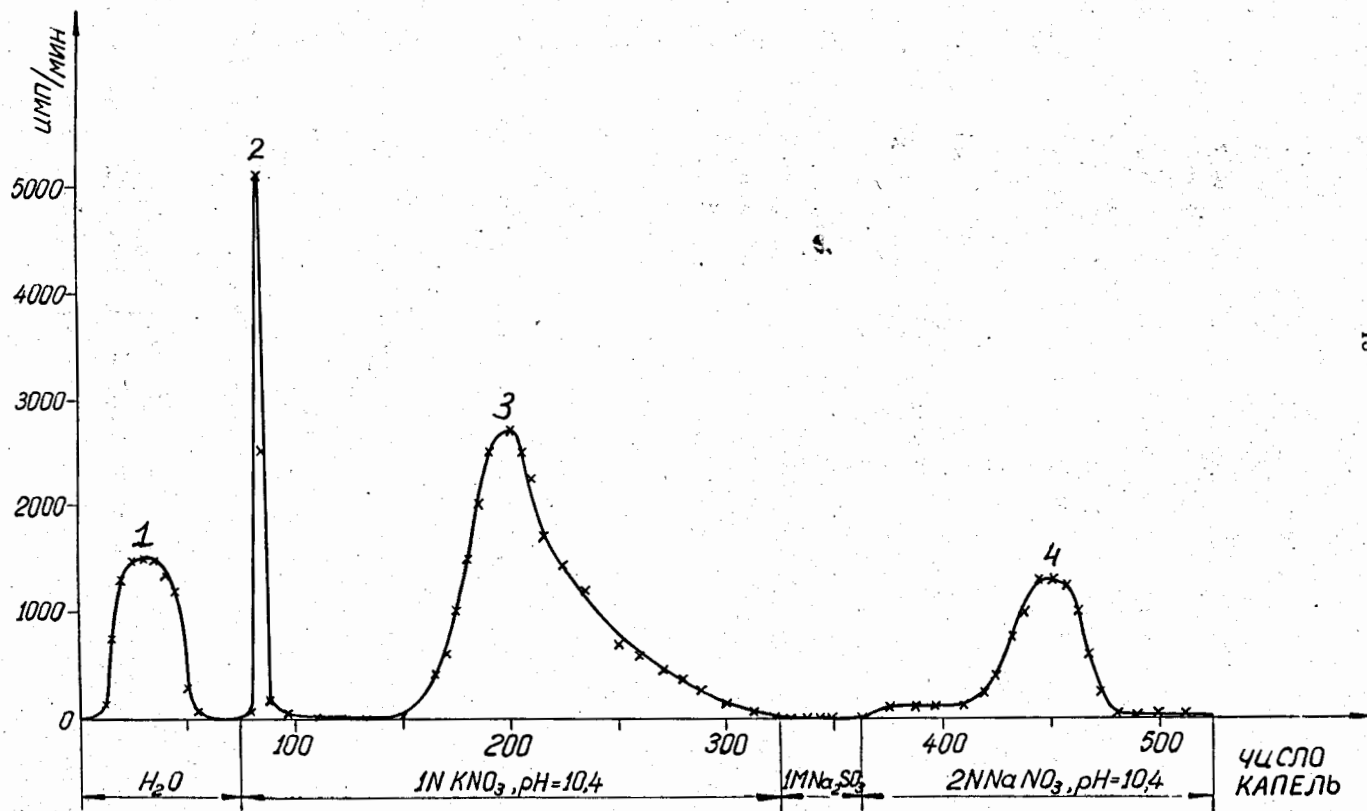


Рис. 1. Хроматографическое разделение анионов йода:
 1- $I^{31}O_4^-$, 2- $I^{127}O_4^-$, 3- I^{131} , 4- I_2^{31}

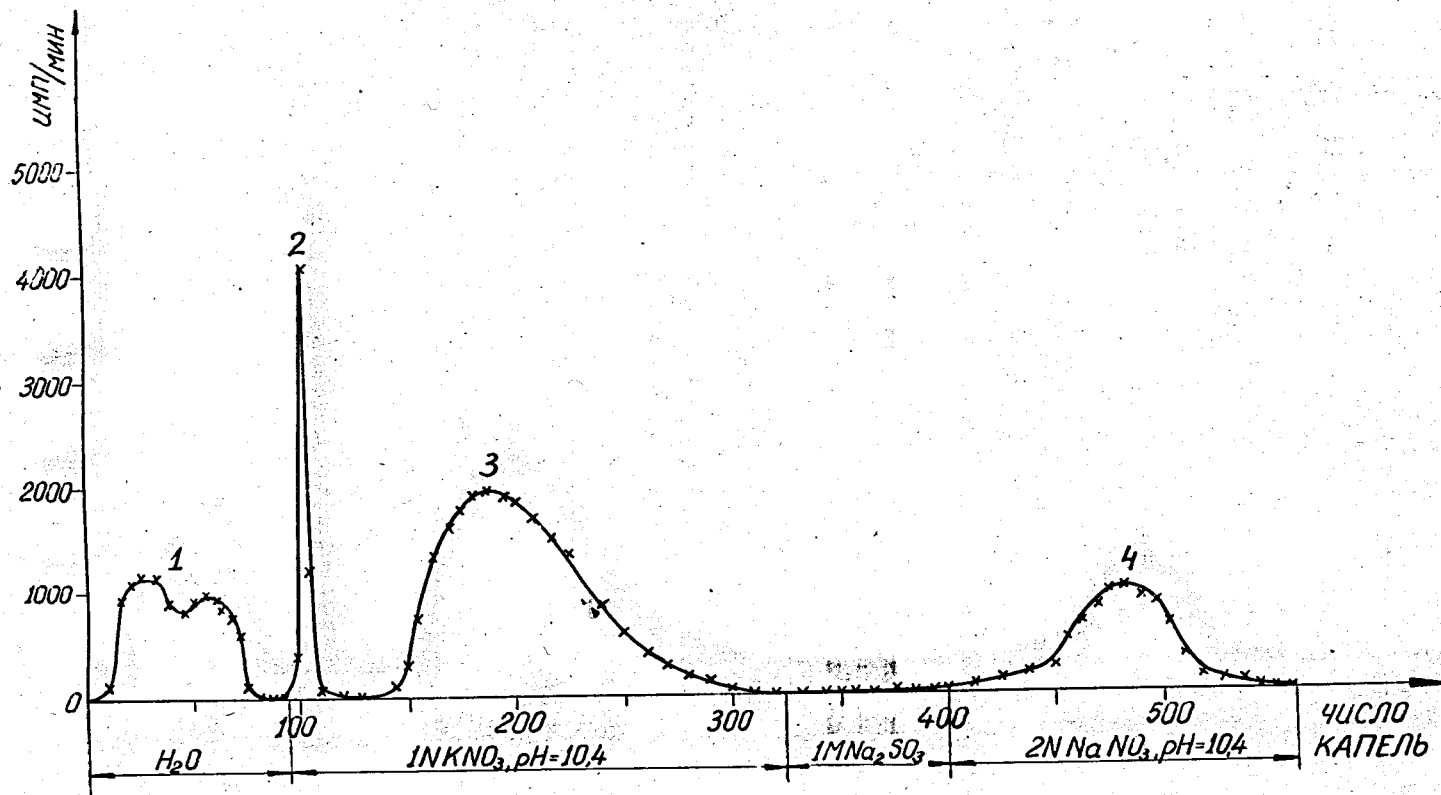


Рис. 2. Хроматографическое разделение анионов йода на фоне $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$:

1- I_4^{3-} , 2- I_3^{-} , 3- I^{-} , 4- I_2 .

Л и т е р а т у р а

1. Сборник "Химическое действие излучений большой энергии". стр.207-229, 242-254, 1949, ИЛ.
Симпозиум по химическим эффектам при ядерных превращениях. Нью-Йорк, сентябрь 1957.
(Symposium on Chemical effects of nuclear transformations) - J. Phys.Chem. 62, 11, 1343,1958;
D.J. Meier, C.S. Garner, J. Chem.Phys. 17, 12, 1344, 1949;
P.E. Yankwich, J. Chem.Phys. 15, 6, 374, 1947;
R.D. Smith, A.H.W. Aten, J. Inorg.Nucl.Chem. 1, 4/5, 296, 1955;
L.J. Sharman, K.J. McCallum, J.Am.Chem.Soc. 77, 2989, 1955; Inorganic Chemistry and Radiochemistry by H.J. Emeleus and A.G.Sharpe, v. 1, 267, 1959.
2. W.S. Koski, J. Am. Chem. Soc. 71, 12, 4042, 1949;
T.A. Carlson, W.S. Koski, J. Chem.Phys. 23,9,1596,1955;
D.H. Nelson, K.J. McCallum, Can. J. Chem. 36, 6, 979, 1958.
3. P. Sue, R. Caillat, Compt. rend. 230, 1666-1667, 1864, 1950.
4. Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве, август 1955, том 7, стр.196 /русс.яз./.
5. G.A. Chackett, K.F. Chackett, Nature, 4422, 232, 1954.
6. G. Rudstam, Svensk Kem. Tidskrift 69, 8, 378, 1957.
7. Н.И. Борисова, М.Я. Кузнецова, Л.Н. Курчатова, В.Н. Мехедов, Л.В. Чистяков. ЖЭТФ, 37, 2 /8/, 366. 1959.
8. A.H.W. Aten, Phys. Rev. 71, 9, 641, 1947.
9. Spallation of medium weight elements by G. Rudstam стр. 26, 1956, Upsala.
10. M. Haissinsky, J. Chim.Phys. 47, 957, 1950;
J.W. Kennedy, O.E. Myers, J. Am.Chem.Soc. 72, 950, 1950.
11. Rev.Mod.Phys. 30, 2, II, 1958.
12. Н.Г. Зайцева, М.Я. Кузнецова, И.Ю. Левенберг, В.А. Халкин. Радиохимия /в печати/.
13. M.L. Good, M.B. Purdy, T. Hoering, J. Inorg. Nucl.Chem. 6, 73, 1958.

14. М.Я. Кузнецова, В.Н. Мехедов, В.А. Халкин. ЖЭТФ, 34, 5, 1096, 1958.
15. Radiochemical Studies: The Fission Products by Ch.D. Coryell and N. Sygarman, 1, 19, 1951.
16. M. Lindner, I. Perlman, Phys.Rev. 78, 499, 1950.
17. E.R. Johnson, J. Am.Chem.Soc. 80, 17, 4460, 1958;
D. Hall, G.N. Walton, J. Inorg. Nucl.Chem. 64, 288, 1958.
G. Hennig, R. Lees, M.S. Matheson, J. Chem.Phys. 21, 4, 664, 1953;
C.J. Hochandel, T.W. Davis, J. Chem.Phys. 27, 1, 333, 1957;
J. Cunningham, H.G. Heal, Trans. Far. Soc. 54, 9, 1355, 1958.
18. A.H.W. Aten, G.K. Koch, G.A. Wesselind, A.M. de Roos. J. Am. Chem. Soc. 79, 1, 63, 1957.
19. R.E. Cleary, W.H. Hamill, R.R. Williams, J. Am. Chem.Soc. 74, 4675, 1952.