

МИНИСТЕРСТВО УКРАИНЫ ПО ДЕЛАМ ЗАЩИТЫ
НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ
НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС
НТЦ НПО «ПРИПЯТЬ»
ОТДЕЛ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. Е. Тепикин, С. И. Рыбалко, Ю. И. Зимин
Г. И. Петелин, Э. А. Рыбакова

«ГОРЯЧИЕ» ЧАСТИЦЫ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО
СОСТАВА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Препринт НПО «Припять»

*Дорогому
Валентину Антоновичу
от авторов с благодарностью
за помощь*

Чернобыль—1992

Тепикин

Зимин
Рыбалко

МИНИСТЕРСТВО УКРАИНЫ ПО ДЕЛАМ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ
ОТ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОВЫЛЬСКОЙ АЭС

НТЦ НПО "ПРИПЯТЬ"

ОТДЕЛ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. Е. Тепикин С. И. Рыбалко, Ю. И. Зимин, Г. И. Петелин, Э. А. Рыбакова

"ГОРЯЧИЕ" ЧАСТИЦЫ УРАН-ПЛОУТОНИЕВОГО СОСТАВА ЧЕРНОВЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Препринт НПО "Припять"

Чернобыль 1992

"Горячие" частицы уран-циркониевого состава чернобыльской аварии.

В.Е.Тепикин, С.И.Рыбалко, Ю.И.Зимич, Г.И.Петелин, Э.А.Рыбакова

Детальное изучение состава матрицы частиц твердофазных радиоактивных выпадений, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС, показало, что в 30-км зоне около половины таких частиц размером более 10 микрон содержат наряду с ураном и цирконий. По данным микрорентгеноспектральных и рентгеноструктурных исследований этих частиц, перед взрывом, в результате повышения температуры, успел образоваться твердый раствор U-Zr-O переменного состава. Радионуклидный состав частиц мало отличается от состава частиц диоксида урана. Химическая стойкость уран-циркониевых частиц является причиной обнаруженного ранее отличия растворимости частиц "горячих" частиц от растворимости диоксида урана. Можно ожидать, что это свойство существенно повлияет на скорость выхода радионуклидов из частиц и их дальнейшую судьбу.

Ответственный редактор проф. Е.В.Сенин

"Hot" particles of uranium-zirconium composition from Chernobyl fall-out.

Тепикин В.Е., С.И.Рыбалко, Э.А.Рыбакова, Ю.И.Зимин, Г.И.Петелин.

The detailed investigation of the matrix composition of solid-phase nuclear fall-out that was formed during the Chernobyl accident makes it evident that in 30 km area about a half of these particles which dimension is more than 10 microns contains both uranium and zirconium at the same time. One may conclude from the data of microprobe and X-ray structural analyses that before the fall-out the solid solution of changeable U-Zr-O composition has had time to come into being. The radionuclide composition of such particles has a little difference from that of uranium dioxide particles. The chemical stability of U-Zr particles causes the found out earlier difference in the solubility of some "hot" particles from the solubility of UO_2 . One may suppose that this property will have the essential influence on the rate of the radionuclide release from the particles and its further destiny.

Chief editor prof. Senin E.V.

Результаты, приведенные в настоящей работе, получены при изучении радиоактивного загрязнения почв и донных отложений территории "тридцатикилометровой" зоны вокруг аварийного энергоблока Чернобыльской АЭС. Это изучение показало, что и по прошествии шести лет от аварии на 4-ом блоке по-прежнему основная доля активности заключена в так называемых "горячих" частицах. Определение этих частиц как не является общепринятым и мы в своей работе используем его меньшей мере два его толкования. Первое - "горячая" частица - дискретная часть дисперсных твердофазных радиоактивных материалов техногенного происхождения, имеющих активность, достоверно превышающую значения фоновой удельной активности для данной местности в период, предшествовавший первичному радиационному воздействию. Второе - "горячая" частица - это частица, содержащая радионуклиды техногенного генезиса, с активностью, превышающей фоновые значения, которая при различных природных процессах может перемещаться как единое целое.

Во втором толковании отражено операционное определение, когда в понятие "горячей" частицы включен процесс ее выделения из природных образцов почв, донных отложений, биомассы, фильтров аэрозольных установок и т.п., при минимальном воздействии на саму частицу. В своей практике мы используем преимущественно это второе толкование, уточняя, при необходимости, идет ли речь о собственно активной компоненте "горячей" частицы, или об агрегате, матрице, в которую включена, или с которой более-менее прочно связаны радиоактивная фаза. Еще одним расширением относительно традиционного понимания является включение в понятие "горячих" - частиц, содержащих не только плутоний, но и другие радионуклиды.

Необходимость более подробного изучения "горячих" частиц вытекает из необходимости обеспечения количественными параметрами как программ и методик прогноза миграции радионуклидного загрязнения, так и работ по дезактивации территории. Детальное изучение состава и строения частиц позволит также получить более детальную картину развития аварии на 4-ом блоке ЧАЭС.

В настоящем препринте рассматривается только один из вопросов, которые авария оставила перед исследователями и который можно сформулировать так - в чем причина существенно меньшей растворимости части топливных ча т и ц от растворимости исходного топлива, представленного диоксидом урана. В довольно концентрированной форме он сформулирован в работе, выполненной Комплексной экспедицией ИАЭ им. И. В. Курчатова в г. Чернобыле: "Для определения степени выщелачивания радионуклидов из частиц топливных выпадений на грунте был проведен эксперимент по растворению частиц разных форм выброса в азотной кислоте.

Для анализа были приготовлены:

- а) 236 г/ч из проб грунта в 5 км западнее аварийного блока,
- б) 474 г/ч из проб, взятых в закрытых помещениях аварийного блока,
- в) 24.4 мг растертого топлива из фрагмента твэл-а,
- г) частицы мелкодисперсного выброса с мазков, взятых со стен внутренних помещений блока.

Растворение проводилось в 3.5 М, 7 М азотной кислоте и смеси концентрированной азотной и плавиковой кислот. В результате установлено, что около половины урана во всех формах выброса находится в фазах, отличающихся от UO_2 , которая без остатка растворяется в азотной кислоте" [1]. Авторы работы, отмечая наличие на поверхности частиц таких примесей, как Zr, Cu, Fe, Si, Ag, идентифицированных рентгено-флуоресцентным анализом, пишут далее: "Возможно, часть урана образует с некоторыми примесями нерастворимые в HNO_3 соединения. Вопрос требует дополнительного изучения."

Исследования, проведенные отделом радиационного мониторинга окружающей среды НТЦ НПО "Припять" в 1990-1991 г.г., позволили, как нам кажется, получить частично ответ на этот вопрос.

Чтобы получить более достоверные данные о морфологии, химическом и фазовом составе твердофазовых выпадений аварийного блока необходимо было получить их не в виде микронных выделений, входящих в состав агрегатов, а в виде отдельных частиц более крупного размера. Для более надежного сопоставления с материалом, изучавшимся в работе [1], такие частицы были выделены из проб, отобранных в районе "рыбьего" леса и дальше от центра аварии по направлению западного следа. При выделении частиц принимались меры предосторожности, чтобы избежать переизмельчения частиц. Высушенная, нерастертая проба подвергалась предваритель-

ному обогащению на установке "Поиск", разработанной и изготовленной в отделе радиационного мониторинга НТЦ НПО "Припять". Дальнейшее выделение частиц производилось оператором под бинокулярной лупой. Выделенные частицы размером от 10 микрометров и более передаются на дальнейшее комплексное изучение.

В целом ряде проб, особенно удаленных от центра аварии, не удается выделить отдельные частицы под бинокляром. Как правило - это агрегатные образования размером более 200 мкм. Активная же составляющая в них мелкодисперсна, что затрудняет изучение состояния ее поверхности, состава.

При просмотре под микроскопом МС-10 неагрегатные частицы имеют цвет черный, темно-серый. Размер - от 10 до 850 мкм.

Первым этапом детального изучения частиц является радиоспектрометрия, проводится исследование α гамма-, бета-, и альфа-активности.

Вторым этапом изучения матрицы частиц является электронно-микроскопическое изучение частиц с использованием растрового электронного микроскопа РЭМ-100У. Этот микроскоп снабжен также рентгеновским волновым спектрометром и позволяет выполнять анализ элементного состава объектов. Приведем некоторые технические характеристики микроскопа и спектрометра:

		Области анализируемых	
Кристаллы-анализаторы		длин волн, ангстремы	
фторид лития	LiF	0.87	- 2.83
пентаэритри	PEr	1.90	- 6.14
калиевая соль фталевой кислоты	KAP	5.73	- 18.66
стеарат свинца	PLSt	21.50	- 69.10

Разрешающая способность микроскопа - 10 нм.

Увеличение 20 - 200000.

Регистрация спектров ведется на диаграммной ленте и фотографируется с экрана ЭЛТ.

Прибор обеспечивает возможность изучать распределение элементов в точке, по линии, по площади.

Ускоряющее напряжение меняется ступенчато: 5, 15, 30, 40 кв. Этого диапазона напряжений достаточно, чтобы возбудить L и M линии всех элементов и K линии элементов с номерами менее 58 (для Se Z=58 - 40.3 кв).

В первую очередь микрорентгеноспектральные исследования горячих частиц в РЭМ-100У применяются в ОРМОС для поиска урансодержащих частиц в составе агрегатных частиц. За исключением частиц из ближней зоны активная, как правило содержащая уран,

часть агрегата намного меньше размера частицы, выделенной оператором по методике, описанной выше. После того как такой агрегат помещается в электронный микроскоп, спектрометр настраивается на регистрацию излучения урана, как правило это линия $M\alpha$ на кристалл-анализаторе РЕТ (Ма. совпадает с линией Кальция). Сканируя поверхность агрегата, меняя увеличение, обычно удается установить область, содержащую уран, наметить ее границы по морфологическим признакам и, в дальнейшем, подбирать режим исследования, манипулируя уже видимым изображением. Контрольное исследование и документирование - просмотр и съемка выполняется как в режиме сканирования по линии, так и по площади. После определения интересующей области проводится сканирование всего диапазона длин волн, обеспеченных вышеприведенным набором кристалл-анализаторов. Таким образом уточняется состав матрицы и/или примесей в ней. На рис. 1 показаны такие спектры для частицы ГМ-2. Из приведенных в ней элементов железо, кальций и титан, судя по сканограммам по площади, сконцентрированы в примесях, медь является артефактом - просвечивает столлик, на котором укреплен частица.

Применение лазерного электронного микроскопа для исследования морфологии более эффективно, чем оптического благодаря большой глубине резкости и значительному диапазону увеличений. В нашей практике изучения частиц использовались увеличения до 15000 крат. При этом для собственно "горячих" частиц или активной части агрегатных частиц устанавливаются такие закономерности.

Для частиц с активностью выше 2 Бк/част. характерны следующие основные типы поверхности: массивная, слоистая (зернистая), шлакоподобная (пемзоподобная). Второстепенное значение имеют полосчатая или ошистая поверхность. В основном эти типы встречаются по отдельности, но могут изредка быть и переходные типы. Зернистая (блочная) поверхность состоит из разнокалиберных полигональных блоков, напоминающая поверхность так называемого растреканвшегося глинистого раствора. Размер блоков от доли до 65 мкм. Прочность сцепления таких частичек бывает настолько небольшой, что даже при переносе со столика оптического микроскопа на столлик электронного они распадаются на множество мелких частичек, состоящих как из групп, так и из единичных микроблоков. Другой тип поверхности - массивный, без явных признаков разделения на блоки. Как зернистые, так и массивные частицы могут нести следы оплавления, от отдельных оплавленных деталей на поверхности или в углублениях частицы, через

образование корочек на поверхности до потери характерных признаков "горячих" частиц. Наибольшая степень воздействия высоких температур проявляется в частицах с шлако- или пемзоподобной поверхностью и сферических частицах.

Исключительно характерным - индикаторным морфологическим свойством "горячих" частиц является наряду с микроблочностью и пористость. Пores на частичке бывает двух видов: мелкие - размером порядка первых десятых долей микрона и крупные - до 6 мкм. Мелкие - размещаются довольно равномерно по всей поверхности частичек, иногда как бы окружая зерна, иногда в виде линейных птервыистых цепочек. Крупные - распределены неравномерно, минимальная плотность - 1-2 крупные поры на видимую поверхность блока. На некоторых поверхностях доля площади крупных пор достигает 3/4 и более. Такие сотовидные поверхности встречаются на участках, составляя их небольшую долю поверхности блока.

Типичной морфологической характеристикой "горячих" частиц, отличающей их от минеральных зерен, являются неправильные обломочные формы, близкий к изометричному габитус. Редко встречаются частицы сферического и пластического габитуса; практически отсутствуют игольчатые. Для частиц с массивной структурой характерны острые сколы, отсутствие признаков растворения.

Использование описанной методики микрорентгеноспектрального анализа при исследовании частиц "вспадного следа" дало возможность установить статистическое различие в составе частиц, разной морфологии. Частицы, для которых характерным признаком является сильная оплавленность, как правило, содержат в своем составе цирконий. Точнее сказать, не все частички со следами оплавления содержат цирконий, но все цирконий-содержащие "горячие" частицы в большей или меньшей степени оплавлены, или покрыты оплавленной корочкой, или содержат включения, присыпки переплавленных масс.

Изучение распределения циркония по частицам выявляет резкую неоднородность. На одном конце его - частицы из практически чистого циркония, сплавленного с диоксидом урана. На другом - частицы с практически однородным распределением уран-цирконий, т.е. микрозондовое сканирование не обнаруживает различий в содержании урана и циркония на участках размером порядка 1 микрометра. Количественное соотношение между ураном и цирконием при этом разное - от почти чисто урановых до преимущественно циркониевых частиц.

Микрорентгеноспектральное исследование такой частицы ШО-1 проведено на РЭМ-100. " на микроволне JSCA-733 "Superprob" фирмы JEOL. Препарат получен при шлифовке поверхности частицы. Материал твердый, очень хрупкий с металлическим блеском в отраженном свете. Частица имеет пузырчатое шлакоподобное строение. Полости в срезах имеют вид округлых пустот, разделенных узкими ребрами. Отношение площади ребер к площади пустот примерно 1:4. Состав частицы в целом довольно однородный, но имеются места флуктуации даже в пределах 1 - 3 микрон. Эти вариации хорошо видны на сканограммах поверхности. Некоторые детали этих сканограмм заслуживают дополнительного описания: так в одном месте видна интенсивная область, которая отвечает в малой степени окисленному или даже металлическому урану. Для кислорода и углерода также отмечаются локальные скопления, бесформенные или вытянутые в виде цепочек. Некоторые из них соответствуют структурным элементам, выделяющимся на снимке при работе в режиме изображения. Распределение циркония, однородное при малом увеличении, при большем уже не выглядит так, дискретность неоднородности порядка 1-3 мкм. Количественные соотношения уран-цирконий-кислород, полученные в результате приближенного анализа, - 47%-33%-15% (весовые %) или 1:3:4 в атомных отношениях. Преприят не дает возможности качественно воспроизвести сканограммы или снимки поверхности, поэтому мы ограничили иллюстрации спектром снятым с типичных частиц ШО-1 и 1.А-2 (рис. 2,3).

Рентгеноструктурное изучение "горячих" частиц без разрушения проводилось с использованием дифракционного и фотометода.

Дифрактограммы снимались на микродифрактометре МИД с линейным координатным детектором.

Технические данные микродифрактометра:

- диапазон одновременной регистрации по 2θ : не менее 60 градусов,
- полный диапазон регистрации по 2θ : от -10 до +130 градусов,
- воспроизводимость определения угловой координаты одного и того же пика по 2θ : 0,02 градуса,
- микродифрактометр ориентирован на работу в составе IBM PC,
- мощность рентгеновской трубки: 300 в,
- общая потребляемая мощность не более 2 кв,
- линейный координатный детектор с числом каналов не менее 2300,
- расстояние фокус-образец переменное - от 60 до 100 мм,
- расстояние образец-детектор переменное - от 100 до 130 мм.

При фотометодической съемке выполнялась на рентгеновской установке УРС-60 в камерах типа РКД-57.3. Условия съемки - излучение железа нефилтрованное, напряжение 20 киловольт, ток 5 миллиампер, экспозиция 5-8 часов. Съемка производилась для каждого образца неоднократно, с подбором экранов с целью уменьшения отношения сигнал/шум. Измерение дебаеграмм проводилось на компараторе ИЗА-2, оценка интенсивности линий визуальная по десятичной шкале.

И в случае микродифрактометрической съемки, и при использовании камер РКД образец вращался вокруг одной оси, при этом нередко, особенно при очень малых размерах частиц, кольцо дебаеграммы состоит из отдельных достаточно крупных пятен, т.е. образец не представлял собой идеальный для этого метода порошок. Съемка по методу Гандольфи не использовалась, а для контроля образец переключался и съемка осуществлялась с вращением вокруг другой оси. Положение линий и их интенсивности при такой съемке практически совпадали во всех случаях, что свидетельствует об отсутствии текстурированности образцов.

Обработка данных измерений велась как по традиционной методике с использованием рентгеновской картотеки JCPDS, так и с помощью автоматизированной системы на ЭВМ в ОРМОС АТЦ (разработка Лаборатории компьютерной физики). Для ускорения поиска наряду с компьютерным вариантом картотеки JCPDS использовалась база данных соединений урана, содержащая 1313 спектров.

На рис.4 представлены результаты съемки частицы ШО-1 на микродифрактометре. В связи с тем, что область углов, регистрируемая при одной установке линейного координатного детектора, составляет 60 градусов (два тета), съемка проведена в 2 приема и, соответственно, на рис.4а и 4б приведены 2 рентгенограммы частицы (для области углов 25-85 и 65-125 градусов). Фон в области 20-85 градусов содержал небольшой пик около 57 градусов, а для области 65-125 градусов не имел характерных особенностей - был достаточно "белым".

После приведения интенсивностей разных областей к одной шкале по перекрывающейся области 60-85 градусов получена рентгенограмма, которая дана в табл. 1. Результаты расшифровки приведены на рис.4с и в табл.1. Сравнивая интенсивности этой рентгенограммы и эталонных следует учитывать разницу в режимах съемки - эталонные спектры снимаются в режиме нормальной дифрактометрии порошка, а на микродифрактометре режим съемки по введению поправок

ближе к фотометоду. С учетом данных по качественному составу (наличие U, Zr, O, C) видно (рис. 5), что рентгенограмма не может быть отождествлена ни с UO_2 , ни с Zr, ни с ZrO_2 . В то же время хорошо сопоставляется эта рентгенограмма с эталонными спектрами таких соединений, как $Nd_4Zr_3O_{5.6}$, $Nd_2Zr_2O_4$, $Ce_2Zr_3O_{10}$. Учитывая химическое сходство этих редкоземельных элементов и близость их ионных радиусов к радиусу урана, вполне можно допустить, что в данном случае мы имеем дело с соединением переменного состава типа Zr-U-O. Если принять за исходную наиболее близкую рентгенограмму $NdZr_3O_{5.6}$, то соотношение U:Zr:O будет 1:3:5.6, что следует сопоставить с отношением 1:3:4 по данным микрозондового анализа для этого образца.

Отсутствие в нашей картотеке уран-циркониевых соединений этого типа, а также невысокая относительная точность определения положения и интенсивности линий вызванная сильным фоном, не позволяет уточнить эту формулу по эталонным спектрам или расчетным путем. Сопоставление вышеприведенных данных рентгеноструктурного анализа и данных микрозондового анализа по неоднородности распределения циркония и урана в этой частице говорит в пользу сосуществования твердых растворов переменного состава в пределах одной частицы размером в десятки микрон. При этом примеси циркония, двуокиси урана и др. если и присутствуют в данном образце, то в очень незначительном количестве.

В целом доля рентгеноаморфных фаз относительно невелика. Даже такие морфологически шлакоподобные соединения, как U-Zr-O, которые явно прошли через стадию быстрой кристаллизации, дают достаточно отчетливую дифракционную картину, т.е. области микрокристаллов в них имеют размер порядка 5-20 нм.

Частицы, в которых обнаружен цирконий, находятся не только в западном направлении от блока, но и по всей 30-км зоне. Среди них не только частицы с типично обломочной поверхностью, но и частицы размером менее 10 мкм с шарообразной поверхностью, содержащие уран и цирконий.

Целенаправленный просмотр выявил, что среди частиц западного следа доля частиц, содержащих цирконий, порядка 50% в ближней зоне ("рыбий" лес) и 2/3 - на расстоянии 15 км от блока.

Радионуклидный состав этих частиц в основном соответствует составу чисто урановых частиц. Удельная активность их меньше чем чисто урановых, и примерно пропорциональна разбавлению за счет циркония. Среди уран-циркониевых также встречаются частицы, не содержащие радионуклидов, но иногда добавляется активный 95-Zr.

Обсуждение результатов.

Первые публикации о горячих частицах чернобыльской аварии, содержащих цирконий, появились в 1990 г и сообщения о них были сделаны в том же 1990 г. на II Всероссийском совещании по ЛПА. В работе [1] фиксировалось наличие таких частиц, по другим данным [2] предполагалось образование соединений типа автентики $(U,Zr)O_2$. В образцах, взятых из помещений 4-го блока, обнаружены кристаллы соединения типа циркония, обогащенного ураном - $(Zr,U)SiO_4$, названного чернобылитом. Сообщалось также об образце, состава примерно UZr_6O_{11} .

Двуокись циркония существует в виде нескольких полиморфных разновидностей. В пригодных условиях устойчива моноклинная фаза - минерал бадделит с искаженной структурой типа CaF. В синтетической системе $UO_2 - ZrO_2$ по одним данным [3] существует ряд твердых растворов от UO_2 примерно до 40% весовы ZrO_2 , далее от 40 до 50% ZrO_2 - двухфазная область, и затем свыше 50% до ZrO_2 - тетрагональный ряд. По другим, более новым, данным [4] существование такого ряда не подтверждается, и при кристаллизации из расплава оксидных фаз образуются не твердые растворы, а почти чистый диоксид урана (кубический уранинит) и диоксид циркония (моноклинный бадделит).

Данные, приведенные выше, показывают, что в процессе разрушения реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС происходило плавление циркониевой оболочки твэлов и образование соединений переменного состава - типа твердых растворов - уран-цирконий-кислород. Структурный тип образовавшегося соединения CaF_2 аналогичен диоксиду урана и диоксиду циркония. В то же время возможна неоднородность состава таких твердых растворов даже в пределах первых микрон. Присутствие среди "горячих" частиц уран-циркониевых разновидностей с разными морфологическими характеристиками и разным соотношением радионуклидов говорит о довольно длительной истории образования и выноса этих частиц в период развития аварии.

На основании комплексного оптического, электронно-микроскопического, микрорентгеноспектрального и микрорентгеноструктурного изучения горячих частиц западного следа установлена роль топливно-конструкционных частей цирконий-уран-кислородного состава (свыше 50% от общего числа частиц размером более 10 мкм). Эти частицы зарегистрированы во всей тридцатикилометровой зоне вокруг ЧАЭС. Максимальный размер таких частиц, наблюдавшийся нами до 500 мкм. Минимальный - 10 микрон - соответствует минимальному изучавшемуся нами размеру частиц.

Высокая химическая стойкость таких соединений является вероятным объяснением отмеченного во введении факта отличия растворимости почти половины частиц от растворимости чистого диоксида урана. Для правильного учета этой особенности частиц при прогнозировании развития миграции радионуклидов необходимо учитывать пространственное распределение таких частиц и их долю в разных ландшафтно-геохимических зонах.

Пористый шлако-подобный характер поверхности топливно-конструкционных цирконий-уран-кислородных частиц, может существенно повлиять на их поведение в организме человека. Скорость их выведения из легких, по-видимому, будет меньше чем у гладких топливных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Богатов, А. А. Боровой, В. И. Дворецкий и др., - Исследование устойчивости наиболее радиологически опасных нуклидов в различных формах топливного выброса Чернобыльской аварии. Препринт ИАЭ-5022/3, 1990 г.
2. Боровой А. А., В. Я. Галкин, А. П. Криштин и др. - Новообразованные продукты взаимодействия топлива с конструкционными материалами 4-го блока Чернобыльской АЭС. Радиохимия, 1990, т. 32, вып. 6, с. 103-113
3. Lankertson A. & Mueller M. H. - Equilibrium phases in the system $UO_2 - ZrO_2$. U.S. Atomic Energy Commission, AEC-3068, 1951.
4. Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов: Справочник, двойные системы, вып. 5, ч. 5 - Ин-т. химии силикатов им. И. В. Гребенникова. Л.: Наука, 1991

Дифрактограмма образца ШС-1 в сопоставлении с эталонами.

Sample	26- 359 95	28- 678 91	17- 458 65
ШС-1	Ce2 Zr3 O10	(Nd. 25 Zr. 75 01.875)	Neodymium Zr Nd2*Zr2*O7
3.020 98	3.021 100	3.012 100	3.070 100
2.630 46	2.632 40	2.611 30	2.660 50
1.860 170	1.859 5	1.845 55	1.882 70
1.593 39	1.590 5	-	1.605 65
1.579 67	1.580 50	1.572 40	-
1.510 24	1.513 6	1.506 8	-
1.321 13	1.316 9	-	1.331 12
1.305 17	1.305 9	1.304 6	1.296 4
1.203 100	1.205 20	1.196 14	-
1.181 13	1.176 6	-	1.190 16
1.169 25	1.170 8	1.166 10	1.169 4
1.119 16*	-	-	-
	6.024 5	1.064 10	6.140 6
	+ 2.611 40	1.008 8	3.210 4
	+ 1.845 60	-	+ 2.440 8
			+ 2.172 4
			+ 2.046 6
			+ 1.799 4
			+ 1.632 4
			+ 1.537 16
			+ 1.491 4
			+ 1.386 2
			+ 1.229 4
			+ 1.222 26
			1.087 18
			1.067 4
			1.025 16

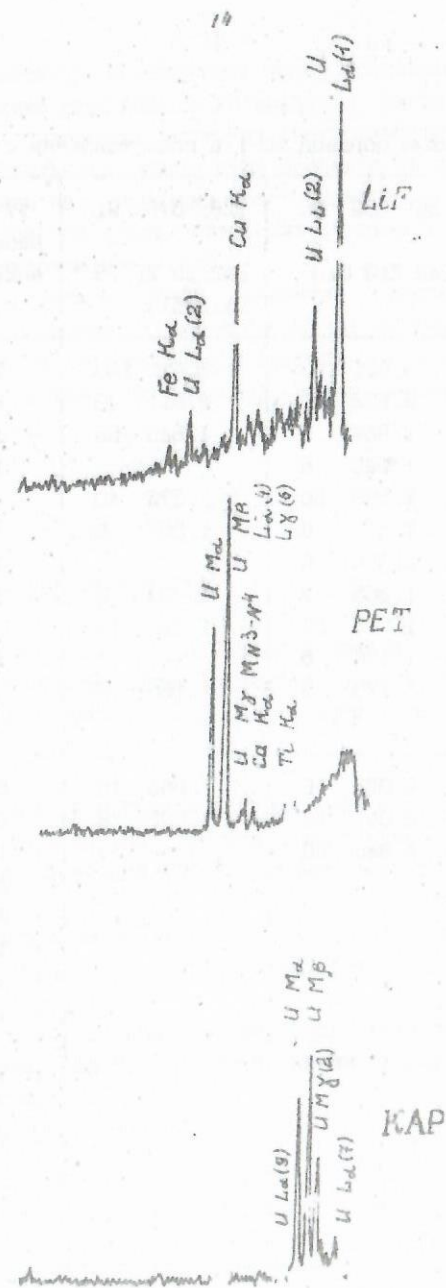


Рис. 1. Спектр рентгеновской флуоресценции "горячей" частицы ГМ-2. РЭМ-100V. Напыление углеродом.

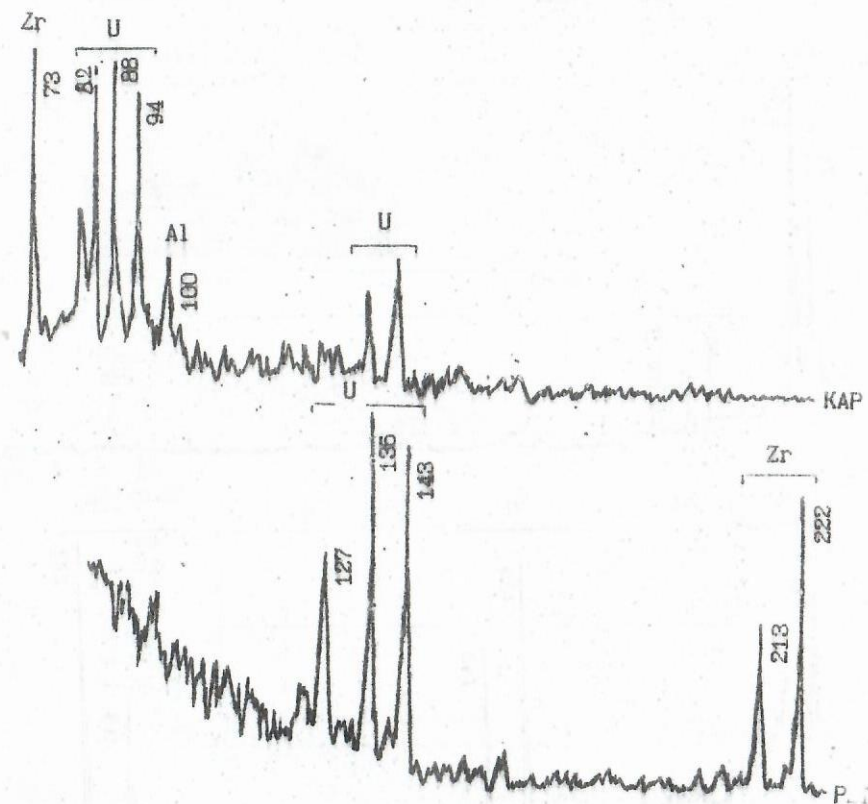


Рис. 2. Спектр рентгеновской флуоресценции "горячей" частицы ШС - I. РЭМ-100V.

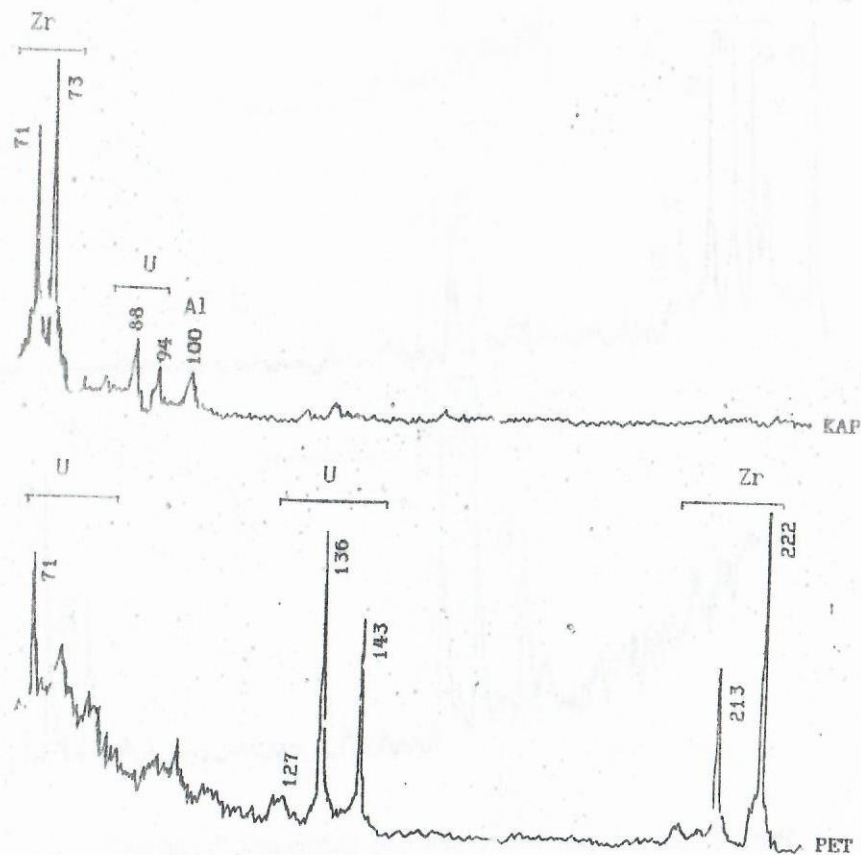
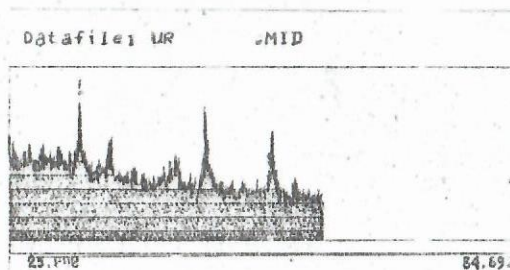
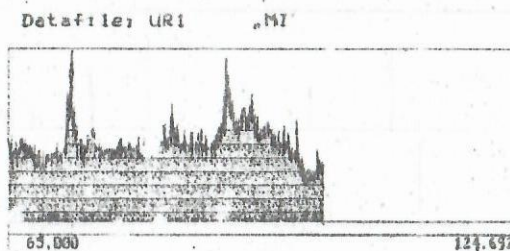


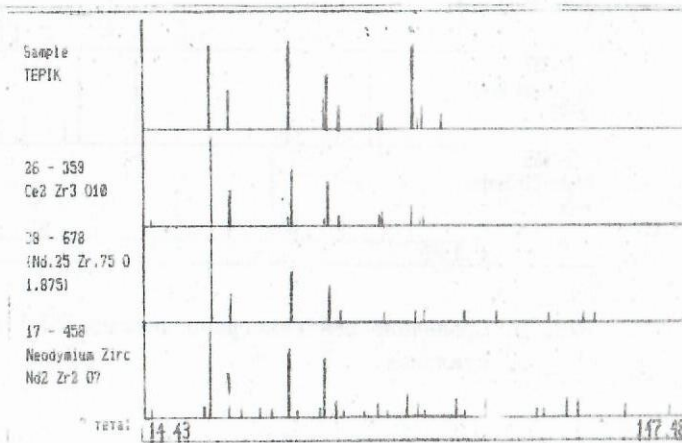
Рис. 3. Спектр рентгеновской флуоресценции "горячей" частицы MI.A.2. РЭМ-100У. Напыление алюминием.



a



b



c

Рис. 4 а, б. Спектры рентгеновской дифракции горячей частицы ШС-1. Дифрактометр МЦД, излучение железное, экспозиция 20 минут).
Рис. 4 в. Сравнение рентгенограмм частицы ШС-1 и эталонов.

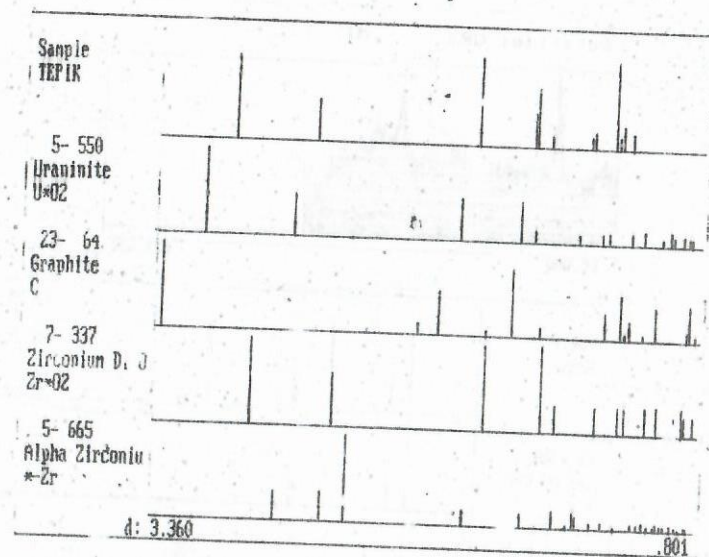


Рис. 5. Сравнение рентгенограмм частицы ИС-1 и эталонов.

Подписано к печати 14.05.92
Формат 60х84/16. Усл. печ. л. -1,2. Уч. изд. л. - 0,9
Тип. КВВМУ

Зак. 75-92