



РОСАТОМ



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «МАЯК», г. Озерск**

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Опыт применения счетчиков нейтронных совпадений для измерения массы плутония в скрапах сложного состава

**Семенов М.А., Ефремова А.А., Левунин С.Л., Аникин А.В.,
Корнев В.Б.**

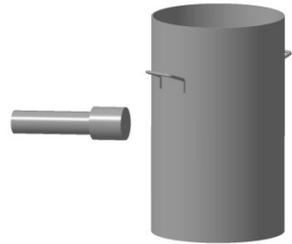
**XIII международное совещание
«Проблемы прикладной
спектрометрии и радиометрии - 2015»**

05.10.2015-08.10.2015

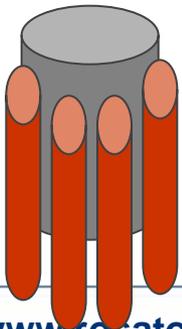
Скрап, отходы Pu



МКС-АТ6101



ИКП – нейтронная радиометрия



www.rosatom.ru

Производственные участки

Контроль качества

Скрап

Скрап

РАО

Переградуировка

Точка входа переработки скрапов – JCC-41



Точка входа паспортизации РАО – Q2



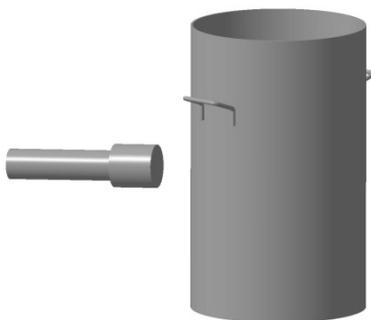
РАО

Скрап, отходы U

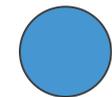


Производственные
участки

МКС-АТ6101



МКС-АТ1117М



Точка входа
переработки скрапов и
паспортизации РАО – Q2



МКС-АТ1315

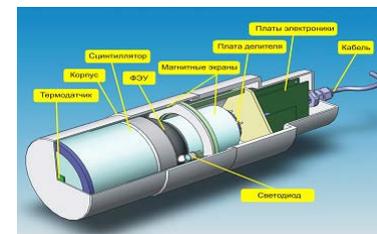


Определение эффективности регистрации

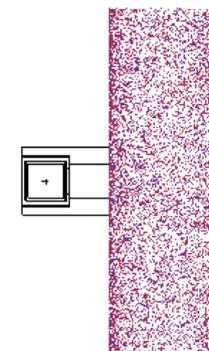
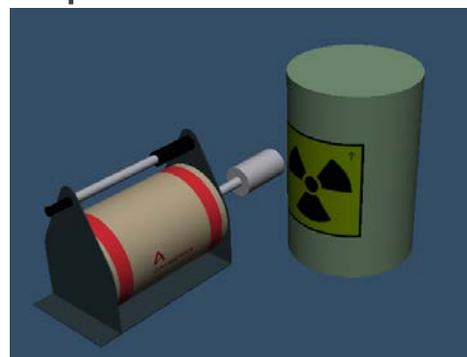
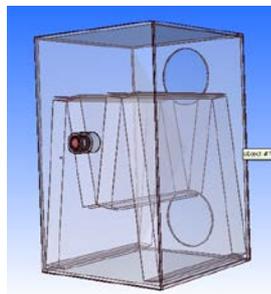
Радиометры
МКС-АТ 1117 М



Гамма-спектрометры
МКС-АТ6101



Проблема
создания
стандартных
образцов
отложений,
фильтров,
скрапа

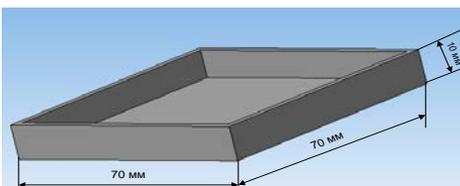
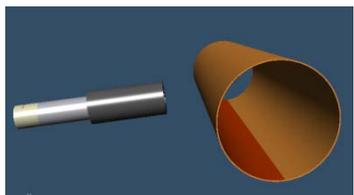
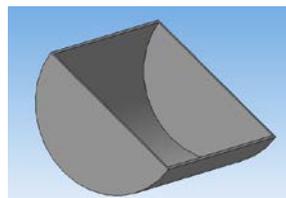
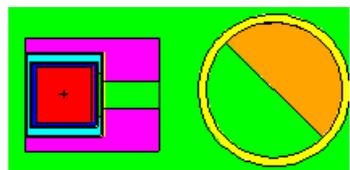


Расчетные коды: MCNP, Geant4 – расчет
эффективности регистрации детектора для
заданной геометрии

Проверка работоспособности расчетных моделей и оценки МХ МИ

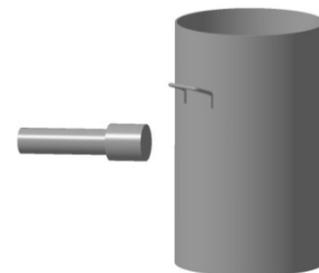


Отложения ЯМ

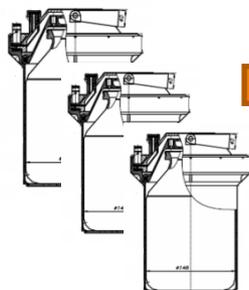
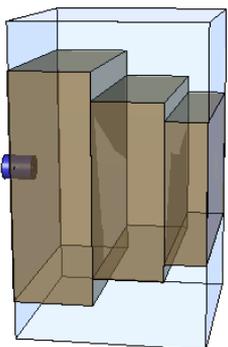


Модельные образцы

Скрап, отходы



Фильтры системы газоочистки



«Образцовая» МИ



«Образцовая» МИ

Характеристика плутония РТ-1



- Масса диоксида плутония от 1500 до 3300 г
- Параметр α (измеренное значение) изменяется от 1 (норма) до 8!!!
 - остатки неразложившегося оксалата и влага
 - Накопление влаги в среднем до 1,0 % по массе за 6÷7 лет. При хранении контейнеров боле 20 лет отмечен привес до 3,5%.
 - Содержание фтора с массовой долей от нескольких ppm до 3500 ppm
- Насыпная плотность порошков диоксида плутония изменяется от 1,3 до 2,8 г/см³
- Сложный изотопный состав
- Средний размер частиц изменяется от единиц мкм до 40 мкм, в среднем 7 мкм.
- Существующая технология изготовления диоксида плутония не всегда обеспечивает «одинаковость» физико-химических свойств плутония в контейнере (контейнер формируется с 3 прокалочных стаканов)
- Время выдержки контейнеров до 25 лет
- массовая доля ²⁴¹Am до 80 мг/гPu (при времени хранения более 25 лет)

Изотоп плутония	Диапазон массовой доли изотопа в плутонии, в %		
	«ВВЭР»	«БН»	«Смесь»
²³⁸ Pu	От 0,2 до 2,1	От 0,05 до 0,25	От 0,2 до 3,7
²³⁹ Pu	От 54,0 до 82,0	От 94,5 до 98,5	От 53,0 до 94,0
²⁴⁰ Pu	От 15,5 до 24,0	От 1,7 до 4,8	От 6,0 до 24,5
²⁴¹ Pu	От 2,0 до 11,5	От 0,03 до 0,5	От 0,8 до 11,5
²⁴² Pu	От 1,0 до 11,5	От 0,01 до 0,1	От 0,35 до 7,5

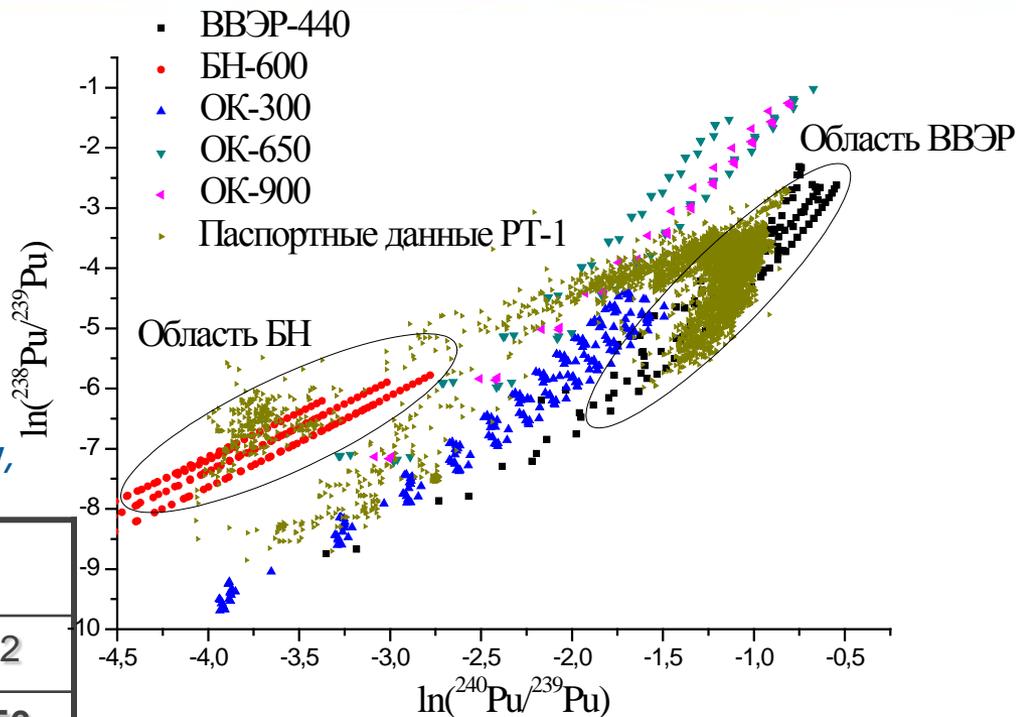
Характеристика плутония РТ-1 по изотопному составу



- ВВЭР-440
- БН-350, БН-600
- Транспортные реакторы
- Исследовательские реакторы
- Промышленные реакторы

Изотопные составы плутония ВВЭР-440 и БН-600 при различной глубине выгорания, МВт·сут/кгU

Изотоп Pu	ВВЭР-440		БН-600	
	8,7	54,8	17,2	83,2
^{238}Pu	0,14	3,45	0,032	0,256
^{239}Pu	83,90	46,98	99,02	94,93
^{240}Pu	11,84	23,83	0,94	4,65
^{241}Pu	3,76	15,28	7,9E-3	0,16
^{242}Pu	0,37	10,45	3,1E-5	3,8E-3



Abousahl S., Ottmar H. et.al. New Parameter Values of Isotope Correlations for the Estimate of ^{242}Pu . – Proc. of the 47th INMM Annual Meeting, 2006

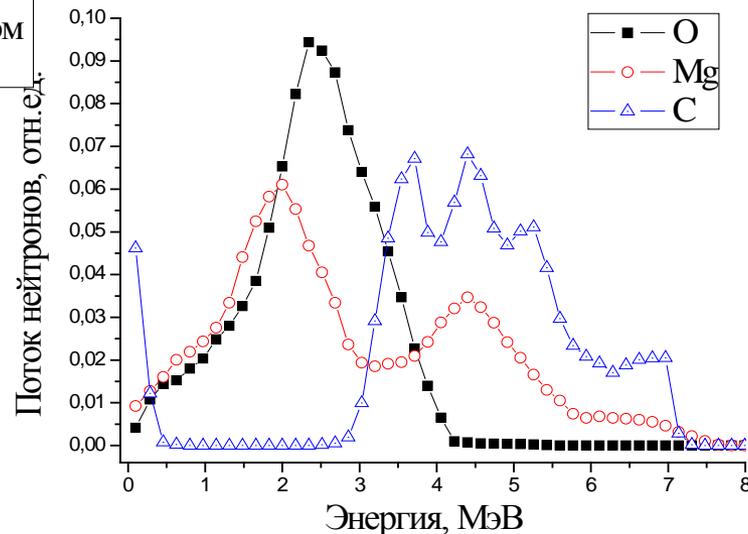
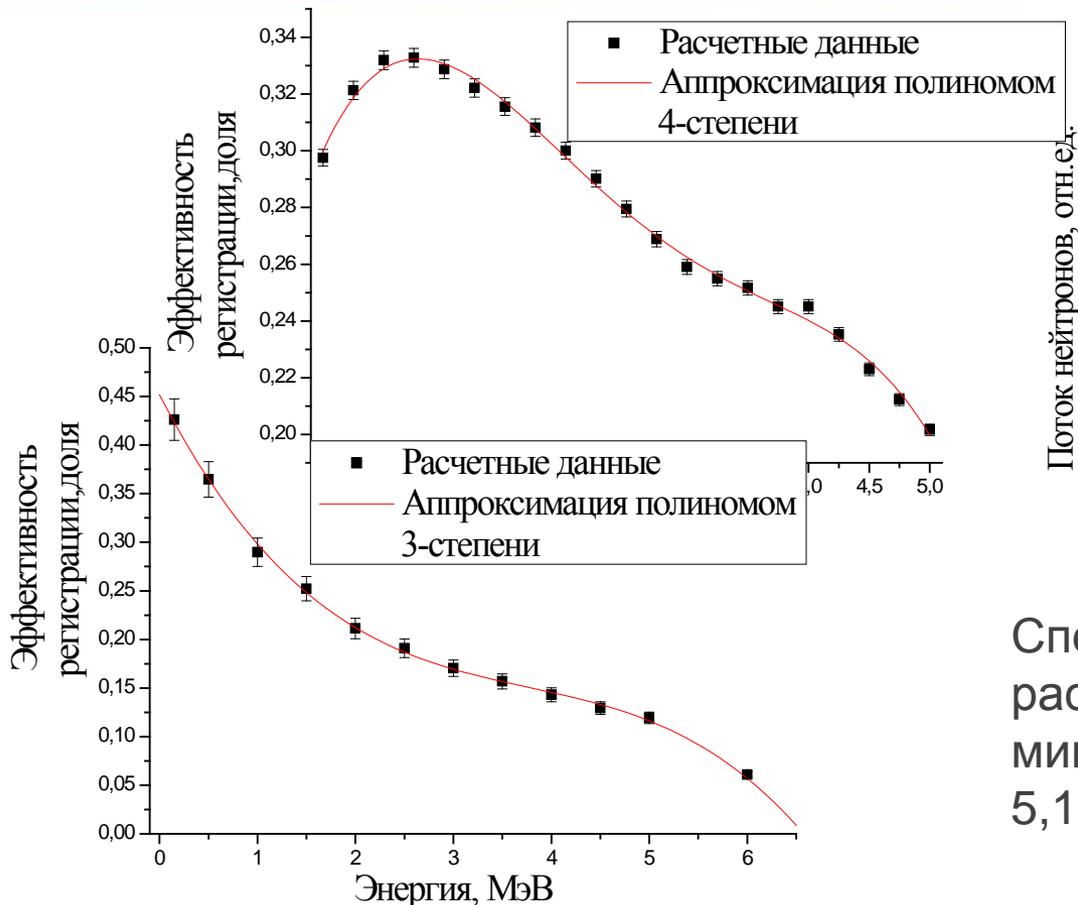
Характеристика скрапа



- Внутрикамерный контейнер объемом до 3,1 л
 - Иногда вместо внутрикамерного контейнера может быть пакет со скрапом, помещенный в транспортный контейнер
- Характеристика скрапа
 - массовая доля ^{239}Pu - более 0,95;
 - массовая доля плутония в скрапе - до 0,27;
 - масса плутония на один контейнер - до 800 г;
 - массовая доля ^{241}Am в плутонии - до 150 мг/гPu;
 - степень заполнения контейнера - от половины до полного;
 - контейнеры, объемом не более 5 дм³;
 - плотность - до 1,2 г/см³;
 - параметр α более 100
 - умножение не более 1,2



Расчетные методы



Спектры (α , n)-нейтронов на С, О, Mg, рассчитанные в приближении толстой мишени при энергии альфа-частиц 5,1 МэВ (NEDIS 2.0, ВНИИНМ)

Кривая эффективности регистрации нейтронного счётчика JCC-51 и JCC-41 для пассивного режима (MCNP, GEANT4)

Учет множественности вынужденного деления с учетом спектра нейтронов



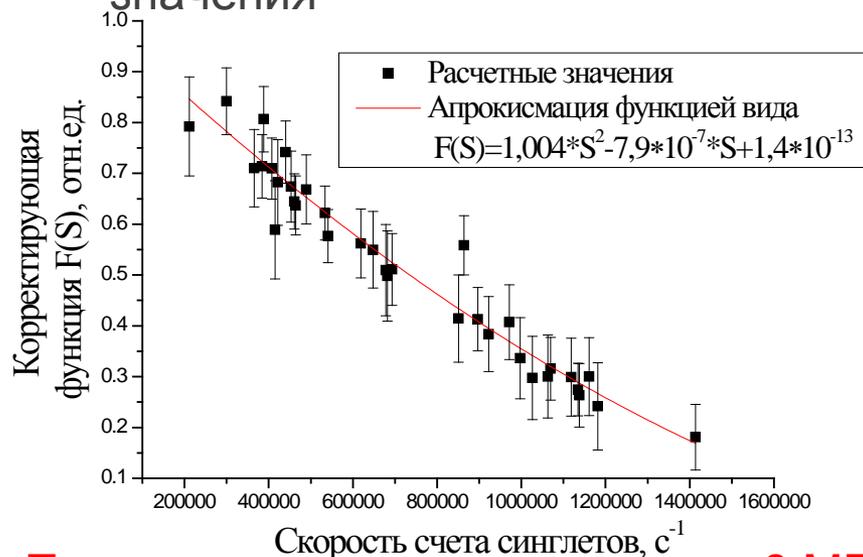
$$\sum_{n=0}^{\nu} P_n = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{(\nu - \nu_{i1} - 0,5 + b) / \sigma} \exp(-t^2 / 2) dt$$

Вариант расчёта	ν_{i1}	ν_{i2}	ν_{i3}
Рекомендованные значения для ^{239}Pu	3,163	8,240	17,321
Изотопный состав плутония «Низкофонный» или «БН»	3,163	8,240	17,321
Скрап: окись магния α от 1 до 10	3,217 - 3,300	8,566 - 9,038	18,330- 19,992
Скрап: зола α от 1 до 10	3,219 - 3,496	8,579 - 9,555	18,376- 21,878
Диоксид плутония. Плутоний с содержанием ^{239}Pu более 70%.	3,161	8,235	17,318
Диоксид плутония. Плутоний с содержанием ^{239}Pu менее 60%	3,190	8,335	17,564
Диоксид плутония. Плутоний БН с содержанием фтора 2000 ppm	3,091	8,131	16,914
«Высокофонный» плутоний с содержанием ^{239}Pu менее 60% и содержанием фтора 2000 ppm	3,090	8,062	16,712

Высокие входные загрузки и высокие значения параметра α при измерениях методом множественности



- Высокая случайная погрешность измерения скорости счёта триплетов
 - - случайная составляющая погрешности и систематическое смещение может быть уменьшено за счёт увеличения времени измерения одного цикла и/или количества циклов измерения
 - - независимо от количества циклов и времени измерения (за разумное время измерения, например, смена) триплеты могут принимать отрицательные значения



Предельная нагрузка по входу ~ 8 МГц

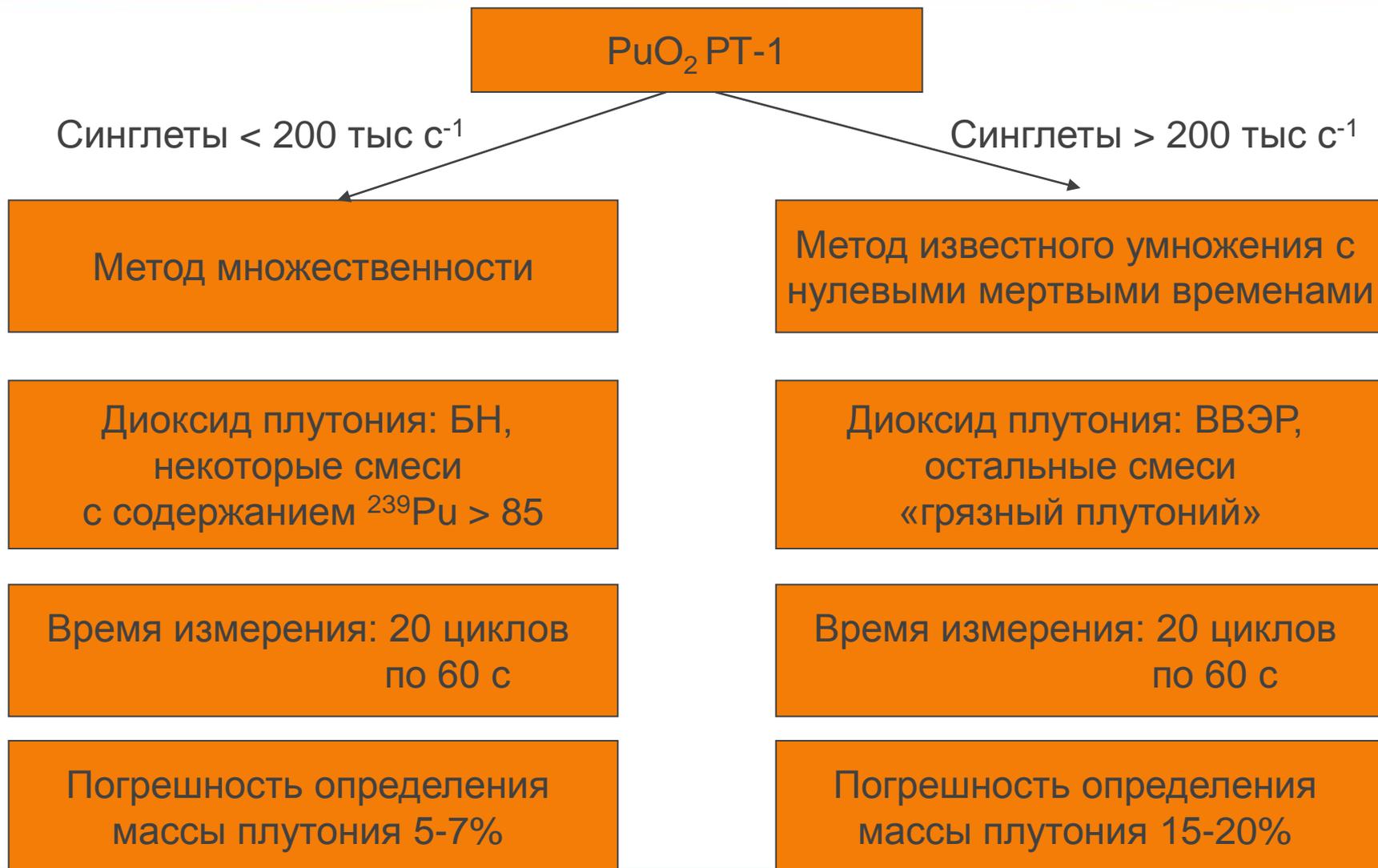
(скорость счета S – 1,9 млн. c^{-1} , эффективность регистрации 0,244)

Способ вычисления умножения утечки нейтронов (с пошаговым усечением множества «не худших решений») методом ограничений

$$M_L = 1$$

$$M_L^{(\alpha \rightarrow \infty)} = 0,5 + \sqrt{0,25 + 2 \cdot \frac{D}{S} \cdot \frac{(v_{i1} - 1)}{\varepsilon \cdot f_d \cdot v_{i2}}}$$

Разделение PuO_2 в зависимости от метода



Характеристика погрешности методик измерений массы плутония в скрапе и диоксиде плутония (грязном)



Материал	Диапазон массы плутония, г	Диапазон скоростей счёта синглетов, с ⁻¹	Случайная составляющая погрешности, %	НСП, %	
				Метод «множественности»	Метод «известное умножение»
PuO ₂	1700-2900	Менее 0,2·10 ⁶	До ± 13	± 9	-
		0,2·10 ⁶ – 1,4·10 ⁶		-	± 18
Скрап	5-1000	Менее 0,2·10 ⁶		От ± 13 до ± 26 в зависимости от значения $(M_L^{\text{Calc}} - 1) \cdot \alpha^{\text{Calc}}$	± 15

Способ «не худших решений» проводится оценка метрологических характеристик



Координация и утверждение



РГАМО

Информационная, техническая и методическая поддержка



ООИ Ростехнадзор



Поставка оборудования



ATOMTEX®

Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля