

ИБРАЭ

# Метод расчёта эволюции активности радионуклидов в радиоактивных отходах с использованием актуальных ядерных данных

Выполнил: Асланин Степан Алексеевич, студент группы Б22-104  
НИЯУ МИФИ, сотрудник ИБРАЭ РАН

Москва, 2026 год

# Актуальность



Паспорт партии РАО обычно содержит только начальные активности радионуклидов. Ветвящиеся цепочки распада и дочерние продукты деления часто не учтены — это ведёт к занижению прогнозируемой активности партии РАО и ошибкам в обращении с радиоактивными отходами.



## Информация в паспорте

Только начальные значения активности исходных нуклидов



## Реальная картина

Включает дочерние продукты распада и ветвления - выше риски

Общая характеристика упаковки (партии) РАО

Состав упаковки РАО					Габариты упаковки РАО, мм				Масса, кг / Объем, куб. м		Мощность дозы излучения, мкЗв/ч на расстоянии от поверхности, м*		Уровень нефиксированного загрязнения, частиц/(мин*см2)*	Тепловыделение, Вт/м3, Вт/упаковку		
Способ размещения отходов	Количество и характеристики первичных упаковок				Наличие и вид матричного материала	Дата заполнения отходами	Диаметр	Высота	Длина	Ширина	Упаковки (партии) РАО	РАО в упаковке			0,1	1
	тип и номер	кол-во, шт	объем, м3	масса с отходами, кг									14	15	16	17
навал	-	-	-	-	-	-	-	1340	1650	1650	6750/3,65	3350/1,9	47,3	5,1	альфа - 0; бета/гамма - 40	отсутствует

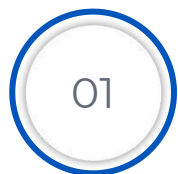
Характеристика радиоактивного содержимого упаковки (партии) РАО

Индивидуальный номер упаковки (первичной упаковки) или партии	Класс и код РАО	Физико-химическая форма РАО, тип матричного материала**	Морфологический (химический) состав**	Горючесть	Радио нуклидный состав***	Удельная активность, кБк/кг***	Суммарные удельные активности, кБк/кг		Общая активность, кБк	Содержание ядерно-опасных делящихся нуклидов, кБк/кг, мг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8		9	10
№1600 (11601407001)	4 / 2041220493	твердые	металлические отходы	негорючие и трудногорючие	Cs-137	1,41E+02	долгоживущие	0,00E+00	6,99E+05	0,00E+00
					Sr-90	4,77E+01	трансурановые	0,00E+00		
					Co-60	2,71E+00	α-изл. (без тр./у)	0,00E+00		
					Eu-154	8,87E+00	β/γ-излучающие	2,09E+02		
					Eu-152	8,30E+00	третий	0,00E+00		



# Численный метод решения системы

Неявный метод Рунге-Кутты семейства Радау 5-го порядка (встроен в модуль `scipy.integrate` библиотеки SciPy, Python 3.14.3)



**Жесткая система**



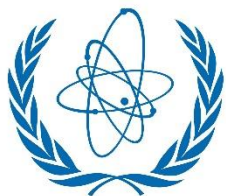
**Параметры**

Периоды полураспада  $T_{1/2}$  отличаются на десятки порядков, например:  
 Bi-212 ( $T_{1/2} = 60.55$  мин);  
 Po-212 ( $T_{1/2} = 294.3$  нс)

Относительная погрешность  $R_{tol} = 10^{-6}$   
 Абсолютная погрешность  $A_{tol} = 10^{-12}$



# Ядерные данные через API МАГАТЭ



IAEA

International Atomic Energy Agency

Открытый API МАГАТЭ – Live Chart of Nuclides

1

Что получаем:

1. Периоды полураспада;
2. Типы распада ( $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ );
3. Вероятности ветвления;
4. Дочерние нуклиды

2

Как используем:

1. Строим дерево распада;
2. Устраняем дублирование данных
3. Нормализуем вероятности
4. Формируем список

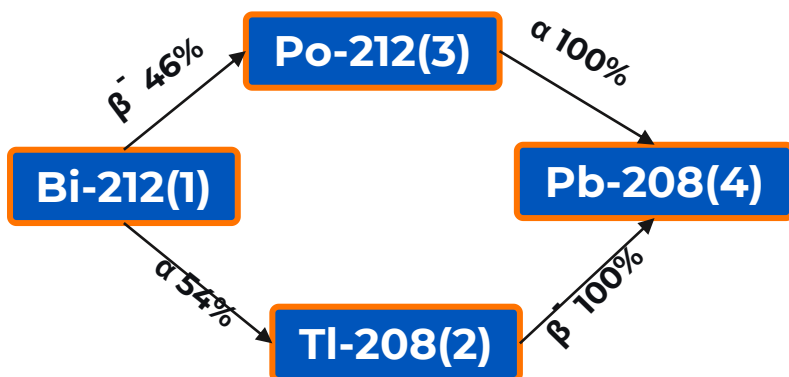
```
url = f"https://nds.iaea.org/relnsd/v1/data?fields=decay_rads&nuclides={api_name}&rad_types={rtype}"
```

Запрос для извлечения списка дочерних нуклидов и долей распадов01

```
url = f"https://nds.iaea.org/relnsd/v1/data?fields=ground_states&nuclides={api_name}"
```

Запрос для получения периода полураспада нуклида в основном состоянии1

# Пример расчета: цепочка для Bi-212



## Аналитическое решение уравнений:

$$\text{Bi-212: } A_1(t) = A_1(0)e^{-\lambda_1 t} = 5,176 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}$$

$$\text{Tl-208 } (\lambda_1 < \lambda_2, \text{ подвижное равновесие}): A_2(t) = A_1(0) f_{12} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} = 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}$$

$$\text{Po-212 } (\lambda_1 \ll \lambda_3, \text{ вековое равновесие}): A_3(t) = A_1(0) f_{13} e^{-\lambda_1 t} = 2,38 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}$$

## Программный расчет:

Условия:  $A_0(\text{Bi-212}) = 1000 \text{ Бк}$ ,  $t = 100000 \text{ сек}$

Нуклид	Активность, Бк
Bi-212	$5,180 \cdot 10^{-6}$
Po-212	$2,382 \cdot 10^{-6}$
Tl-208	$2,943 \cdot 10^{-6}$
Pb-208(стабильный)	$3,630 \cdot 10^{-24}$

**Вывод:** программа корректно моделирует ветвящиеся цепочки с большим разбросом периодов полураспада, погрешность не превышает 1%.

# Выводы и внедрение



## Верификация

Численный метод подтверждён аналитическим предельным значением для переходного и векового равновесий.

## Особенности метода

Учитывает ветвления и актуальные ядерные данные, устойчив для жестких систем, способен одновременно обрабатывать большой набор начальных нуклидов.

## Интеграция

Алгоритм интегрируется в информационно-аналитическую систему (ИАС РАО) для поддержки решений по обращению с радиоактивными отходами.



## Планы:

- учет изомерных состояний;
- интеграция с форматом паспорта РАО;
- разработка графического интерфейса;
- анализ неопределенностей при параллельных вычислениях для больших цепочек распада.



**Спасибо за  
внимание!**

[stepanaslanin2@gmail.com](mailto:stepanaslanin2@gmail.com)

+7-982-584-56-73

Москва, 2026 год

