

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 радиоактивносодержимого упаковки (партии) РАО

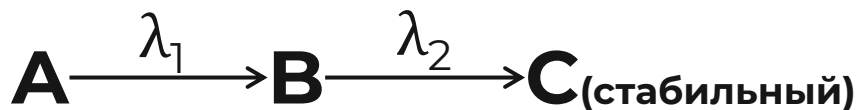
Индивидуальный номер упаковки (первичной упаковки) или партии	Класс и код РАО	Физико-химическая форма РАО, тип матричного материала**	Морфологический (химический) состав**	Горючесть	Радио нуклидный состав***	Удельная активность, кБк/кг***	Суммарные удельные активности, кБк/кг		Общая активность, кБк	Содержание 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		

# Нуклидная кинетика – уравнения Бейтмана

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Основной закон радиоактивного распада, где  $N$  - количество нераспавшихся ядер на момент времени  $t$ ,  $N_0$  - начальное количество ядер,  $\lambda$  - постоянная распада

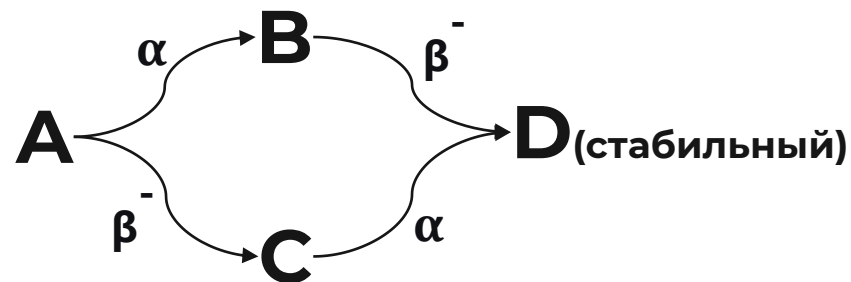
Простейшая цепочка последовательных превращений



$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \sum \lambda_{j \rightarrow i} N_j$$

Система дифференциальных уравнений Бейтмана, здесь  $N_i$  - число атомов  $i$ -того нуклида, слагаемое с минусом - убыль за счет распада, слагаемое с плюсом - прибыль за счет поступления при распаде  $j$ -го нуклида в  $i$ -тый

**i** Так как возможны ветвления, то  $\lambda_{j \rightarrow i} = f_{ji} \lambda_j$ , где  $f_{ji}$  - вероятность распада по заданной ветке



# 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**



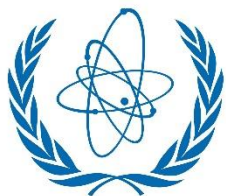
**Параметры**

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  $A_{tol} = 10^{-12}$



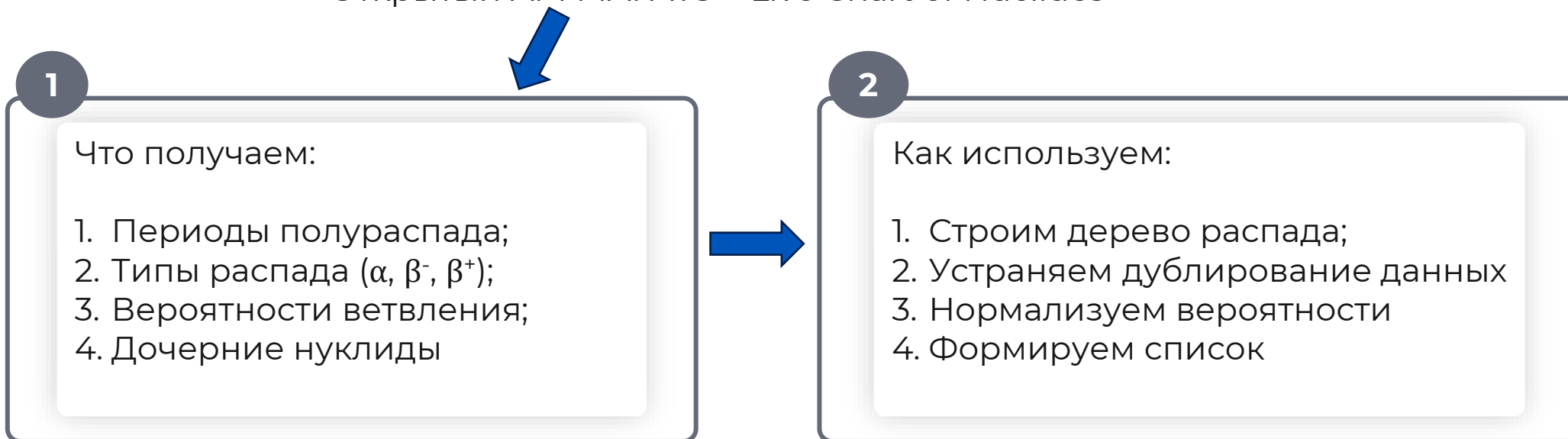
# Ядерные данные через API МАГАТЭ



**IAEA**

International Atomic Energy Agency

Открытый API МАГАТЭ – Live Chart of Nuclides



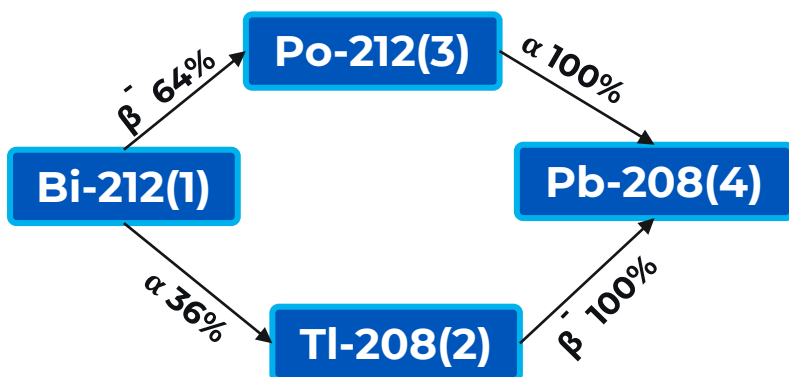
```
url = f"https://nds.iaea.org/relnsd/v1/data?fields=decay_rads&nuclides={api_name}&rad_types={rtype}"
```

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 Вi-212



## Аналитическое решение уравнений:

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

$$\text{Tl-208} (\lambda_1 < \lambda_2, \text{ подвижное равновесие}): A_2(t) = A_1(0) f_{12} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} = 1,959 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}$$

$$\text{Po-212} (\lambda_1 \ll \lambda_3, \text{ вековое равновесие}): A_3(t) = A_1(0) f_{13} e^{-\lambda_1 t} = 3,316 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}$$

## Программный расчет:

Условия:  $A_0(\text{Bi-212}) = 10000 \text{ Бк}$ ,  $t = 100000 \text{ сек}$

Нуклид	Активность, Бк
Bi-212	$5,176 \cdot 10^{-6}$
Po-212	$3,316 \cdot 10^{-6}$
Tl-208	$1,959 \cdot 10^{-6}$
Pb-208(стабильный)	$3,630 \cdot 10^{-24}$

**Вывод:** программа корректно моделирует ветвящиеся цепочки с большим разбросом периодов полураспада, погрешность не превышает 0,1%.

# Верификация на длинной цепочке Th-228

- Численное
- Аналитическое

## Начальные данные:

$A_0(\text{Th-228}) = 1000 \text{ Бк}$ ,  $t_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ сек}$ ,  $t_2 = 1 \cdot 10^7 \text{ сек}$

Нуклид	$A_1, \text{ Бк}$	$A_1, \text{ Бк}$	$A_2, \text{ Бк}$	$A_2, \text{ Бк}$
Th-228	966,116	966,116	891,452	891,452
Ra-224	969,837	969,837	896,113	896,113
Rn-220	969,838	969,838	896,114	896,114
Po-216	969,838	969,838	896,114	896,114
Pb-212	970,269	970,269	896,682	896,682
Bi-212	970,310	970,310	896,736	896,736
Po-212	621,580	621,580	574,450	574,450
Tl-208	348,730	348,730	322,288	322,288
Pb-208	$1,699 \cdot 10^{-21}$	0	$6,229 \cdot 10^{-21}$	0

Th-228 ( $6,03 \cdot 10^7$ )

$\alpha$  100%

Ra-224 ( $3,14 \cdot 10^5$ )

$\alpha$  100%

Rn-220 (55,6)

$\alpha$  100%

Po-216 (0,145)

$\alpha$  100%

Pb-212 ( $3,82 \cdot 10^4$ )

$\beta^-$  100%

Bi-212 (3633)

$\alpha$  36%

$\beta^-$  64%

Tl-208 (183,2)

Po-212 ( $2,94 \cdot 10^{-7}$ )

$\beta^-$  100%

$\alpha$  100%

Pb-208 (стаб.)

**Результат:** программа успешно моделирует длинную ветвящуюся цепочку распада, воспроизводя подвижное и вековое равновесия для всех нуклидов с относительной погрешностью, не превышающей 0,1 %



## Верификация

Численный метод подтверждён расчетом по аналитическим формулам для переходного и векового равновесий на нескольких цепочках распада.

## Особенности метода

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

## Интеграция

Разработанный алгоритм внедрен в ИАС «Компас» как инструмент поддержки принятия стратегических решений по обращению с РАО.



## 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