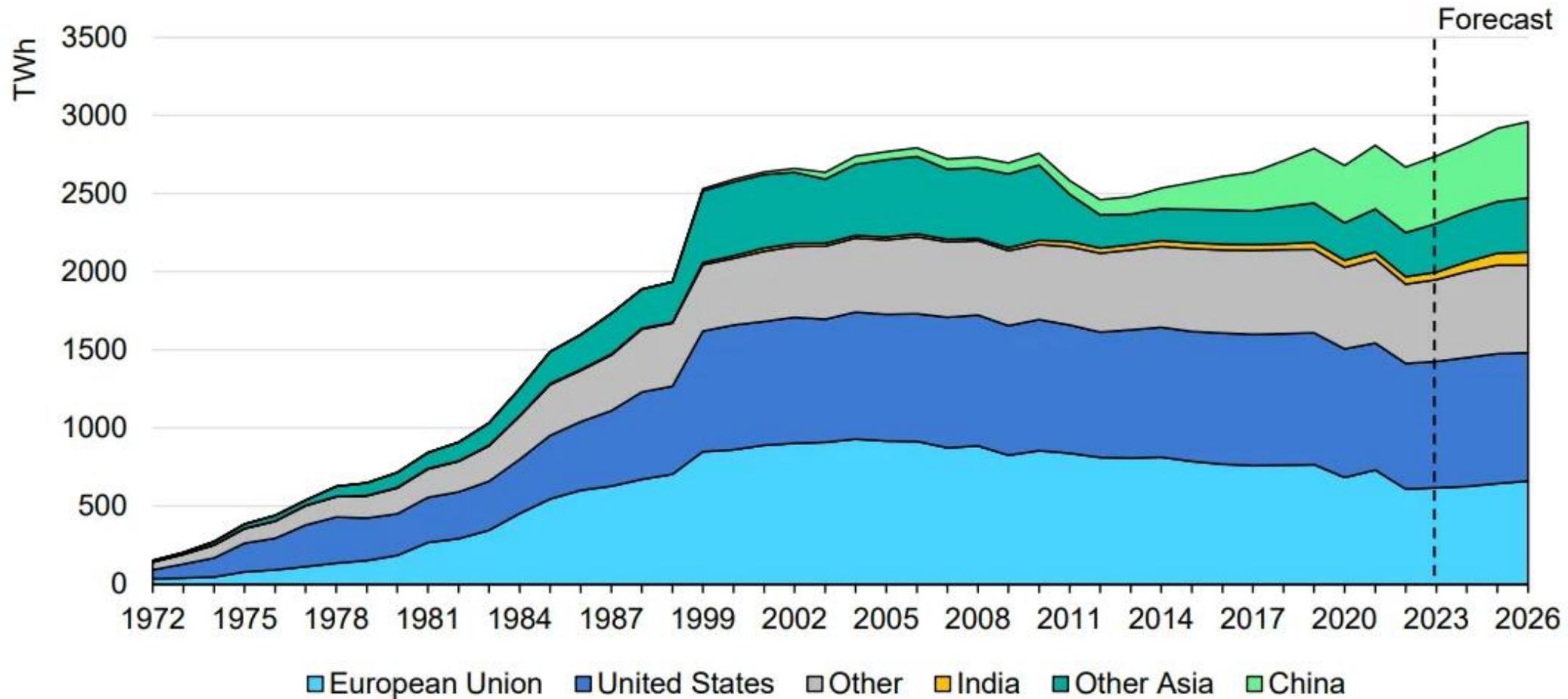


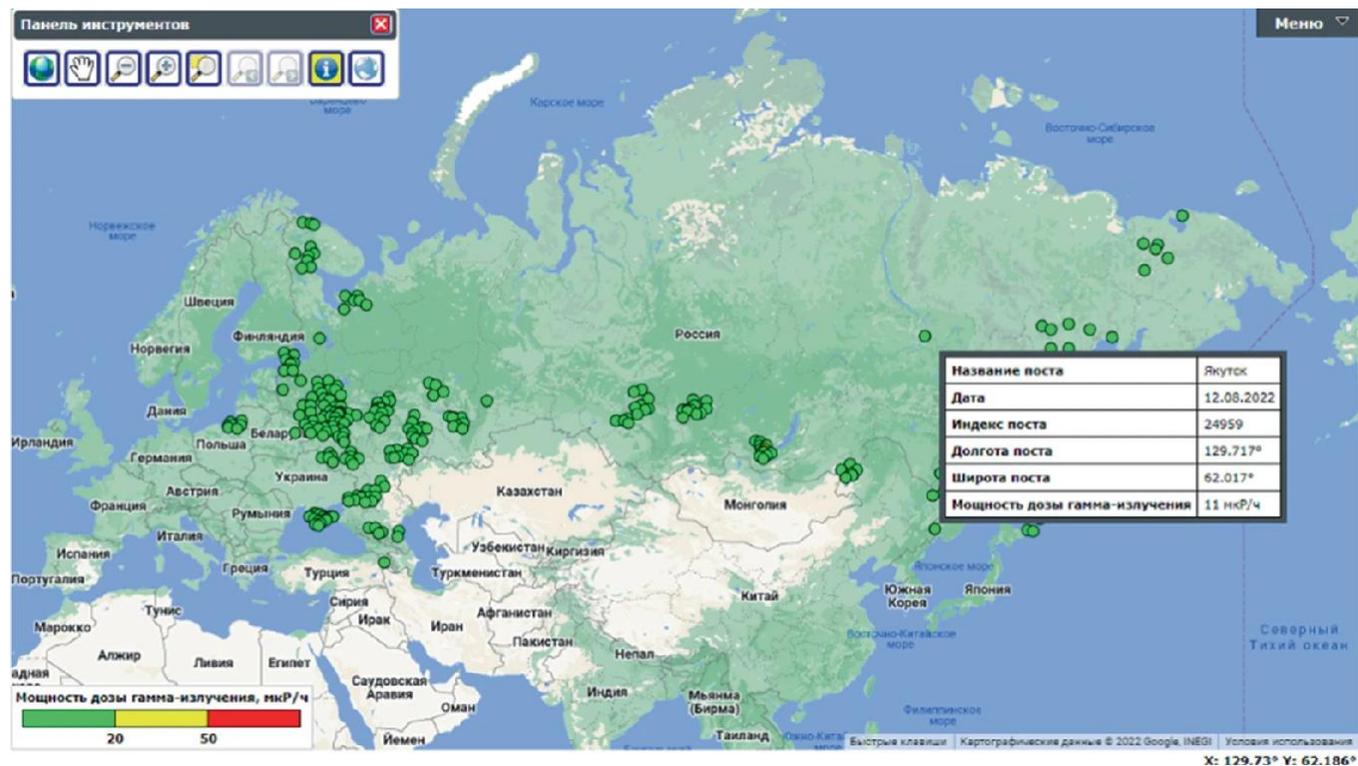
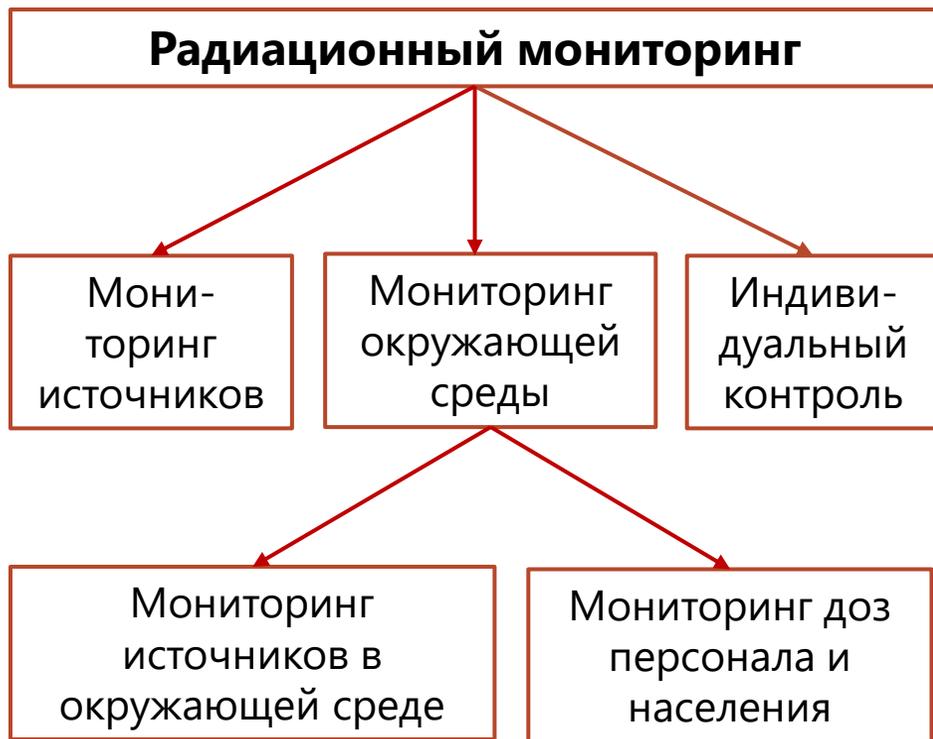
Развитие неразрушающих методов радиационного мониторинга

ЖЕЛТОНОЖСКАЯ М.В.

Эволюция атомной генерации по регионам



Система радиационного мониторинга



Радиационный мониторинг АЭС: эксплуатационные отходы

В среднем каждый год один энергоблок ВВЭР-1000 производит твердых радиоактивных отходов (ТРО):

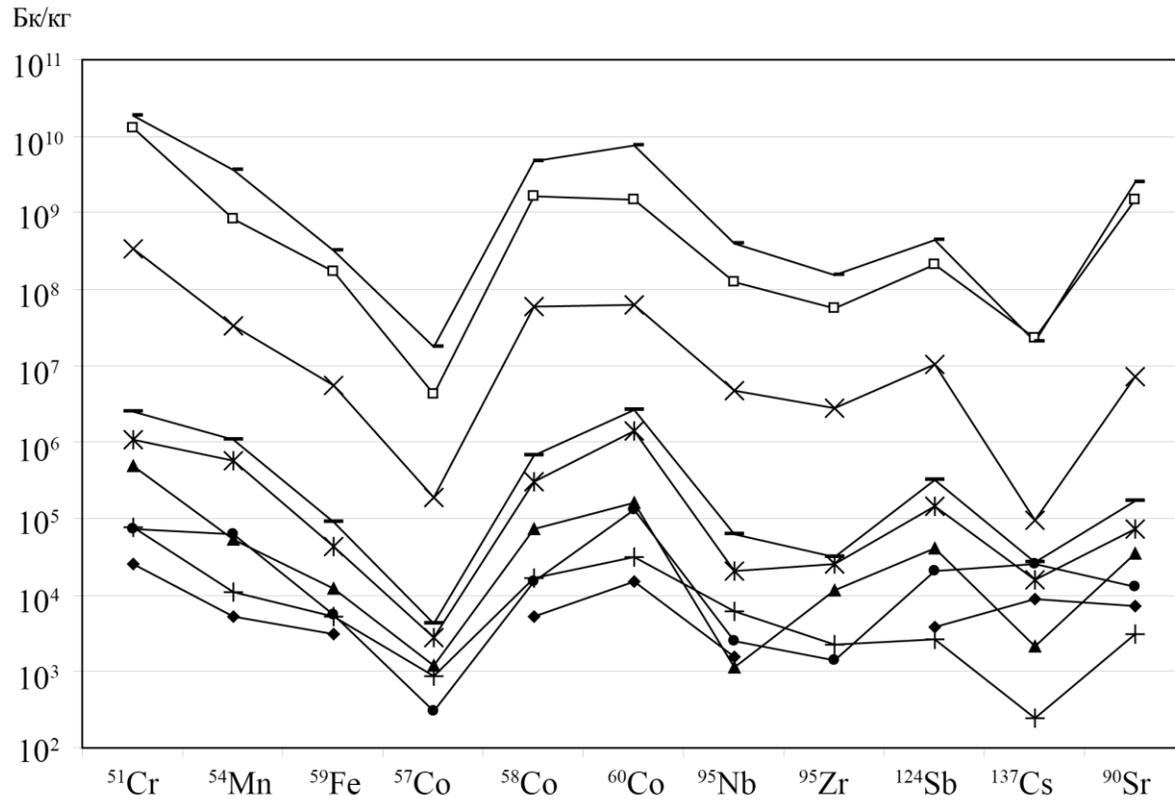
- низкоактивных (1 мкЗв/ч-300 мкЗв/ч) **230 м³**
- среднеактивных (0,3 мЗв/ч-10 мЗв/ч) **55 м³**
- высокоактивных (> 10 мЗв/ч) **0,5 м³**

После переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на установках спецводоочистки образуется до 50 тонн солей в год в виде радиоактивных высокоминерализированных растворов с солесодержанием 200-300 г/л. Также к ЖРО относятся отработавшие ионообменные материалы и сорбенты.

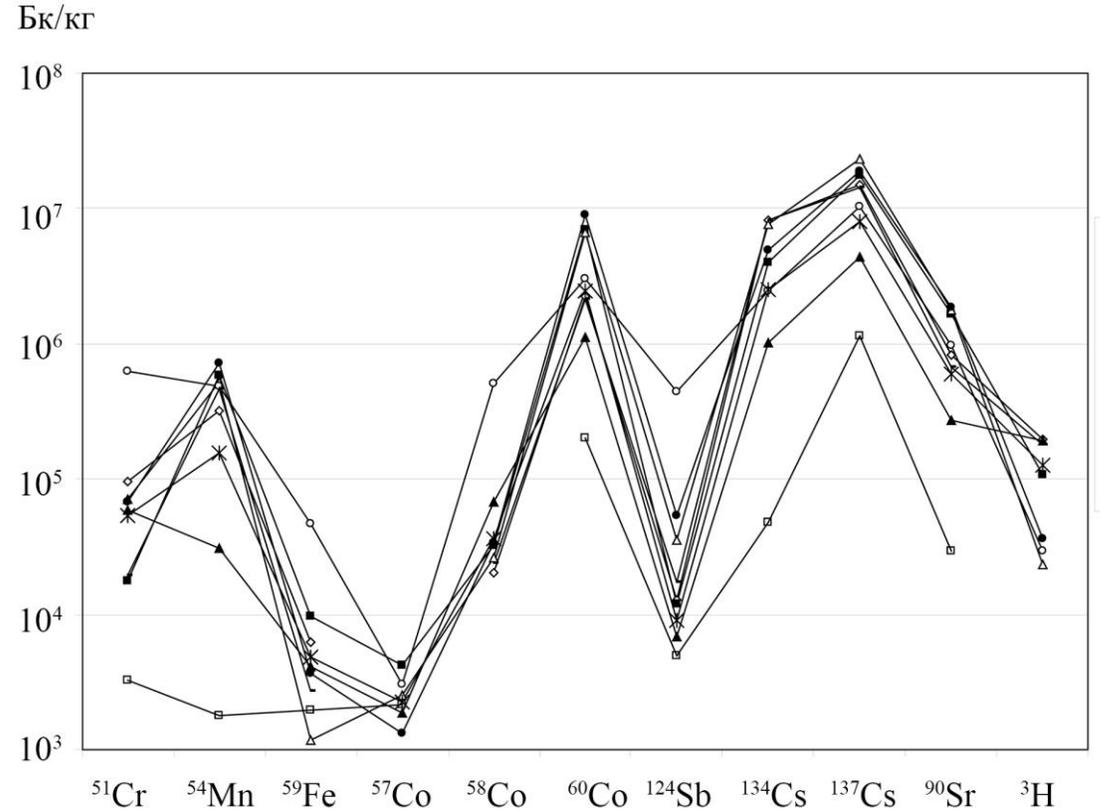


Радиационный мониторинг АЭС: эксплуатационные отходы

Твердые РАО



Жидкие РАО



Радиационный мониторинг АЭС: облученные конструкционные материалы

В мире:

около **200** энергетических реакторов и более **500** исследовательских реакторов и установок ядерного топливного цикла находятся в процессе вывода из эксплуатации.

В России энергоблоки на этапе вывода из эксплуатации:

Блок №1 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-210)

Блок №2 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-365)

Блок №3 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-440)

Блок №1 Белоярской АЭС (АМБ-100)

Блок №2 Белоярской АЭС (АМБ-200)

Блок №1 Ленинградской АЭС (РБМК-1000)

Блок №2 Ленинградской АЭС (РБМК-1000)

Блок №1 Курской АЭС (РБМК-1000)

Блок №2 Курской АЭС (РБМК-1000)

Блок №1 Билибинской АЭС (ЭГП-6)

Радиационный мониторинг АЭС: облученные конструкционные материалы

Радио-нуклид	Период полураспада, лет	Исходное ядро	Ядерная реакция
^3H	12,3	^6Li	n, α
		^2H	n, γ
		U	$n, 3f$
^{10}Be	$1,6 \times 10^6$	^9Be	n, γ
		^{10}B	n, p
^{14}C	$5,7 \times 10^3$	^{13}C	n, γ
		^{14}N	(n, p)
		^{17}O	(n, α)
^{36}Cl	$3,01 \times 10^5$	^{35}Cl	(n, γ)
^{41}Ca	$1,03 \times 10^6$	^{40}Ca	(n, γ)
^{53}Mn	$3,7 \times 10^6$	^{54}Fe	(n, d)
^{55}Fe	2,7	^{54}Fe	(n, γ)
^{59}Ni	8×10^4	^{58}Ni	(n, γ)
^{60}Co	5,3	^{59}Co	(n, γ)
^{63}Ni	100	^{62}Ni	(n, γ)
		^{62}Cu	(n, p)
		^{85}Rb	(n, p)

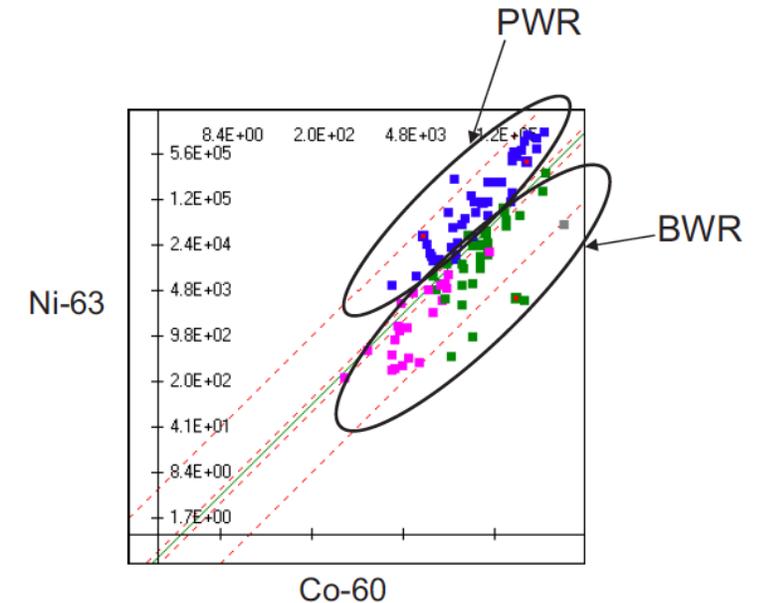
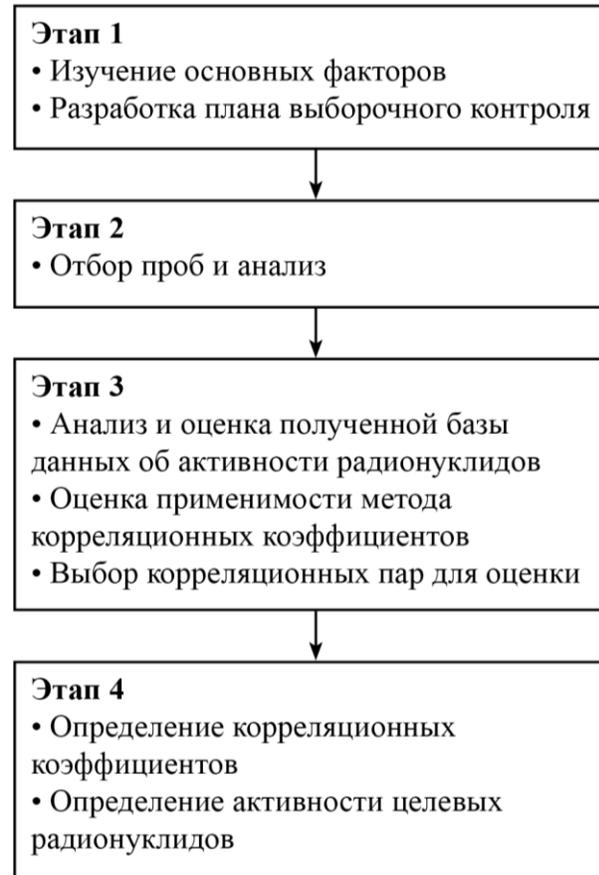
Радио-нуклид	Период полураспада, лет	Исходное ядро	Ядерная реакция
^{90}Sr	29	U	(n, f)
^{93}Zr	$9,5 \times 10^5$	^{92}Zr	(n, γ)
		U	(n, f)
^{93}Mo	$3,5 \times 10^3$	^{92}Mo	(n, γ)
^{94}Nb	2×10^4	^{93}Nb	(n, γ)
		^{94}Mo	(n, p)
^{97}Tc	$2,6 \times 10^6$	Ru	(n, γ)
^{99}Tc	$2,13 \times 10^5$	Mo	(n, γ)
		U	(n, f)
^{133}Ba	10,4	Ba	(n, p)
		U	(n, f)
^{137}Cs	30,1	^{137}Ba	(n, p)
		U	(n, f)
^{154}Eu	8,6	Eu	(n, γ)
^{155}Eu	4,7	Eu	(n, γ)

И трансураниевые нуклиды.

Существующие методы определения долгоживущих радиоизотопов в облученных конструкционных материалах АЭС

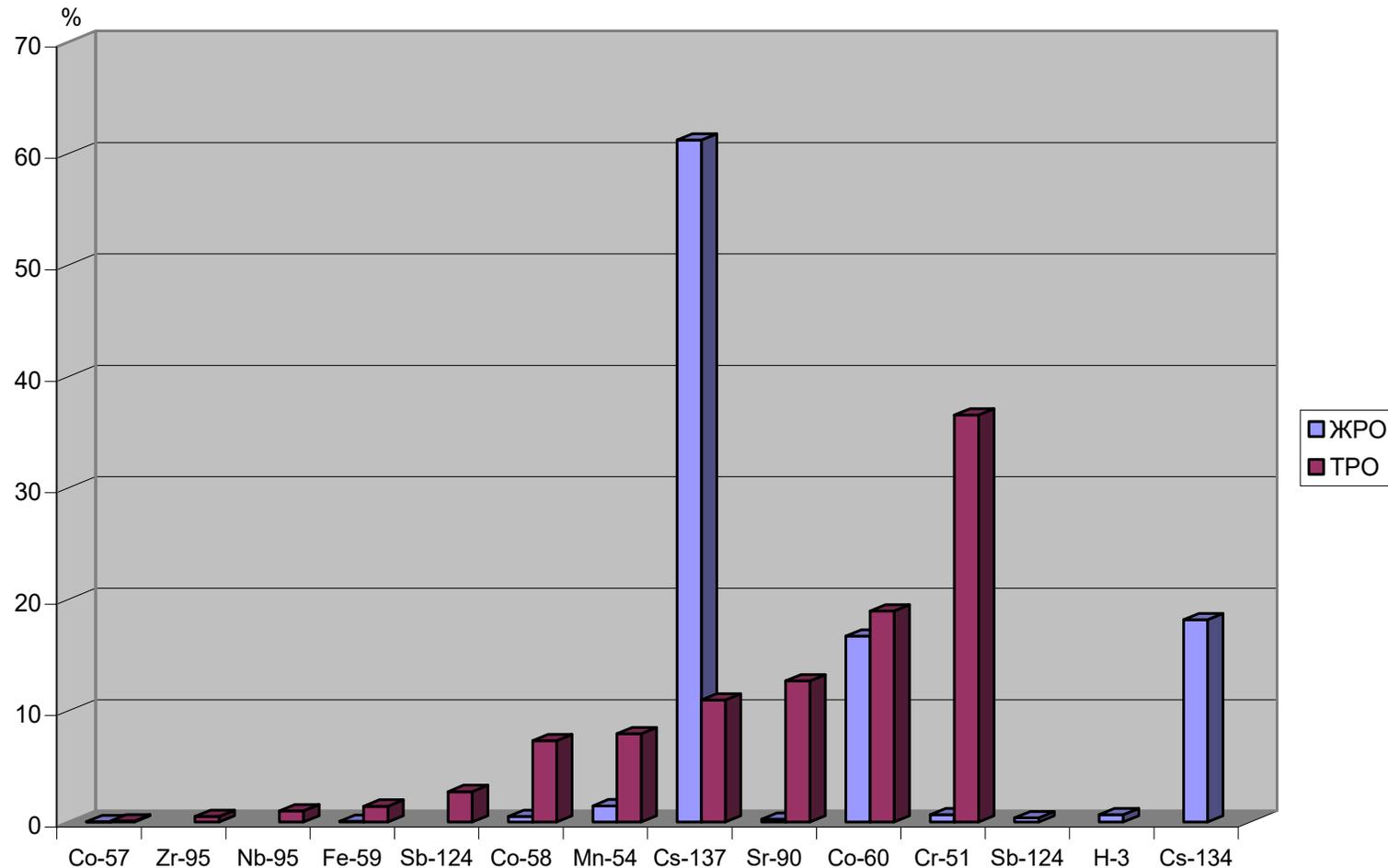
- **Радиохимические методы**
- Атомно-эмиссионный метод с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES)
- Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS)
- Атомно-абсорбционная спектрометрия с электротермической атомизацией в графитовой кювете (GFAAS)
- Метод атомной флуоресценции

- Метод корреляционных коэффициентов



Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Сравнительный анализ изотопного состава твердых и жидких радиоактивных отходов



Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

При наработке определяемого радионуклида ${}_{M+1}^Z X$ и ${}^{60}\text{Co}$ в облученных материалах реактора, в первую очередь, происходят следующие реакции: ${}_{M+1}^Z X(n, \gamma) {}_{M+1}^Z X$, ${}^{59}\text{Co}(n, \gamma) {}^{60}\text{Co}$, для которых можно записать следующие уравнения активации:

$$A_{M+1}^Z X = N_{M+1}^Z X (1 - e^{-\lambda_{M+1}^Z X t_{\text{оп}}}) e^{-\lambda_{M+1}^Z X t_{\text{п}}} \sigma_{M+1}^{n*} \Phi_{n*}, \quad A_{60\text{Co}} = N_{59\text{Co}} (1 - e^{-\lambda_{60\text{Co}} t_{\text{оп}}}) e^{-\lambda_{60\text{Co}} t_{\text{п}}} \sigma_{59\text{Co}}^{n*} \Phi_{n*}$$

где A_i – активность i -ого изотопа (Бк); где Φ_{n*} – поток нейтронов в реакторе ($\text{н/см}^2 \text{с}^{-1}$); σ_{M+1}^{n*} и $\sigma_{59\text{Co}}^{n*}$ – сечения реакций ${}_{M+1}^Z X(n, \gamma) {}_{M+1}^Z X$ и ${}^{59}\text{Co}(n, \gamma) {}^{60}\text{Co}$ для нейтронов деления (бн), N_i – количество ядер i -ого изотопа в образце до активации; $\lambda_{M+1}^Z X$ и $\lambda_{60\text{Co}}$ – постоянные распада исследуемого радиоизотопа ${}_{M+1}^Z X$ и ${}^{60}\text{Co}$ (с^{-1}); $t_{\text{оп}}$ и $t_{\text{п}}$ – время работы и время остановки реактора соответственно (с).

В эпитепловой области сечения захвата нейтронов обратно пропорциональны скорости нейтронов и для «реакторных» тепловых нейтронов выполняется соотношение:

$$\sigma^{n*} \sim \frac{\sigma^n}{\sqrt{E}}$$

Где σ^{n*} – сечение (n, γ) реакции для «реакторных» тепловых нейтронов (бн); σ^n – сечение сечение (n, γ) реакции для стандартизованных тепловых нейтронов с энергией 0.025 эВ (бн); E – энергия нейтронов (эВ).

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

$$\frac{A_{M+1}^{Z X}}{A_{60}^{60\text{Co}}} = \frac{N_{M}^{Z X} (1 - e^{-\lambda_{M+1}^{Z X} t_{\text{оп}}}) e^{-\lambda_{M+1}^{Z X} t_{\text{п}}} \sigma_{M}^{n Z X}}{N_{59}^{60\text{Co}} (1 - e^{-\lambda_{60}^{60\text{Co}} t_{\text{оп}}}) e^{-\lambda_{60}^{60\text{Co}} t_{\text{п}}} \sigma_{59}^{n 60\text{Co}}}$$

С учетом небольшого периода полураспада ^{60}Co и в случае очень большого периода полураспада целевого радионуклида, это выражение может быть дополнительно упрощено:

$$A_{M+1}^{Z X} = A_{60}^{60\text{Co}} \left[\frac{N_{M}^{Z X}}{N_{59}^{60\text{Co}}} \right] \frac{\lambda_{M+1}^{Z X} t_{\text{оп}} \sigma_{M}^{n Z X}}{\sigma_{59}^{n 60\text{Co}}}$$

Неизвестное первичное соотношение предлагается определять с использованием фотоактивационного анализа и использовать реакции $^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$ и



$$\frac{A_{M-1}^{Z X}}{A_{58}^{58\text{Co}}} = \left[\frac{N_{M}^{Z X}}{N_{59}^{60\text{Co}}} \right] \frac{(1 - e^{-\lambda_{M-1}^{Z X} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{M-1}^{Z X} t_{\text{п}}^y} Y_{M}^{Z X}}{(1 - e^{-\lambda_{58}^{58\text{Co}} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{58}^{58\text{Co}} t_{\text{п}}^y} Y_{59}^{58\text{Co}}}$$

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Для определения активности долгоживущих радиоизотопов ^{36}Cl , ^{41}Ca , $^{59,63}\text{Ni}$, ^{93}Mo , ^{93}Zr в облученных конструкционных материалах реакторов относительно активности ^{60}Co предлагается использовать следующие реакции:

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада (энергия излучения)	Предлагаемая реакция	E_n , МэВ	Продукт реакции ($T_{1/2}$)	Энергия γ -излучения
^{36}Cl	3×10^5 лет	β^- (0,7 МэВ)	$^{35}\text{Cl}(\gamma, n)^{34m}\text{Cl}$	10,3	^{34m}Cl (32 мин)	γ 146/2127 кэВ
^{41}Ca	$9,9 \times 10^4$ лет	ЭЗ	$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	12,2	^{43}K (22,3 ч)	γ 373 кэВ
			$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	9,9	^{47}Ca (4,5 сут)	γ 1297 кэВ
^{59}Ni	$7,6 \times 10^4$ лет	ЭЗ	$^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$	12,2	^{57}Ni (35,6 ч)	γ 1377 кэВ
			$^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$	8,2	^{57}Co (272 сут)	γ 136 кэВ
^{63}Ni	10^2 лет	β^- (67 кэВ)	Те же реакции, что и для ^{59}Ni : пересчет с учетом изотопного содержания в естественной смеси			
^{93}Mo	4×10^3 лет	ЭЗ	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$	8,3	^{99}Mo (66 ч)	γ 739 кэВ
^{93}Zr	$1,6 \times 10^6$ лет	β^- (60/90 кэВ)	$^{90}\text{Zr}(\gamma, n)^{89}\text{Zr}$	12,0	^{89}Zr (78 ч)	γ 909 кэВ

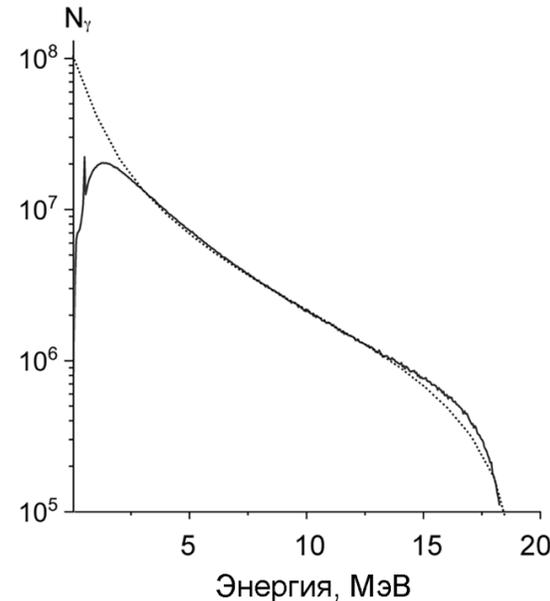
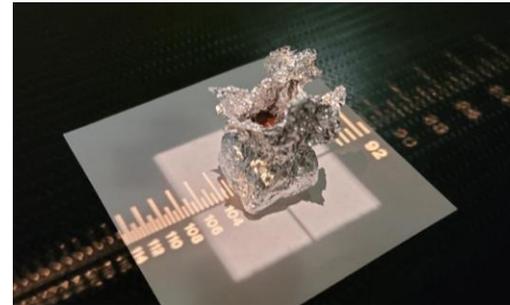
$^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$ ($E_n = 10,5$ МэВ) - продукт реакции ^{58}Co (70.8 сут) γ 811 кэВ

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Средневзвешенные выходы исследованных фотоядерных реакций при граничной энергии тормозного излучения 20 МэВ

Реакция	$Y_{\text{эксп}}, \text{ мБн}$	$Y_{\text{Talys}}, \text{ мБн}$
$^{35}\text{Cl}(\gamma, n)^{34\text{m}}\text{Cl}$	2.1 ± 0.2	2.0
$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	0.40 ± 0.02	0.54
$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	13.70 ± 0.69	14.59
$^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$	$11,2 \pm 0,6$	10,1
$^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$	$12,7 \pm 0,6$	9,5
$^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{60}\text{Co}$	$21.5 \pm 1,2$	20,8
$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$	$56,7 \pm 3,2$	59,3
$^{90}\text{Zr}(\gamma, n)^{89}\text{Zr}$	$69,1 \pm 3,7$	73,9

$$\frac{A_{M-1}^{Z X}}{A_{58}^{59 \text{Co}}} = \left[\frac{N_{M}^{Z X}}{N_{59}^{59 \text{Co}}} \right] \frac{(1 - e^{-\lambda_{M-1}^{Z X} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{M-1}^{Z X} t_{\text{п}}^y} Y_{M}^{Z X}}{(1 - e^{-\lambda_{58}^{59 \text{Co}} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{58}^{59 \text{Co}} t_{\text{п}}^y} Y_{59}^{59 \text{Co}}}$$



Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Формулы расчета активности ^{93}Zr , ^{93}Mo и ^{36}Cl относительно активности ^{60}Co :

$$A_{^{93}\text{Zr}} = 0,003 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{89}\text{Zr}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t_{\text{п}}^y} \lambda_{^{93}\text{Zr}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{60}\text{Co}} \lambda_{^{89}\text{Zr}} e^{-\lambda_{^{89}\text{Zr}} t_{\text{п}}^y}}$$

$$A_{^{93}\text{Mo}} = 0,00045 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{99}\text{Mo}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t_{\text{п}}^y} \lambda_{^{93}\text{Mo}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{99}\text{Mo}} e^{-\lambda_{^{99}\text{Mo}} t_{\text{п}}^y}}$$

$$A_{^{36}\text{Cl}} = 11,2 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{34\text{m}}\text{Cl}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t_{\text{п}}^y} \lambda_{^{36}\text{Cl}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} (1 - e^{-\lambda_{^{34\text{m}}\text{Cl}} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{^{34\text{m}}\text{Cl}} t_{\text{п}}^y}}$$

Формулы расчета активности ^{41}Ca относительно активности ^{60}Co с использованием реакций:

$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$:

$$A_{^{41}\text{Ca}} = 27,7 \cdot A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{43}\text{K}} \lambda_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{41}\text{Ca}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t_{\text{п}}^y} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{43}\text{K}} e^{-\lambda_{^{43}\text{K}} t_{\text{п}}^y}}$$

$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$:

$$A_{^{41}\text{Ca}} = 9 \cdot A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{47}\text{Ca}} \lambda_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{41}\text{Ca}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t_{\text{п}}^y} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{47}\text{Ca}} e^{-\lambda_{^{47}\text{Ca}} t_{\text{п}}^y}}$$

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Формулы расчета активности $^{59,63}\text{Ni}$ относительно активности ^{60}Co с использованием реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$:

$$A_{^{59}\text{Ni}} = 0,23 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{57}\text{Ni}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t^y} \lambda_{^{59}\text{Ni}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{57}\text{Ni}} e^{-\lambda_{^{57}\text{Ni}} t^y}}$$

$$A_{^{63}\text{Ni}} = 15,36 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{57}\text{Ni}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t^y} \lambda_{^{63}\text{Ni}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{57}\text{Ni}} e^{-\lambda_{^{57}\text{Ni}} t^y}}$$

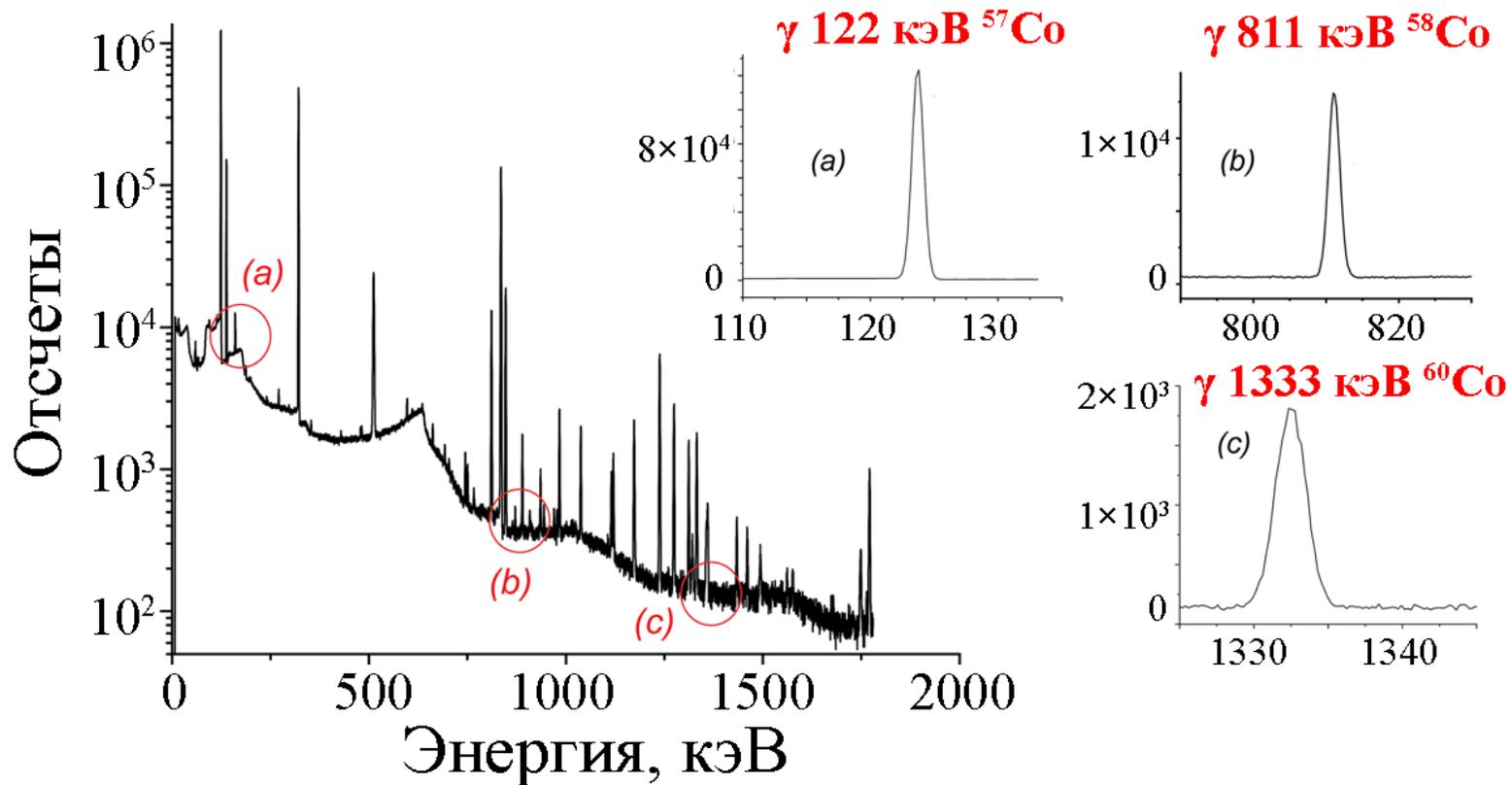
Формулы расчета активности $^{59,63}\text{Ni}$ относительно активности ^{60}Co с использованием реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$:

$$A_{^{59}\text{Ni}} = 0,2 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{57}\text{Co}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t^y} \lambda_{^{59}\text{Ni}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{57}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{57}\text{Co}} t^y}}$$

$$A_{^{63}\text{Ni}} = 13,54 A_{^{60}\text{Co}} \frac{A_{^{57}\text{Co}} \lambda_{^{58}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{58}\text{Co}} t^y} \lambda_{^{63}\text{Ni}} t_{\text{оп}}}{A_{^{58}\text{Co}} \lambda_{^{57}\text{Co}} e^{-\lambda_{^{57}\text{Co}} t^y}}$$

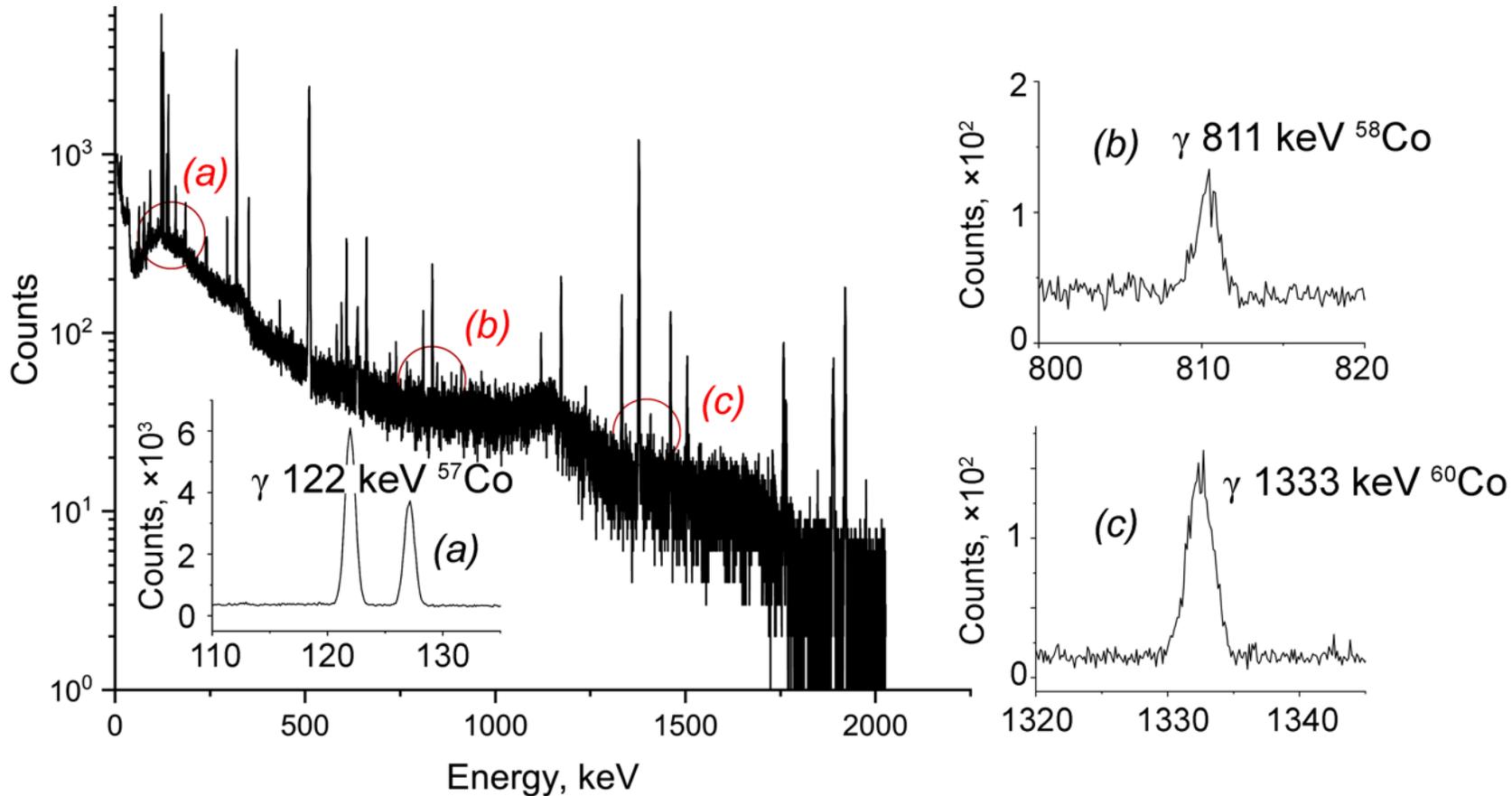
Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Гамма-спектр облученного на ускорителе электронов фрагмента вентиляции реактора РБМК-1000



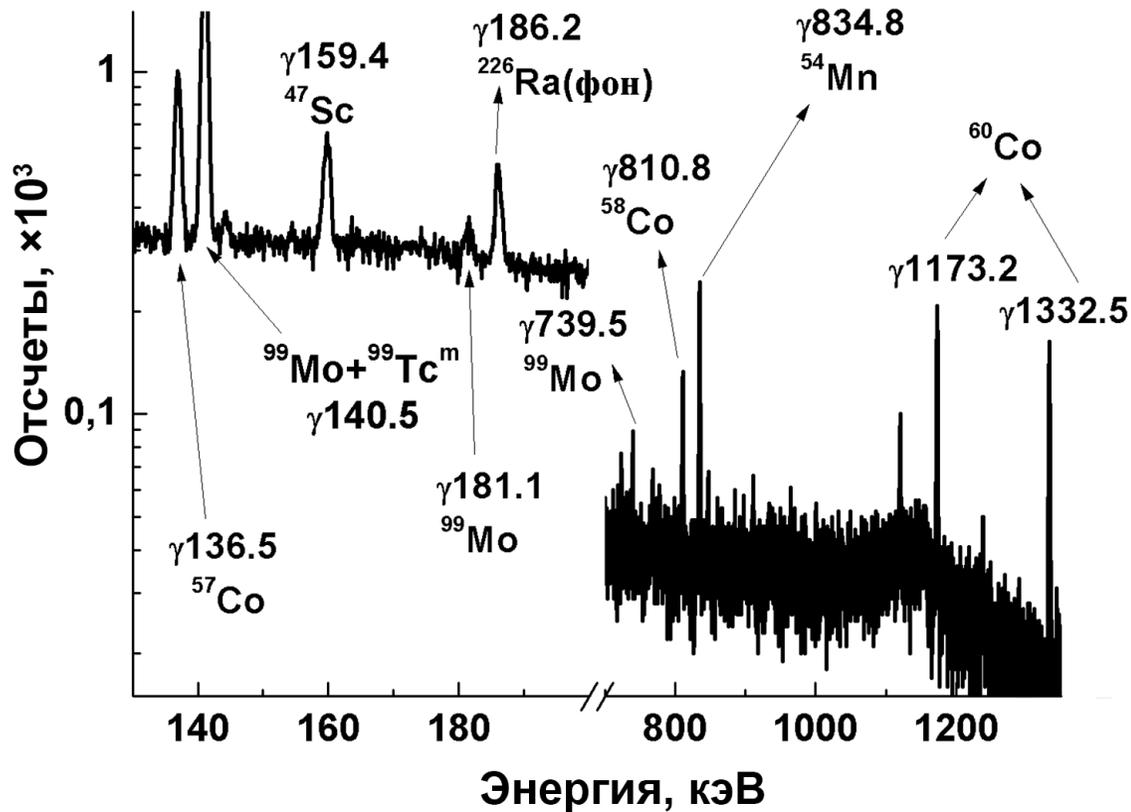
Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Гамма-спектр облученного на ускорителе электронов фрагмента вентиляции реактора ВВЭР-1000



Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Гамма-спектр облученного на ускорителе электронов фрагмента трубы реактора РБМК-1000



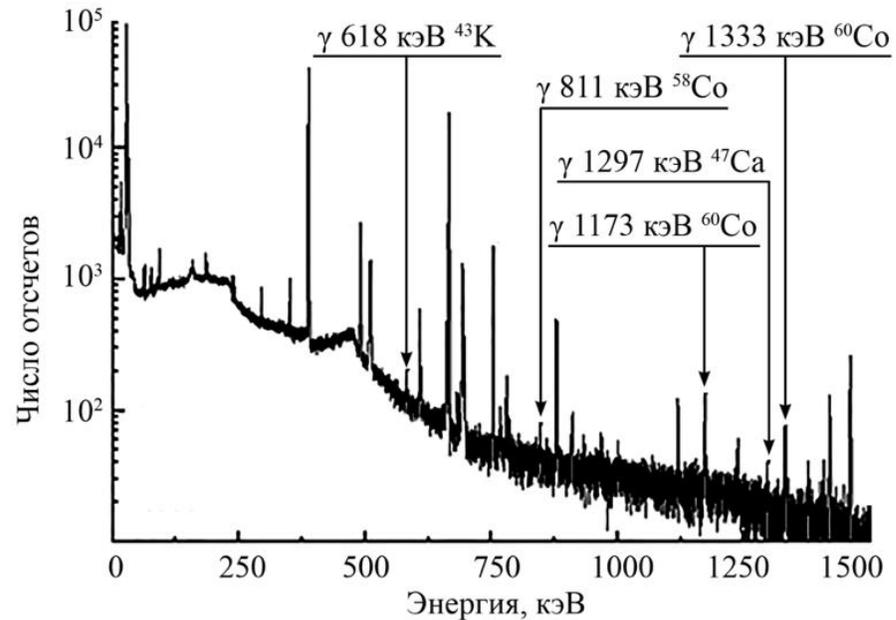
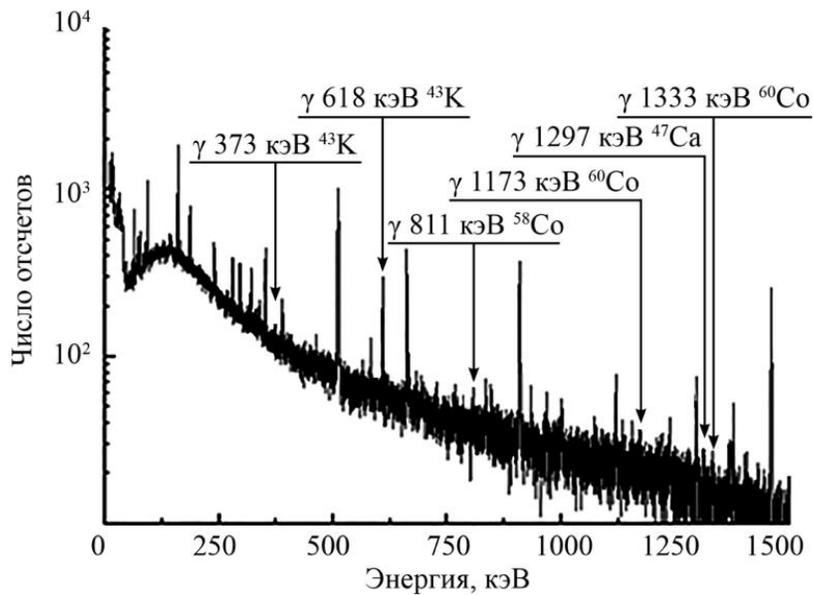
№	A(⁶⁰ Co), Бк/г	A(⁶³ Ni), Бк/г
1	11.9 ± 0.7	22.0 ± 2.1
2	1.9 ± 0.2	2.1 ± 0.2
3	0.86 ± 0.06	1.6 ± 0.2
4	0.74 ± 0.05	1.5 ± 0.2
5	2.76 ± 0.22	1.4 ± 0.2
6	20.1 ± 1.0	41.3 ± 4.1

Активность ⁹³Mo в образцах составила 100-150±20-30 мБк/г.

Активность ⁹³Zr была найдена во всех образцах в составила около 6±2 нБк/г.

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Гамма-спектры облученных на ускорителе электронов образцов биологической защиты реактора ВВЭР-1000



Реакция, которая использовалась	Активность ^{41}Ca (1 образец), мкБк/г	Активность ^{41}Ca (2 образец), мкБк/г
$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	22 ± 10	25 ± 11
$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	31.0 ± 2.1	31.4 ± 2.4

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Изотоп, Бк/г	Образцы облученных кожухов теплообменников					Образцы облученных клапанов теплообменников					Образцы облученных медно-никелевых труб					Образцы облученных сепараторов-пароперегревателей				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
⁴⁰ K	0.07	0.04	0.1	0.08	0.07	0.27	0.13	0.35	0.10	0.19	0.12	0.11	0.18	0.18	0.17	0.14	0.22	0.26	0.23	0.25
⁶⁰ Co	3.48	2.86	3.54	4.63	2.34	20.45	25.44	52.88	34.00	38.53	0.07	0.04	0.07	0.73	0.13	0.26	0.05	3.67	0.50	3.49
⁹⁰ Sr	0.04	0.06	0.03	0.06	0.02	0.11	0.16	1.08	0.37	0.87	0.05	0.48	0.42	0.14	0.13	0.16	0.25	0.54	0.24	1.63
⁹⁴ Nb	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.65	0.64	2.63	1.47	1.60	4×10 ⁻³	2×10 ⁻³	4×10 ⁻³	0.03	0.01	0.02	4×10 ⁻³	0.11	0.06	0.10
¹⁰⁶ Ru	0.15	0.1	0.13	0.17	0.1	0.71	0.75	0.83	0.91	0.96	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.02	0.16	0.22	0.16	0.22
^{108m} Ag	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
¹²⁵ Sb	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.02	0.02	4×10 ⁻³	0.03	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06
¹²⁶ Sn	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
¹³⁴ Cs	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
¹³⁷ Cs	0.04	0.04	0.03	0.09	0.04	0.35	0.40	0.90	1.45	0.80	0.11	0.87	0.64	0.72	0.72	0.15	0.25	0.29	0.31	0.53
¹⁵³ Gd	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08	0.10	0.09	0.10	0.12	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
¹⁵⁴ Eu	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.10	0.18	0.27	0.14	0.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.07	0.01	0.05
¹⁵⁵ Eu	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.09	0.07	0.09	0.09	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02
²¹⁴ Pb	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.13	0.13	0.134	0.15	0.16	0.02	0.02	0.03	0.07	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
²¹⁴ Bi	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.14	0.14	0.154	0.17	0.18	0.02	0.02	0.03	0.09	0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05
²²⁶ Ra	0.28	0.19	0.26	0.31	0.21	1.18	1.14	1.15	1.26	1.36	0.20	0.21	0.32	0.14	0.28	0.05	0.37	0.43	0.34	0.04
²³² Th	0.08	0.05	0.07	0.1	0.06	0.39	0.40	0.43	0.47	0.50	0.03	0.03	0.05	0.06	0.04	0.90	0.08	0.13	0.07	0.12
^{239,240} Pu	0.03	0.02	0.08	0.05	0.01	0.12	0.17	0.53	0.33	0.37	5×10 ⁻³	5×10 ⁻³	5×10 ⁻³	0.02	0.23	0.01	0.04	0.15	0.18	0.09
²³⁸ Pu	0.01	0.01	0.02	0.01	3×10 ⁻³	0.05	0.06	0.17	0.12	0.12	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻³	7×10 ⁻³	0.10	0.01	0.02	0.07	0.06	0.04
²⁴¹ Pu	0.34	0.18	0.23	0.29	0.33	1.62	1.73	6.20	4.00	4.38	0.16	0.13	0.11	0.31	3.19	0.13	0.68	2.85	0.61	1.44
²⁴¹ Am	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.25	0.40	1.04	0.68	0.74	0.04	0.01	0.01	0.03	0.27	0.02	0.07	0.24	0.03	0.12
²³⁴ U	0.02	1×10 ⁻³	5×10 ⁻³	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³	0.01	2×10 ⁻²	2×10 ⁻²	2×10 ⁻²	3×10 ⁻²	7×10 ⁻³	3×10 ⁻³	1×10 ⁻³	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	4×10 ⁻³	4×10 ⁻³
^{235,236} U	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁵	2×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵
²³⁸ U	0.01	6×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³	4×10 ⁻⁴	9×10 ⁻⁴	7×10 ⁻³	9×10 ⁻³	1×10 ⁻²	9×10 ⁻³	1×10 ⁻²	5×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	2×10 ⁻³	4×10 ⁻³	3×10 ⁻³
⁵⁹ Ni	0.71	0.72	0.62	0.59	0.65	0.93	0.56	0.46	1.67	0.71	0.476	0.60	0.60	0.58	0.60	0.46	0.44	0.43	0.46	0.63
⁶³ Ni	2.21	2.15	2.95	2.11	1.95	13.93	24.95	27.47	63.53	43.17	2.11	1.71	2.02	1.98	1.96	2.10	1.96	4.96	1.95	7.80
⁵⁵ Fe	0.93	0.67	0.79	0.63	0.63	2.83	9.12	3.21	9.94	7.14	0.67	0.94	0.84	1.06	0.70	0.73	0.62	0.62	0.60	0.68

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Верификация разработанного подхода

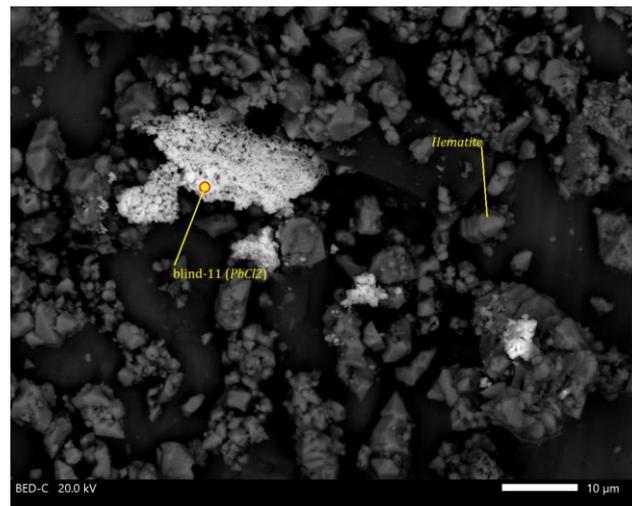
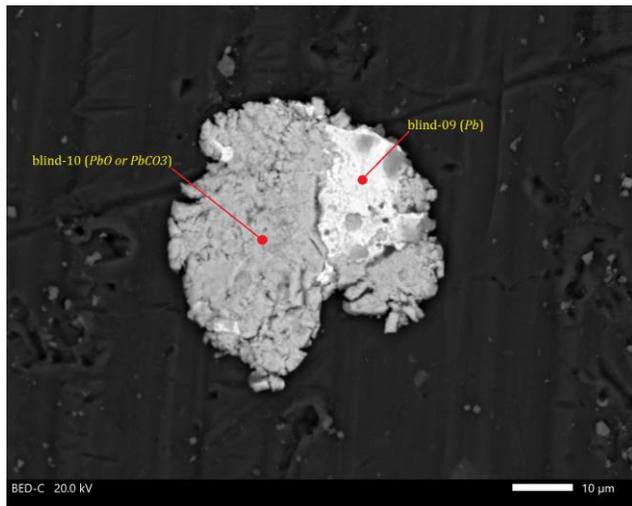
№	$A(^{60}\text{Co})$, Бк/г	$A(^{63}\text{Ni})$, Бк/г	$A(^{63}\text{Ni})$ радиохимия, Бк/г
РБМК-1000			
1	11.9 ± 0.7	22.0 ± 2.1	25.4 ± 1.5
2	1.9 ± 0.2	2.1 ± 0.2	<2
3	0.86 ± 0.06	1.6 ± 0.2	<2
4	0.74 ± 0.05	1.5 ± 0.2	4.1 ± 1.5
5	2.76 ± 0.22	1.4 ± 0.2	<2
6	20.1 ± 1.0	41.3 ± 4.1	43.2 ± 1.5
ВВЭР-1000			
7	0.56 ± 0.05	0.0011 ± 0.00011	<0.1

Радиохимические исследования содержания ^{63}Ni в изученных образцах проводились с использованием высокомолекулярной смолы Ni Resin. Активность ^{63}Ni в счетных образцах определялась с использованием жидкостного сцинтилляционного счетчика (LSC) TRI-CARB 2500TR.

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Верификация разработанного подхода

Для подтверждения полученных данных об исходном соотношении ядер ^{58}Ni и ^{59}Co в исследованных фрагментах облученных металлических конструкционных материалов, элементный состав образца 6 реактора РБМК-1000 был изучен методом сканирующей электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом на электронном микроскопе JEOL JSM-IT500 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-MaxN.



Получено

$\text{Co}/\text{Ni} = 0.029$

**Наши измерения для образца 6
(Co/Ni) = 0.031**

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Определение активности ^{10}Be

В облученных конструкционных материалах реакторов ^{10}Be накапливается за счет двух процессов: $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ реакции на бериллии и $^{10}\text{B}(n, p)^{10}\text{Be}$ реакции на боре.

Сечение $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ – $7,6 \pm 0,8$ мбн
Сечение $^{10}\text{B}(n, p)^{10}\text{Be}$ – $6,4 \pm 0,5$ мбн

} единое усредненное сечение нейтрон-захватных реакций = **7 ± 1 мбн**

Предлагается использовать реакцию $^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}$ и ^{94}Nb с γ -переходами с энергией 702 и 871 кэВ.

$$A_{^{10}\text{Be}} = A_{^{94}\text{Nb}} \left[\frac{N_{^9\text{Be}+^{10}\text{B}}}{N_{^{94}\text{Nb}}} \right] \frac{\lambda_{^{10}\text{Be}} \sigma_{^9\text{Be}/^{10}\text{B}}^n}{\lambda_{^{94}\text{Nb}} \sigma_{^{94}\text{Nb}}^n}$$

с учетом длительных периодов полураспада и ^{10}Be ($1,6 \times 10^6$ лет), и ^{94}Nb ($2,03 \times 10^4$ лет)

Для определения неизвестной исходной концентрации ^9Be и ^{10}B предлагается использовать реакции $^9\text{Be}(\gamma, 2n)^7\text{Be}$ и $^{10}\text{B}(\gamma, 2np)^7\text{Be}$, ^7Be ($T_{1/2}=53$ дня), γ -излучение 477 кэВ.

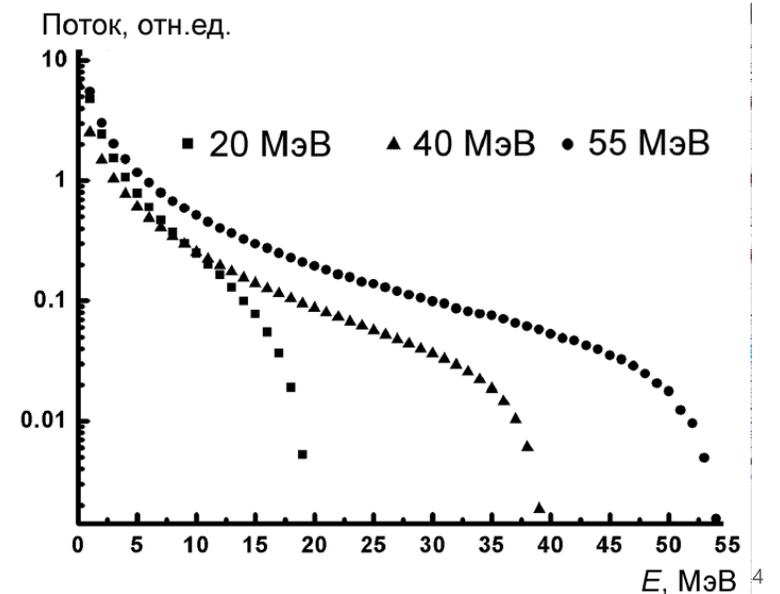
Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Средневзвешенные выходы реакции образования ^7Be при разных граничных энергиях тормозного излучения

$E_{\text{max}}, \text{МэВ}$	20		40		55	
Исходная мишень	Бор	Бор	Бериллий	Железо	Бор	Бериллий
$Y, \text{мкбн}$	11 ± 2	390 ± 40	423 ± 40	455 ± 30	920 ± 90	675 ± 90

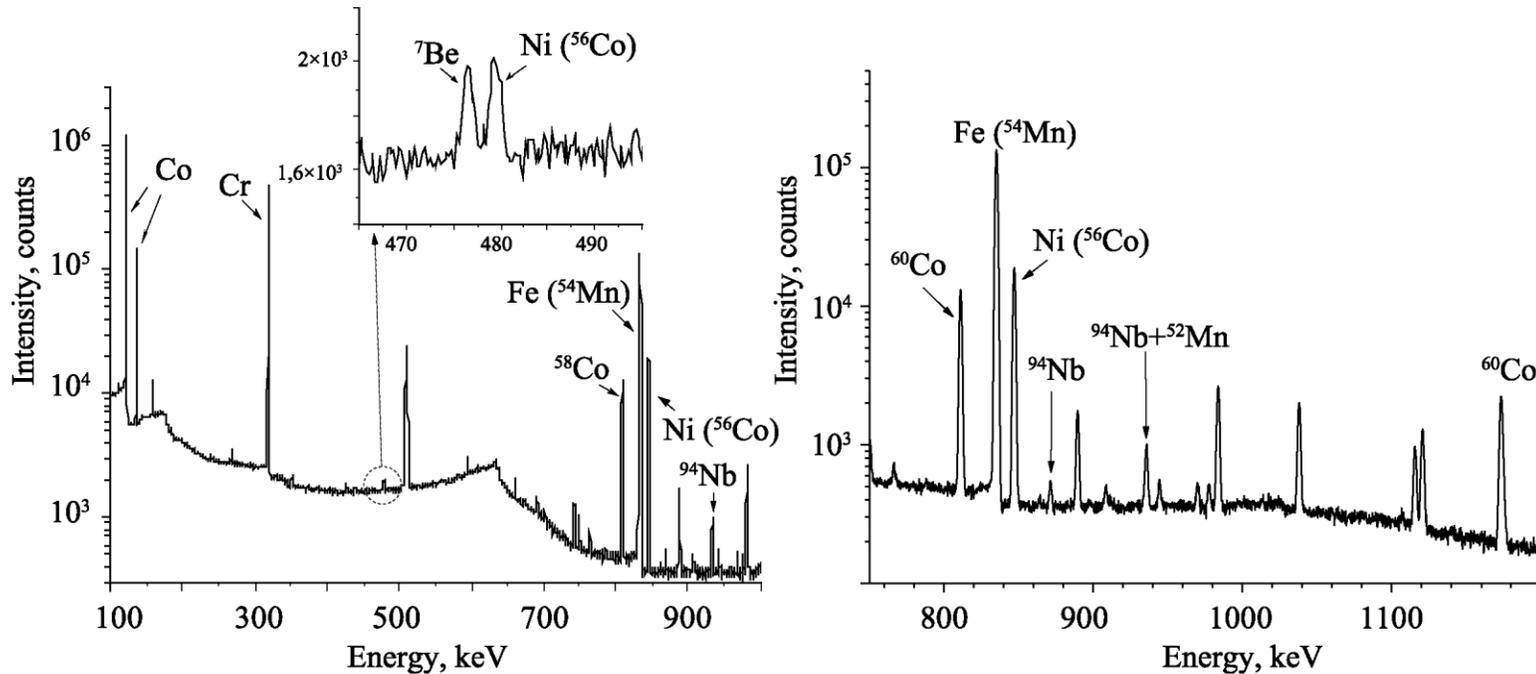
Для тормозного излучения с граничной энергией 37-40 МэВ для расчетов можно использовать единый средневзвешенный по потоку тормозного излучения выход = **410 ± 40** мкбн для ^9Be и ^{10}B

$$\frac{A_{^7\text{Be}}}{A_{^{92}\text{Nb}}} = \left[\frac{N_{^9\text{Be}+^{10}\text{B}}}{N_{^{93}\text{Nb}}} \right] \frac{(1 - e^{-\lambda_{^7\text{Be}} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{^7\text{Be}} t_{\text{п}}^y} Y_{^9\text{Be}/^{10}\text{B}}}{(1 - e^{-\lambda_{^{92}\text{Nb}} t_{\text{обл}}^y}) e^{-\lambda_{^{92}\text{Nb}} t_{\text{п}}^y} Y_{^{92}\text{Nb}}}$$



Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

Фрагменты γ -спектра образца конструкционного материала реактора РБМК-1000, облученного тормозным излучением с граничной энергией 40 МэВ



Образец облученного кожуха теплообменника	Образец облученных клапанов теплообменника	Образец облученных трубок из медно-никелевого сплава	Образец из облученных труб сепаратора-пароперегревателя
2	4.5	<0.5	1.5

Фотоактивационный метод определения активности долгоживущих радиоизотопов в конструкционных материалах и РАО АЭС

В зависимости от массы исследуемых образцов конструкционных материалов и времени облучения, при условии использования полупроводниковых спектрометров с HPGe-детекторами чувствительность разработанных методов составляет $\sim 10^{-3}$ - 10^{-9} Бк/г.

Минимальная масса образца, необходимая для анализа предложенным способом, составляет всего несколько мкг, в то время как на ускорителях электронов возможно облучение мишени массой до сотен грамм. Таким образом, при использовании фотоактивационного подхода возможно облучение до нескольких сотен образцов конструкционных материалов или радиоактивных отходов одновременно, что значительно уменьшает время анализа образцов и снижает затраты по сравнению с традиционными радиохимическими методами.

Поскольку ПДК для чистых бета-излучателей составляет около 10^2 Бк/г, предложенный подход позволяет успешно измерять содержание всех вышеперечисленных радионуклидов, распадающихся без испускания γ -излучения, в облученных конструкционных материалах реакторов и РАО АЭС.

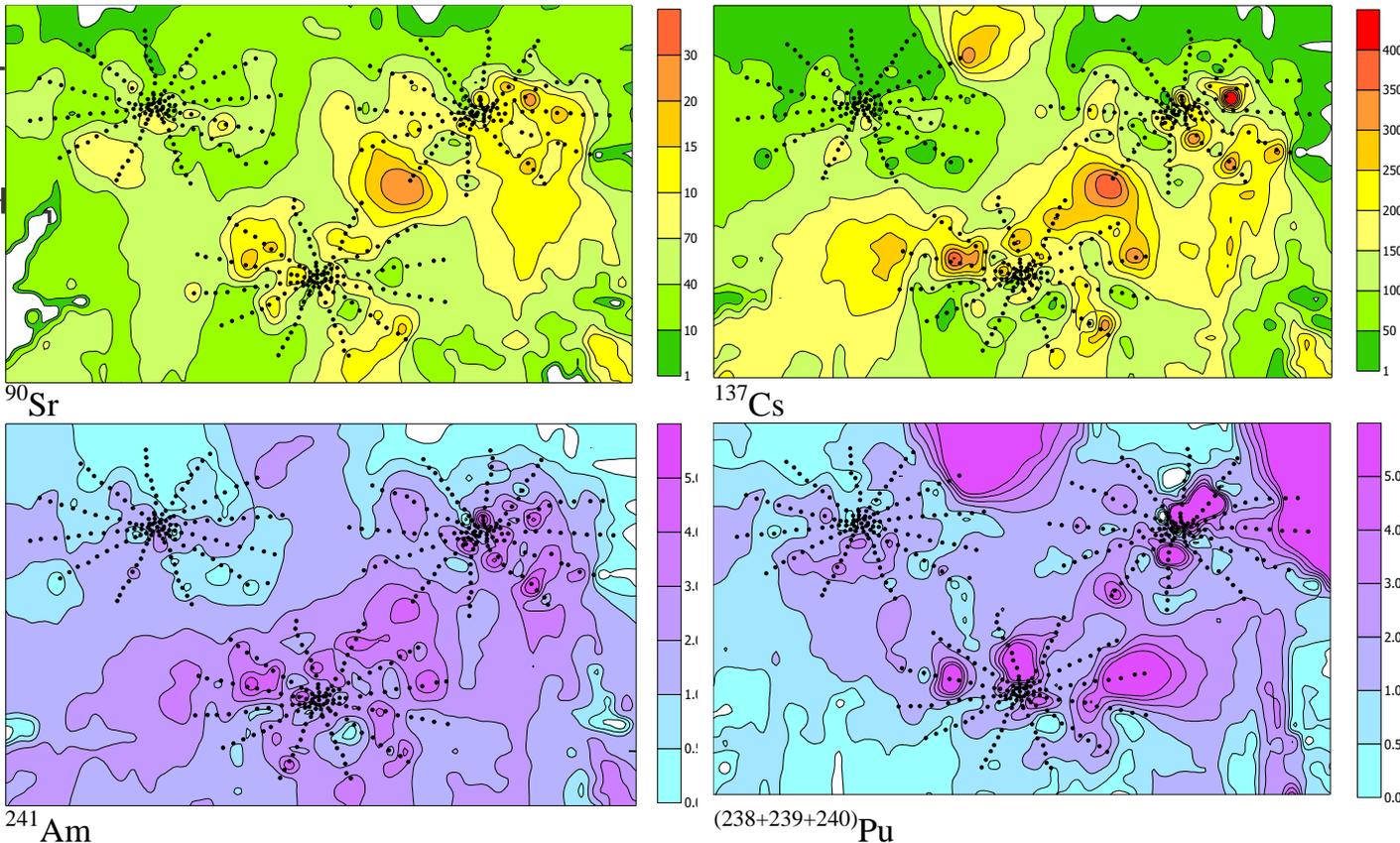
Описание разработанных методов и полученные результаты опубликованы в 43 научных статьях, цитируемых в базах данных Scopus/WoS в том числе Q1 (2) и Q2 (9).

Спасибо за внимание

Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде

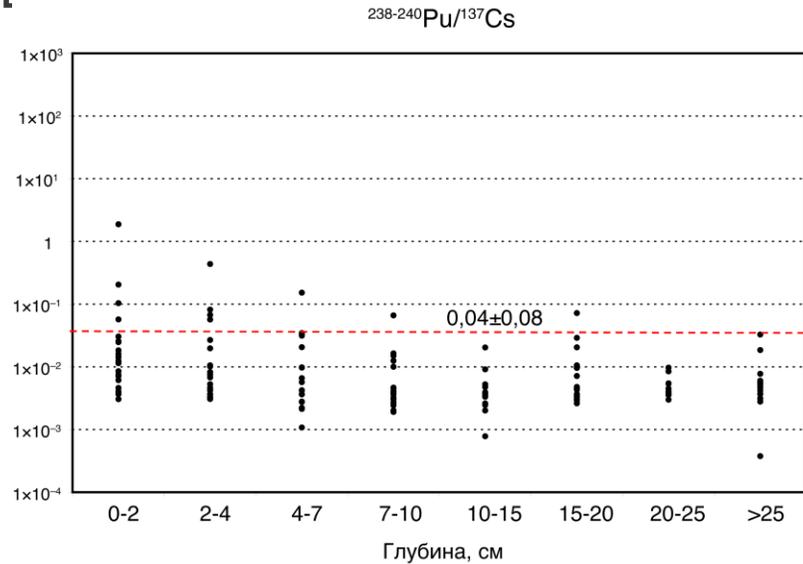
435 точек от

Диаметр каж

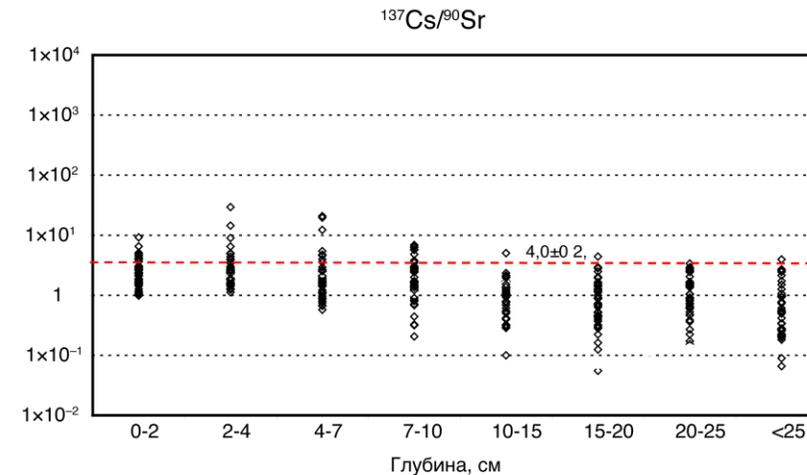
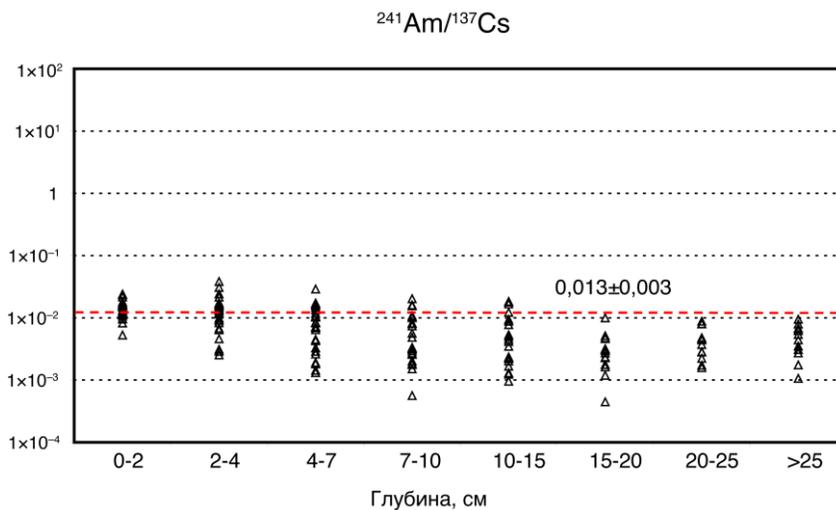


На отдельных участках отбирались образцы почвы в виде колонок (~100) и разделялись по слоям: по 2 см (4 слоя) и затем по 5 см до глубины 30 или 60 см.

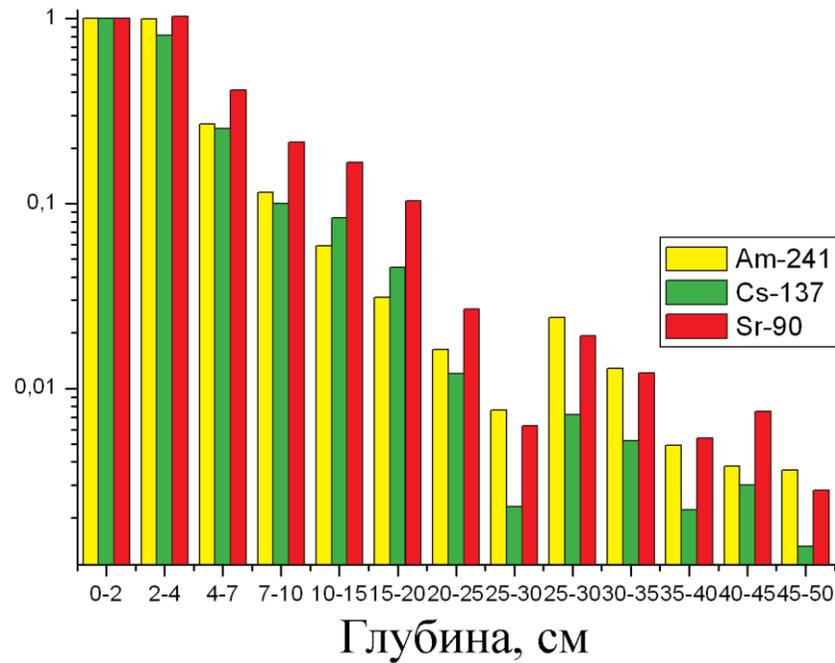
Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде



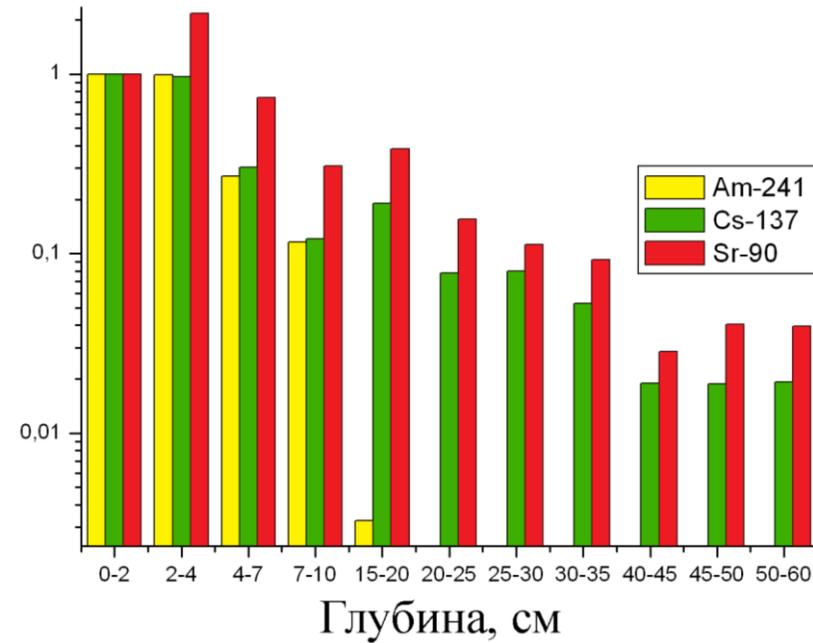
Частотные распределения изотопных отношений в профилях почв Чернобыльской зоны отчуждения и южной части Полесского радиозэкологического заповедника.



Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде



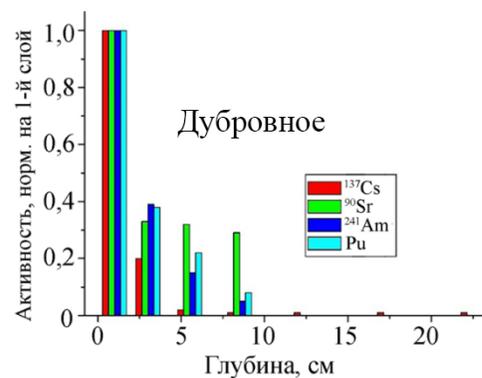
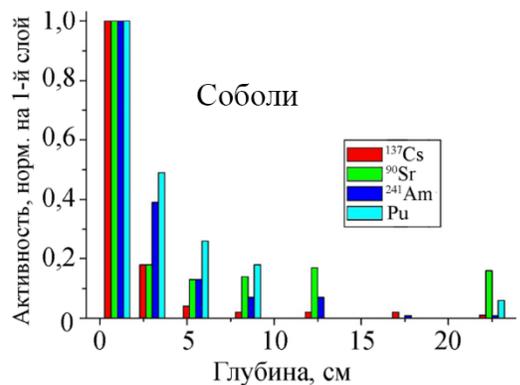
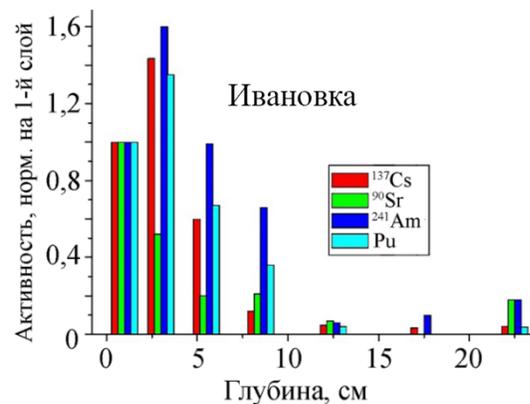
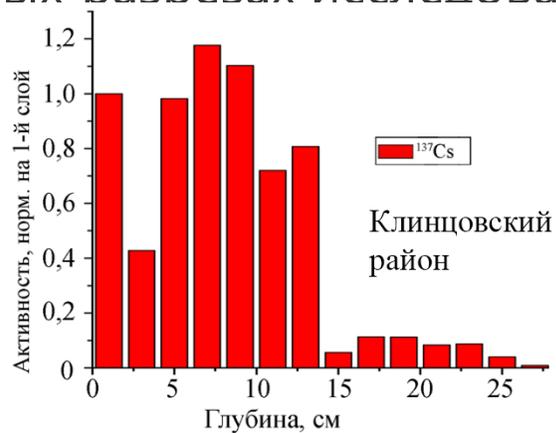
Гистограмма относительной активности в дерново-слабоподзолистых пылевато-песчаных почвах.



Гистограмма относительной активности в болотных минеральных глинисто-песчаных почвах

Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде

Гистограммы относительного распределения радионуклидов в вертикальных разрезах исследованных полигонов



Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде

Обработаны данные о распределении активности в **~100** профилей почвы, отобранных на полигонах в ближней зоне ЧАЭС.

Модифицированная конвективно-диффузионная модель [Иванов]:

$$C(x,t) = C_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{(x-u \cdot t)^2}{4D \cdot t}\right) - \frac{u \cdot x}{D} \exp\left(-\frac{u \cdot x}{D}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x+u \cdot t}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right] \right\}$$

где: C_0 , $C(x, t)$ — содержание радионуклида в почвенном слое x в начальный момент времени и время t , см²год⁻¹; D — коэффициент диффузии радионуклида, u — скорость направленного переноса радионуклида с током влаги, см·год⁻¹.

Отмечен различный вклад диффузионного и конвективного переноса радионуклидов в их суммарную миграцию в различных ландшафтно-геохимических условиях. Показано, что в минеральных почвах с нормальным водным режимом радионуклиды можно расположить в следующий ряд в соответствии с их миграционной подвижностью:

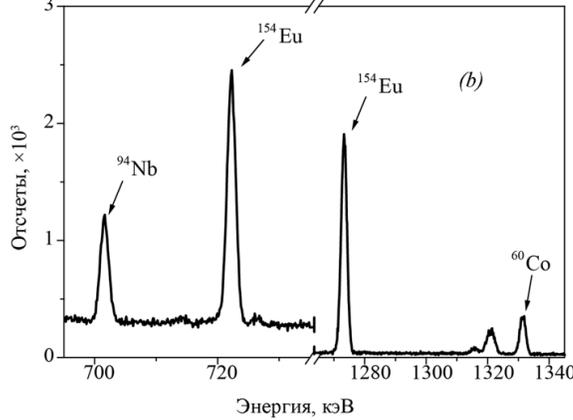
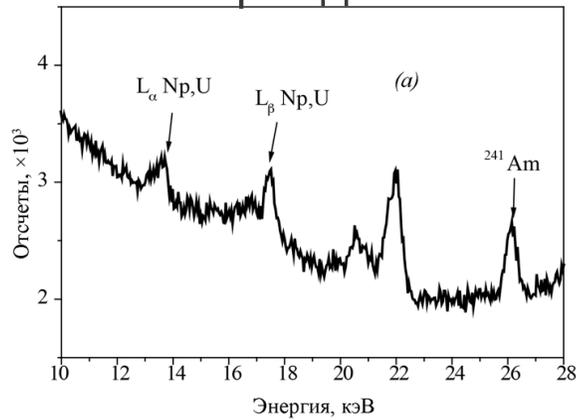
Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде

Периоды полураспада верхнего 5-см корнеобитаемого горизонта некоторых почв, лет

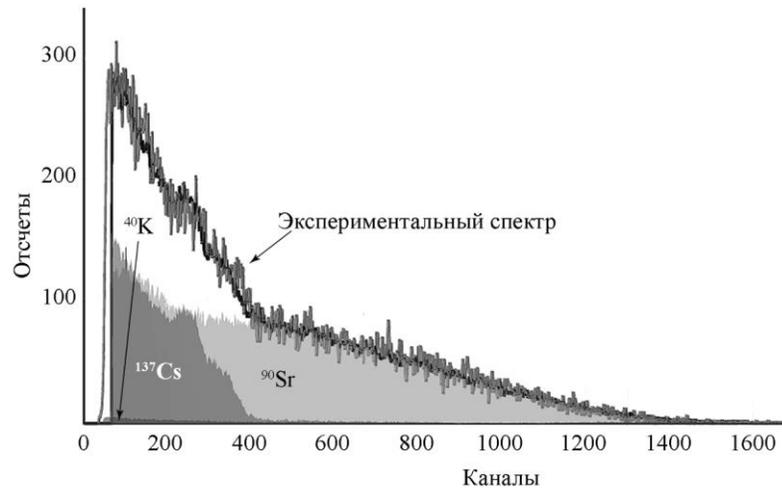
Полигон	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	Pu
Болотная минеральная оглинено-песчаная почва (2001-2002 гг.)	28 ± 3	21 ± 4	25 ± 3	100 ± 2 0
Болотная минеральная оглинено-песчаная почва (2019 г.)	27 ± 3	36 ± 5	55 ± 7	74 ± 20
Дернистая пыле-песчаная почва (2001-2002 гг.)	58 ± 6	46 ± 7	42 ± 7	100 ± 3 5
Дернистая пыле-песчаная почва (2019 г.)	61 ± 1 0	42 ± 7	62 ± 9	56 ± 20

Исследование донных отложений пруда-охладителя ЧАЭС

Гамма- и бета-спектры донных отложений



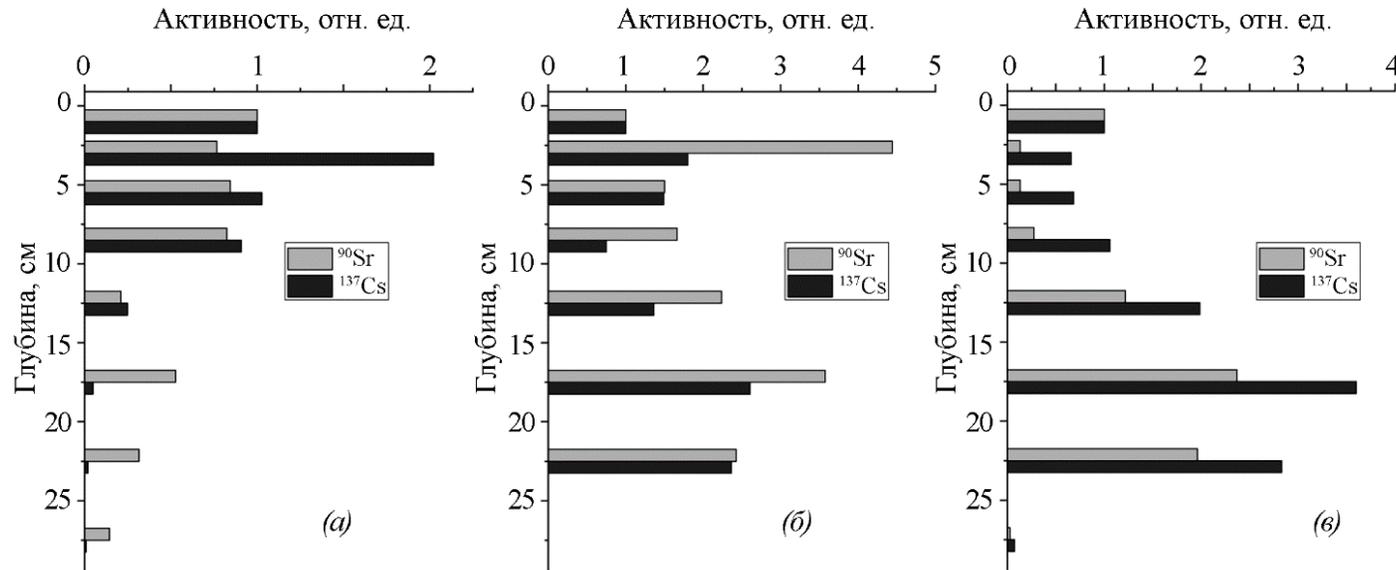
Изотоп	Активность (Бк/г) по состоянию на 05.2021 г. ($\times 10^2$)
^{60}Co	0.92(8)
^{94}Nb	0.75(6)
^{134}Cs	0.057(7)
^{137}Cs	6680(300)
^{154}Eu	10.0(5)
^{155}Eu	1.68(9)
^{241}Am	246(12)
^{243}Am	0.51(5)
^{243}Cm	0.28(5)



Глубина, см	Отложения в зоне береговой линия пруда-охладителя		Донные отложения пруда-охладителя			
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
1	765	3760	1520	2050	680	2750
3	586	7600	200	1350	3020	4950
5.5	645	3860	200	1400	1020	4100
8.5	630	3410	415	2170	1130	2060
12.5	160	930	1850	4070	1520	3750
17.5	403	180	3600	7380	2430	7160
22.5	240	70	2980	5800	1650	6500
27.5	110	30	40	150	0	0

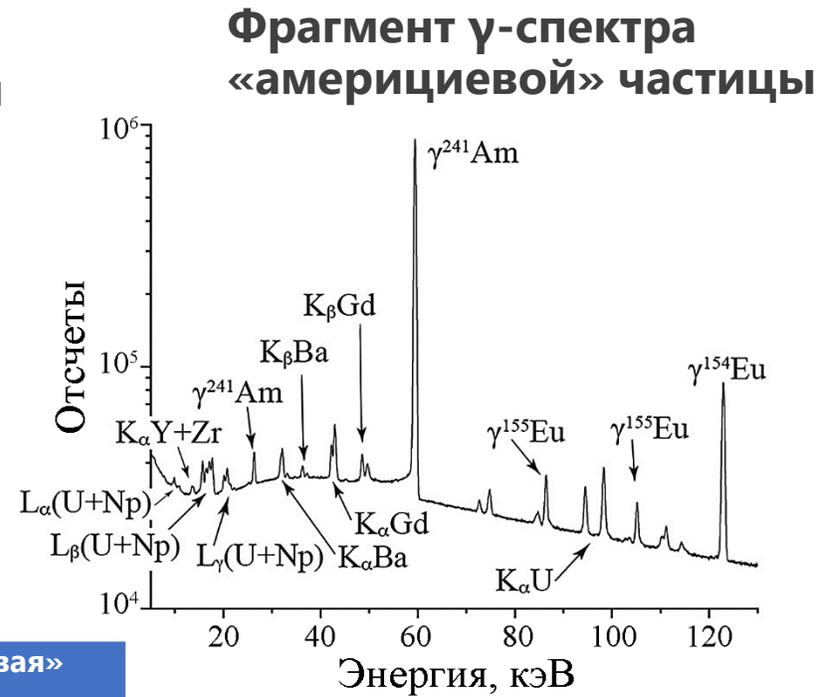
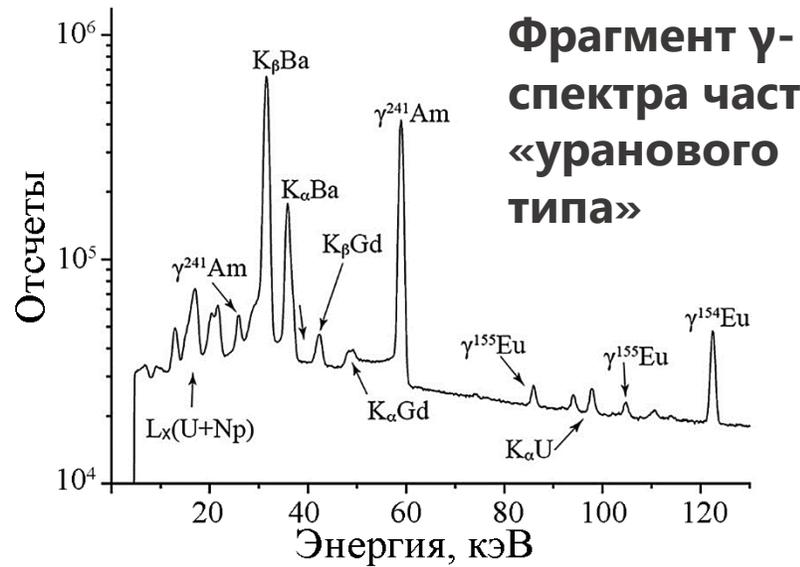
Исследование донных отложений пруда-охладителя ЧАЭС

Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях пруда-охладителя ЧАЭС до глубины 30 см: а – отложения в зоне береговой линии, б, в – донные отложения (активность каждого образца по глубине нормирована на активность первого слоя).



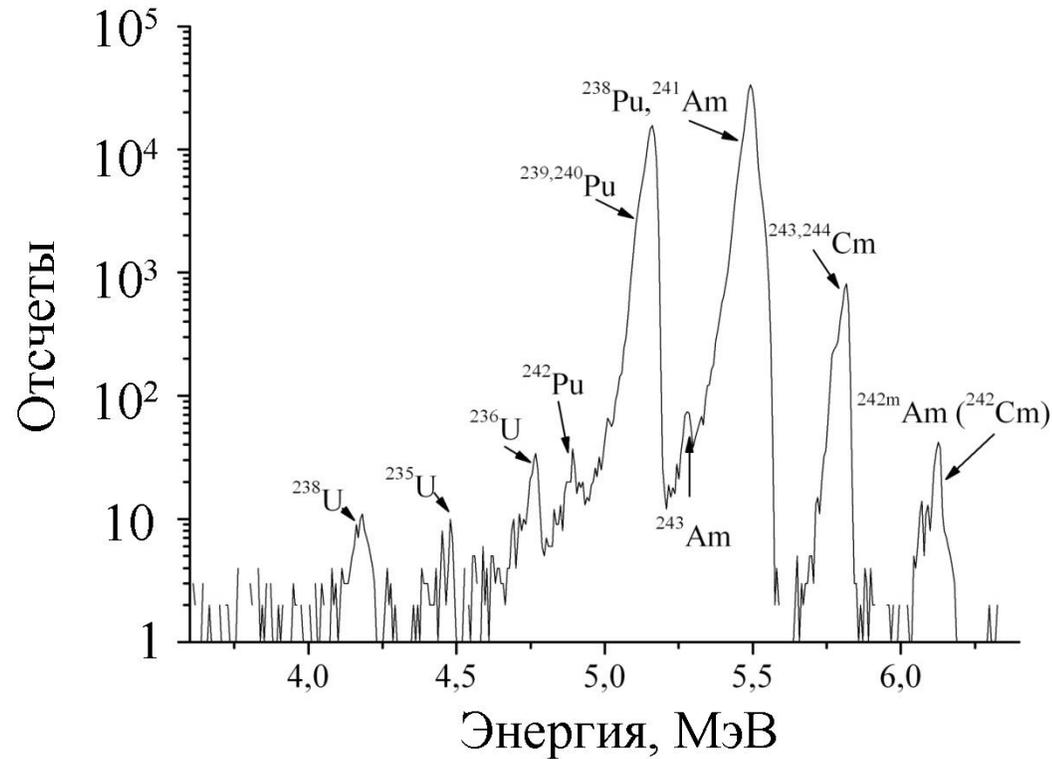
Слой 15–20 см – место депонирования выпадений первичного взрыва 1986 г.

Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде



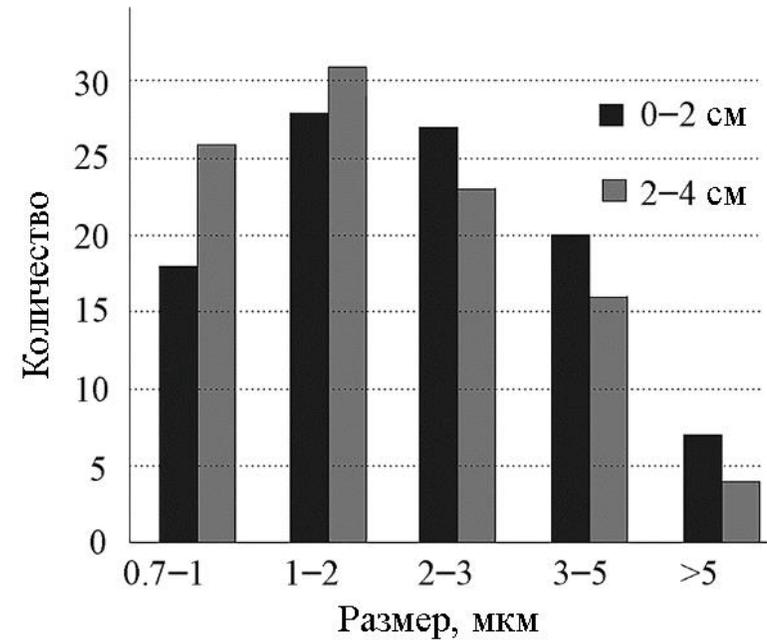
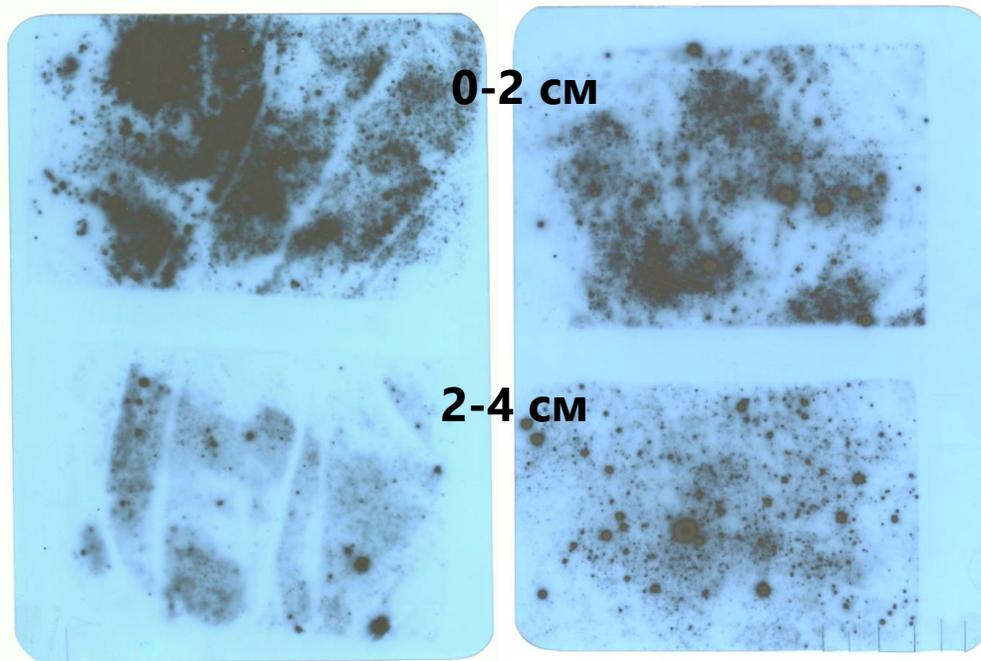
Радионуклид	Частица «уранового» типа	«Америциевая» частица
^{60}Co	—	0.62(3)
^{137}Cs	$8.1(4) \times 10^3$	48(2)
^{154}Eu	27(2)	13.0(6)
^{155}Eu	42(3)	22(1)
^{241}Am	372(18)	280(14)
^{243}Am	0.46(4)	0.57(3)
^{243}Cm	1.17(12)	0.34(2)
^{94}Nb	1.46(15)	0.80(4)

Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде



Радионуклид	Частица «уранового» типа
^{137}Cs	$20(1) \times 10^6$
^{234}U	$2.6(3) \times 10^3$
^{235}U	$7.2(16) \times 10^1$
^{236}U	$3.2(5) \times 10^2$
^{238}U	$9.2(15) \times 10^2$
^{238}Pu	$5.8(6) \times 10^5$
$^{239,240}\text{Pu}$	$9.7(9) \times 10^5$
^{242}Pu	$2.0(3) \times 10^3$
^{241}Pu	$20(2) \times 10^6$
^{241}Am	$1.65(6) \times 10^6$
^{243}Am	$2.8(5) \times 10^3$
$^{243,244}\text{Cm}$	$3.1(3) \times 10^4$
$^{242\text{m}}\text{Am} + ^{242}\text{Cm}$	$1.8(4) \times 10^3$

Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде



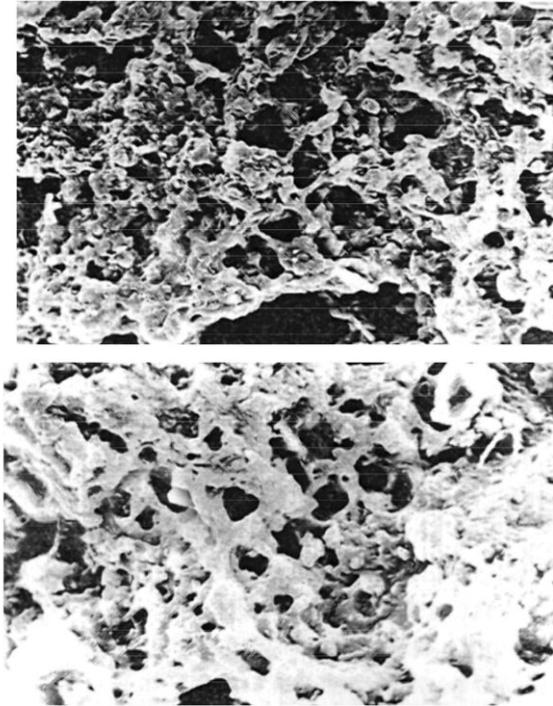
**болотная минеральная
оглинено-песчаная
почвы**

**дернистая
пылепесчаная
почва**

Радиографическим методом исследован дисперсный состав горячих частиц в двух верхних слоях почв. Показано уменьшение размеров «горячих» частиц по сравнению с 2002 г. с 3 мм до 1,5 мм, что подтверждает выводы об интенсивных процессах деструкции частиц.

Исследования влияния почвенных микромицетов на деструкцию горячих частиц

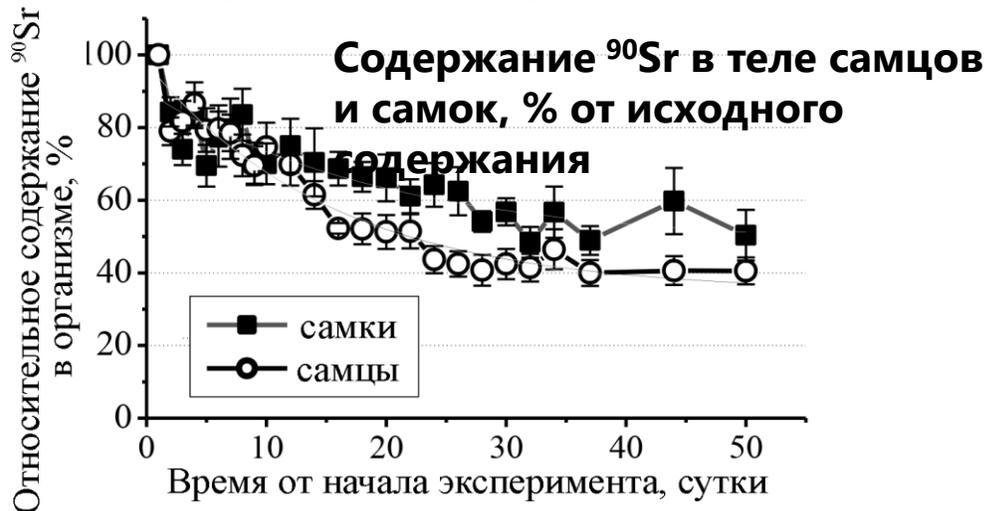
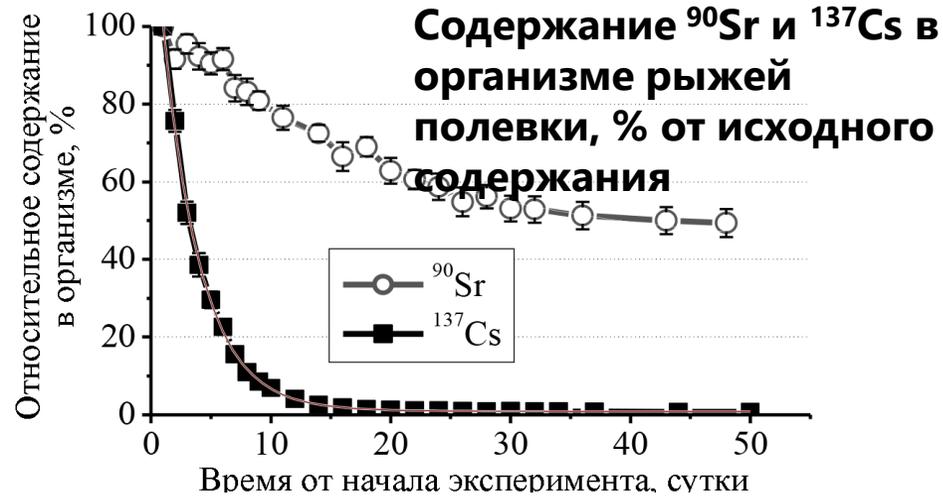
Проведены эксперименты с штаммами почвенных микромицетов *C. Cladosporium* 4061, *C. Cladosporium* 4, *Penicillium Hirsntam*, *Hormosconic* 61 и двумя горячими частицами, в которых присутствовала значительная активность ^{241}Am и изотопов плутония. Впервые обнаружено, что некоторые штаммы микромицетов накапливают ^{241}Am и изотопы Pu в мицелии.



Активности трансурановых радионуклидов в мицелии штамма *C. Cladosporium* 4061 после эксперимента с горячей частицей SL4

А, Бк/обр $^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}$	Погрешность, Бк/кг	А, Бк/обр, ^{238}Pu	Погрешность, Бк/кг	А, Бк/зр, ^{241}Am	Погрешность, Бк/кг
0,062548	0,009545	0,019262	0,003788	0,0347	0,0053

Оценка дозовых нагрузок мышевидных грызунов загрязненных территорий ближней зоны ЧАЭС



- Рассчитаны мощности доз внешнего и внутреннего облучения мышевидных грызунов, отловленных на территории ближней зоны ЧАЭС.
- Оценены уровни накопления радионуклидов в мышевидных грызунах.
- Выявлены межвидовые различия в уровнях накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr .
- **Впервые показано, что мощности поглощенных доз за счет внешнего β -облучения соизмеримы с мощностью дозы за счет β -внутреннего облучения для мышей, обитающих на загрязненных территориях.**
- Отмечено, что вклад внешнего и внутреннего γ -излучения в поглощенную дозу незначителен по сравнению с β -облучением.

Заключение

1. Разработаны новые неразрушающие методы измерения содержания долгоживущих антропогенных радионуклидов $^{238-240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr , исключаяющие процедуры радиохимического разделения, но обеспечивающие необходимую точность и надежность результатов в том числе при проведении масштабных радиоэкологических исследований;
2. Разработан метод прижизненного определения активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме мелких животных для использования как в полевых, так и в стационарных лабораторных условиях.
3. Предложен фотоактивационный подход и разработан комплекс методов по определению активности долгоживущих радионуклидов, распадающихся без испускания γ -квантов (^{10}Be , ^{36}Cl , ^{41}Ca , $^{59,63}\text{Ni}$, ^{93}Mo , ^{93}Zr) в облученных конструкционных материалах реакторов и РАО АЭС.

Заключение

4. На основе экспериментальных исследований с использованием разработанных методов изучено >2500 образцов почвы и донных отложений на территориях, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС. Рассчитаны параметры вертикальной миграции техногенных радионуклидов в почвенных профилях территорий с разным уровнем радиоактивного загрязнения. Проведены расчеты эффективных периодов полуочищения от техногенных радионуклидов для различных типов почв с использованием модифицированной модели вертикальной миграции радионуклидов, учитывающей конвективный перенос и диффузию.

5. Проведены исследования горячих частиц чернобыльского происхождения, выделен новый тип частиц с повышенным содержанием америция ^{241}Am .

6. Впервые установлено влияние почвенных микромицетов на деструкцию горячих частиц.

7. Изучены особенности накопления радиостронция в мышевидных грызунах, обитающих на территориях с высоким уровнем загрязнения топливными выпадениями.

Практическое значение разработанных методов

1. Предприятия топливно-энергетического комплекса - неразрушающий контроль чистых бета-излучателей в РАО АЭС при штатной эксплуатации станций. Характеризация и паспортизация долгоживущих чистых бета-излучателей в облученных конструкционных материалах реакторов при снятии АЭС с эксплуатации. Контроль долгоживущих чистых бета-излучателей в местах переработки и захоронения РАО.
2. Ядерный оружейный комплекс - неразрушающий оперативный контроль долгоживущих чистых бета-излучателей при проведении ядерных испытаний. Оперативный контроль обстановки при ядерном терроризме (использование «грязных» бомб).
3. Атомный ледокольный флот - неразрушающий контроль чистых бета-излучателей в РАО реактора при штатной эксплуатации.
4. Федеральная таможенная служба - неразрушающий и оперативный контроль радиоактивных и делящихся материалов при таможенном досмотре транспортных средств и грузов.
5. Роспотребнадзор - контроль качества продуктов питания.
6. Ростехнадзор - экологический, технологический и атомный надзор за предприятиями атомной промышленности.

Соответствие паспорту специальности 1.5.1

П. 13. Радиационная экология: изучение закономерностей поведения радиоактивных веществ в окружающей среде и действия ионизирующего излучения на растения и животных, разработка защитных мероприятий. Последствия ядерных аварий и катастроф, чрезвычайных ситуаций. Принципы и методы радиационного мониторинга. Методы реабилитации и ведения хозяйства на загрязненных радионуклидами территориях. Миграция радионуклидов. Действие ионизирующего излучения на организмы, популяции и экосистемы. Радиоэкологические и радиобиологические последствия радиоактивного загрязнения, в том числе в результате радиационных аварий

Статьи в научных журналах

В профильных реферируемых отечественных и зарубежных изданиях опубликовано 88 научных статьи, по результатам, полученным с использованием разработанных методов.

Из них 43 (Scopus):

Q1 European Physical Journal A (2 статьи)

Q2 Journal of Environmental Radioactivity (2 статьи)

Q2 Health Physics (5 статей)

Q2 Radioprotection (1 статья)

Q3 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (2 статьи)

Q4 Переводные версии «Известия РАН. Серия Физическая», «Ядерная физика», «Письма в ЭЧАЯ», «Вестник МГУ. Физика», «Радиохимия», «Ядерная физика и энергетика»

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

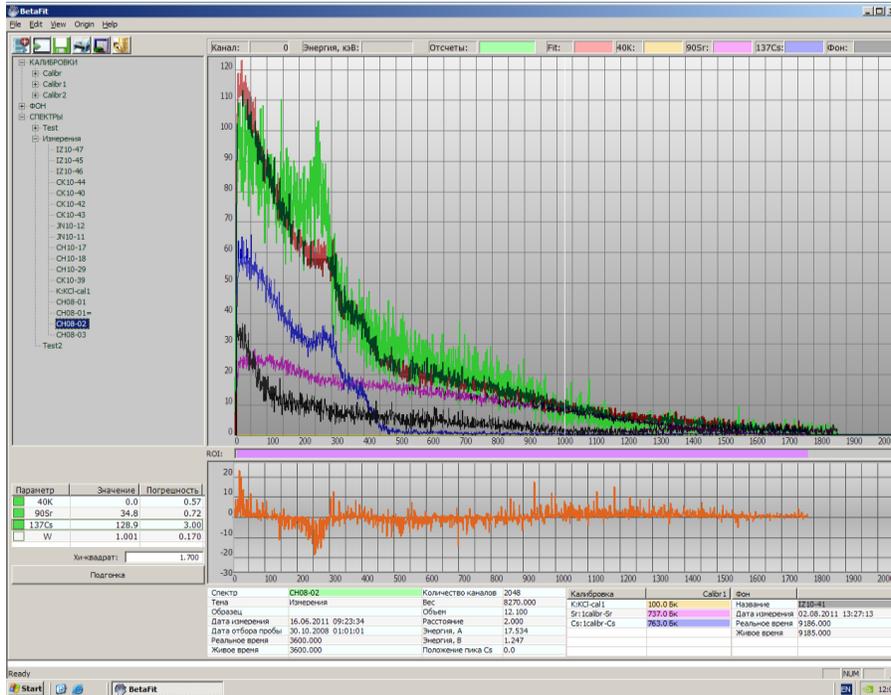
международных конференциях:

- «Terrestrial Radioisotopes in Environment. International Conference on Environmental Protection» (Veszprém, Hungary, 2020, 2022),
- «International Conference on Radiation Applications, RAP 2021» (Serbia, 2021).
- «ICRP International Conference on Recovery After Nuclear Accidents Radiological Protection Lessons from Fukushima and Beyond» (Tokio, Japan 2020),
- «Global Nuclear Physics Innovation» (Warsaw, Poland 2020),
- «6th International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD 2018» (Ohrid, Macedonia, 2018),
- «Радиобиология: актуальные проблемы» (Гомель, Республика Беларусь, 2016, 2018)

Исследование состава металлических конструкционных материалов реактора РБМК-1000

Isotop e. Bq x g ⁻¹	Samples from irradiated heat-exchanger shell					Samples from irradiated heat-exchanger dampers					Samples from irradiated tubes of copper-nickel alloy					Samples from irradiated tubes of separators-superheaters				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
⁴⁰ K	0.07	0.04	0.1	0.08	0.07	0.27	0.13	0.35	0.10	0.19	0.12	0.11	0.18	0.18	0.17	0.14	0.22	0.26	0.23	0.25
⁶⁰ Co	3.48	2.86	3.54	4.63	2.34	20.45	25.44	52.88	34.00	38.53	0.07	0.04	0.07	0.73	0.13	0.26	0.05	3.67	0.50	3.49
⁹⁰ Sr	0.04	0.06	0.03	0.06	0.02	0.11	0.16	1.08	0.37	0.87	0.05	0.48	0.42	0.14	0.13	0.16	0.25	0.54	0.24	1.63
⁹⁴ Nb	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.65	0.64	2.63	1.47	1.60	4×10 ⁻³	2×10 ⁻³	4×10 ⁻³	0.03	0.01	0.02	4×10 ⁻³	0.11	0.06	0.10
¹⁰⁶ Ru	0.15	0.1	0.13	0.17	0.1	0.71	0.75	0.83	0.91	0.96	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.02	0.16	0.22	0.16	0.22
^{108m} Ag	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
¹²⁵ Sb	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.02	0.02	4×10 ⁻³	0.03	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06
¹²⁶ Sn	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
¹³⁴ Cs	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
¹³⁷ Cs	0.04	0.04	0.03	0.09	0.04	0.35	0.40	0.90	1.45	0.80	0.11	0.87	0.64	0.72	0.72	0.15	0.25	0.29	0.31	0.53
¹⁵³ Gd	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08	0.10	0.09	0.10	0.12	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
¹⁵⁴ Eu	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.10	0.18	0.27	0.14	0.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.07	0.01	0.05
¹⁵⁵ Eu	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.09	0.07	0.09	0.09	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02
²¹⁴ Pb	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.13	0.13	0.134	0.15	0.16	0.02	0.02	0.03	0.07	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
²¹⁴ Bi	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.14	0.14	0.154	0.17	0.18	0.02	0.02	0.03	0.09	0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05
²²⁶ Ra	0.28	0.19	0.26	0.31	0.21	1.18	1.14	1.15	1.26	1.36	0.20	0.21	0.32	0.14	0.28	0.05	0.37	0.43	0.34	0.04
²³² Th	0.08	0.05	0.07	0.1	0.06	0.39	0.40	0.43	0.47	0.50	0.03	0.03	0.05	0.06	0.04	0.90	0.08	0.13	0.07	0.12
^{239,240} Pu	0.03	0.02	0.08	0.05	0.01	0.12	0.17	0.53	0.33	0.37	5×10 ⁻³	5×10 ⁻³	5×10 ⁻³	0.02	0.23	0.01	0.04	0.15	0.18	0.09
²³⁸ Pu	0.01	0.01	0.02	0.01	3×10 ⁻³	0.05	0.06	0.17	0.12	0.12	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻³	7×10 ⁻³	0.10	0.01	0.02	0.07	0.06	0.04
²⁴¹ Pu	0.34	0.18	0.23	0.29	0.33	1.62	1.73	6.20	4.00	4.38	0.16	0.13	0.11	0.31	3.19	0.13	0.68	2.85	0.61	1.44
²⁴¹ Am	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.25	0.40	1.04	0.68	0.74	0.04	0.01	0.01	0.03	0.27	0.02	0.07	0.24	0.03	0.12
²³⁴ U	0.02	1×10 ⁻³	5×10 ⁻³	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³	0.01	2×10 ⁻²	2×10 ⁻²	2×10 ⁻²	3×10 ⁻²	7×10 ⁻³	3×10 ⁻³	1×10 ⁻³	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	4×10 ⁻³	4×10 ⁻³
^{235,236} U	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁵	2×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵
²³⁸ U	0.01	6×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³	4×10 ⁻⁴	9×10 ⁻⁴	7×10 ⁻³	9×10 ⁻³	1×10 ⁻²	9×10 ⁻³	1×10 ⁻²	5×10 ⁻³	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³	2×10 ⁻³	2×10 ⁻³	4×10 ⁻³	3×10 ⁻³
⁵⁹ Ni	0.71	0.72	0.62	0.59	0.65	0.93	0.56	0.46	1.67	0.71	0.476	0.60	0.60	0.58	0.60	0.46	0.44	0.43	0.46	0.63
⁶³ Ni	2.21	2.15	2.95	2.11	1.95	13.93	24.95	27.47	63.53	43.17	2.11	1.71	2.02	1.98	1.96	2.10	1.96	4.96	1.95	7.80
⁵⁵ Fe	0.93	0.67	0.79	0.63	0.63	2.83	9.12	3.21	9.94	7.14	0.67	0.94	0.84	1.06	0.70	0.73	0.62	0.62	0.60	0.68

Спектрометрический метод одновременного определения ^{90}Sr и ^{137}Cs



$$1) y_{j,i} = N_{j,i} - (t_j / t_{фон}) N_{фон,i}$$

$$1 \leq i \leq i_0 \quad 0 \leq j \leq 3$$

$$a = \sum_{k=0}^2 a_k i^k$$

$$2) y_i \approx y_{i0} + (y_{i0+1} - y_{i0}) \cdot (\hat{1} - \hat{1}_0)$$

$$3) \left[\sum_{j=1}^3 b_j \cdot (y_{j,i} + (y_{j,i+1} - y_{j,i}) \cdot c \cdot i) + \sum_{k=0}^2 a_k i^k - y_i \right]^2$$

$$4) S(\mathbf{a}, \mathbf{b}, c) = \sum_{i=i_1}^{i_2} w_i \left[\sum_{j=1}^3 b_j \cdot (y_{j,i} + (y_{j,i+1} - y_{j,i}) \cdot c \cdot i) + \sum_{k=0}^2 a_k i^k - y_i \right]^2$$

$$5) A_j = b_j \beta_j t_0 / t_j$$