

А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, В. Н. Щербин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ НЕОРГАНИЗОВАННЫХ СКОПЛЕНИЙ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Представлены результаты многолетнего мониторинга неорганизованных скоплений жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на нижних отметках объекта «Укрытие». Определены объемы ЖРО и динамика их сезонных изменений. Экспериментально определено содержание макрокомпонентов, урана, продуктов деления (ПД) ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{154,155}\text{Eu}$ и трансурановых элементов (ТУЭ) ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm в ЖРО объекта «Укрытие» в период 1996 – 2015 гг. Концентрация урана в ЖРО объекта «Укрытие» составляла 0,5 – 190 г/м³. Объемная активность ПД в ЖРО находится в пределах $n \cdot 10^7 - n \cdot 10^{11}$ Бк/м³, а ТУЭ в пределах $n \cdot 10^4 - n \cdot 10^8$ Бк/м³. Показано, что сезонные колебания концентрации урана и объемных активностей радионуклидов в ЖРО могут составлять до одного порядка величины. Отношения между активностями $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ и $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ в ЖРО значительно отличаются от аналогичных отношений радионуклидов в топливосодержащих материалах объекта «Укрытие». В период 1996 – 2015 гг. наблюдался устойчивый тренд увеличения концентрации урана и объемных активностей радионуклидов в наибольшем скоплении ЖРО в помещении 001/3.

Ключевые слова: уран, плутоний, америций, жидкие радиоактивные отходы, объект «Укрытие».

Введение

Основными источниками формирования водных потоков и скоплений жидких радиоактивных отходов (ЖРО) внутри объекта «Укрытие» являются атмосферные осадки, конденсат, образующийся в помещениях на нижних отметках объекта «Укрытие» в летние месяцы и пылеподавляющие растворы, поступающие в подкровельное пространство во время проведения сеансов пылеподавления. Водные потоки попадают в помещения, где локализованы топливосодержащие материалы (ТСМ). Взаимодействие воды с конструкционными материалами и ТСМ приводит к образованию ЖРО, содержащие уран, продукты деления (ПД) и трансурановые элементы (ТУЭ) [1 - 11]. ЖРО объекта «Укрытие» представляют собой щелочные гидрокарбонатные растворы с минерализацией 1 – 3 г/дм³ [3].

Некоторые механизмы взаимодействия воды с различными модификациями ТСМ рассмотрены в работах [1, 4]. Ядерная безопасность неорганизованных скоплений радиоактивно загрязненной воды (РЗВ) оценена в работе [8]. В настоящее время скопления ЖРО и донные отложения объекта «Укрытие» являются ядерно безопасными. Радиационные характеристики и объемные активности радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238+239+240}\text{Pu}$ в РЗВ объекта «Укрытие» в период 1996 – 2002 гг. представлены в работах [3, 4].

В результате протечек внутри объекта «Укрытие» с верхних отметок на нижние в помещениях, расположенных ниже отметки +12,5 м, наблюдаются постоянные скопления ЖРО. Суммарный объем ЖРО в контролируемых помещениях в зависимости от периода года составляет 320 – 340 м³ [6]. В период таяния снега и интенсивных осадков небольшие временные скопления воды образуются и на более высоких отметках. С мая по сентябрь, когда температура внутри объекта «Укрытие» ниже, чем снаружи, на нижних отметках происходит образование конденсата.

В работах [10, 11] отмечается, что наряду с сезонными колебаниями концентраций урана и объемной активности радионуклидов в наибольших водных скоплениях наблюдается устойчивый рост содержания урана и ТУЭ в воде помещения 001/3, где по различным оценкам [6] локализовано до 270 м³ ЖРО. Регулярный мониторинг радиационных и ядерных характеристик РЗВ объекта «Укрытие» является одной из задач обеспечения экологической безопасности объекта «Укрытие», так как нельзя исключать возможность попадания РЗВ в грунтовые воды. Объемная активность ^{129}I в воде, поступающей из скважины Ю-9-Б, определена в работе [12].

Формы нахождения радионуклидов и дисперсный состав взвесей ЖРО объекта «Укрытие» изучены в работах [13, 14]. Уран и большая часть ^{137}Cs находятся в растворимом состоянии. ТУЭ и ^{90}Sr ассоциированы в основном с дисперсными частицами различных размеров от 0,01 до 3 мкм.

Цель настоящей работы состояла в исследовании динамики изменения основных радиационных характеристик ЖРО в помещениях объекта «Укрытие».

© А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, В. Н. Щербин, 2016

Материалы и методы

На рис. 1 показана схема расположения некоторых помещений объекта «Укрытие» и направления основных водных потоков. Направление перетока воды сверху вниз из подкровельного пространства в помещения на отметках 0,0 и +2,2 м и с юга на север от машинного зала к блоку вспомогательных систем реакторного отделения (ВСРО). Координаты наибольших скоплений ЖРО и точек отбора проб воды (т. о.) приведены в табл. 1. Суммарный объем ЖРО в контролируемых помещениях в период 2010 - 2015 гг. составлял 310 – 350 м³ (табл. 2). Большая часть водных протечек с верхних отметок объекта «Укрытие» собирается в помещении 001/3 (отметка -2,60 м) ВСРО. Далее водный поток просачивается через разделительную стену по оси 41 и уходит за пределы объекта «Укрытие» на ВСРО 3-го энергоблока. Количество воды в помещении 001/3 в течение года остается практически постоянным и составляет порядка 270 м³. Детальное описание скоплений ЖРО, основные источники и направления перетока воды в помещениях объекта «Укрытие» приведены в работах [3, 11]. Объемы водных скоплений в контролируемых помещениях и динамика перетока в течение года характеризуются сезонной цикличностью. В апреле температура в подкровельном пространстве становится положительной и начинается интенсивное таяние накопившегося в зимний период снега и льда, что приводит к быстрому увеличению влажности на нижних отметках блока. Еще больше влажность возрастает в июне – сентябре, когда температура внутри объекта «Укрытие» ниже, чем снаружи, что приводит к образованию конденсата. В осенне-зимний период в основном происходит испарение влаги, что с уменьшением поступления осадков и вызывает снижение объемов водных скоплений. На рис. 2 показаны суммарные годовые поступления воды в помещение 001/3 из контролируемых источников – из скважины 2.1 - 116 со стороны каскадной стены (т. о. 8) и трубы из парораспределительного коридора (ПРК) (т. о. 20). Сумма годовых осадков в 2014 и 2015 гг. составляла 535 и 536 мм соответственно и была ниже среднего значения 640 ± 110 мм на 100 мм.

Таблица 1. Координаты основных водных скоплений

Помещение	Номер т. о.	Отметка	Ось	Ряд	Примечания
012/5 - 7	32	-0,65	45 - 49	Г - Ж	
012/8	35	-0,65	45 - 49	Г - Ж	
012/6,7,8	31	-0,95	46 - 49	С - Т	Прямоук
009/4	7	0,00	49 - 50	Ж - И	
012/13 - 16	6	+2,20	45 - 49	Г - Ж	
012/13 - 16	21	+2,20	45 - 49	П - Т	
014/2	17	0,00	44 - 45	Ж - И	
017/2	18	0,00	43 - 44	Г - Е	
061/2	13, 36	+6,00	41 - 42	Е - Ж	
001/3	30	- 2,60	41 - 52	У - У ₁	ВСРО 4-го блока
01/3	8	+ 1,25	50-1000	У ₁	Скважина 2.1.- 116
01/3	20	+ 2,20	47 - 48У	У	Труба из ПРК

Таблица 2. Объемы ЖРО в помещениях на нижних отметках, м³

Помещение	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
012/5 - 8	13	15	17	17	11	7,2
012/5 - 8	5,1	2,9	4,7	4,8	2,5	1,0
012/6,7,8	4,8	5,3	8,4	8,4	7,8	5,2
009/4	1,5	2,3	2,1	3,6	2,5	1,4
012/13 - 16	31	26	34	31	21	14
012/13 - 16	3,7	3,5	3,6	3,8	2,8	1,6
013/2	0,7	0,9	1,2	1,1	0,8	0,7
014/2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
017/2	5,2	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
018/2	0,1	0,15	0,2	0,2	0,15	0,1
061/2	3,5	3,4	4,6	4,3	3,6	2,9
001/3	270	270	270	270	270	270
Всего	339	335	351	350	328	310

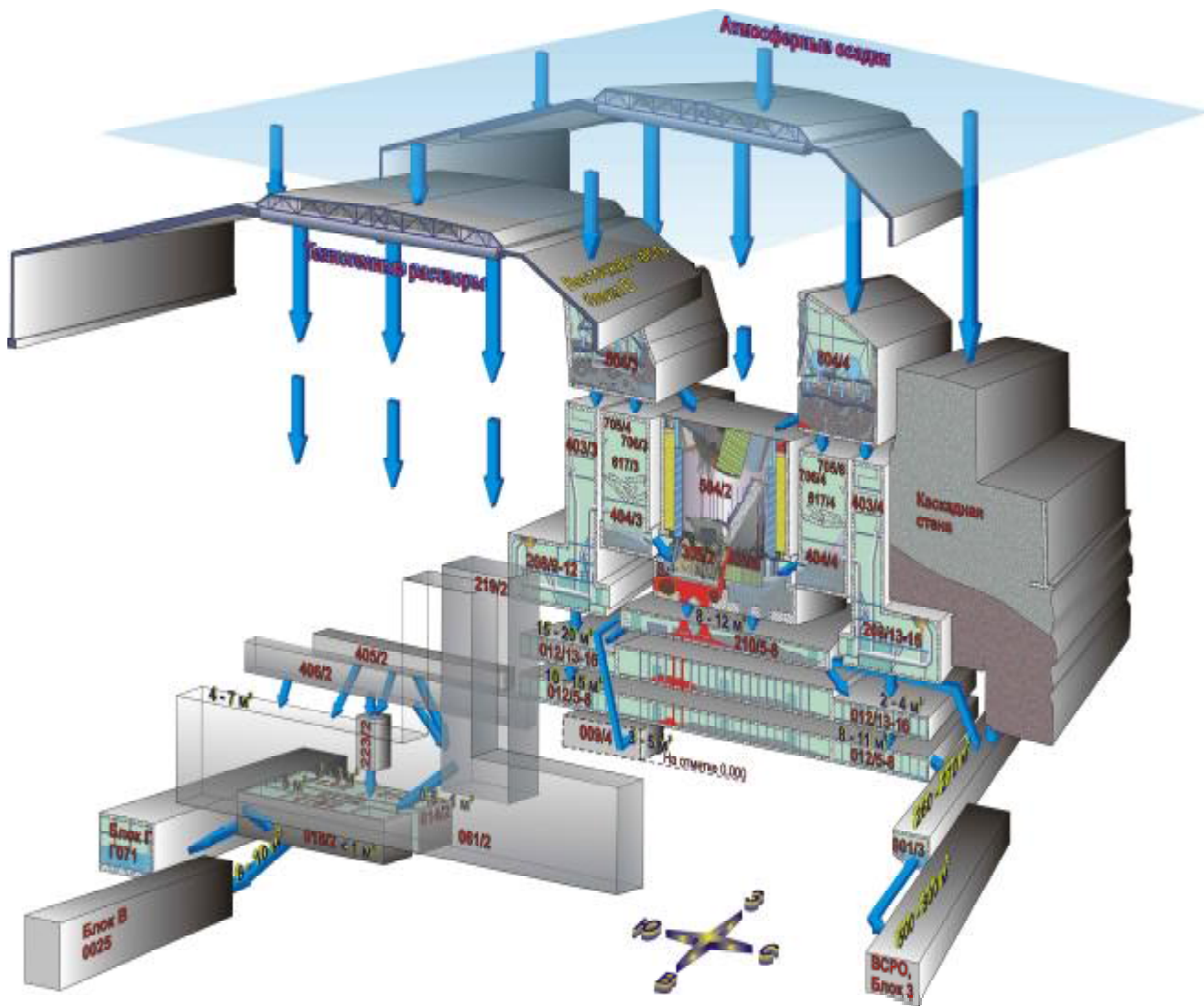


Рис. 1. Схема расположения и направления перетоков основных скоплений ЖРО объекта «Укрытие».

Поступление воды в 2015 г. было минимальным за все время наблюдений: стока из скважины 2.1-116 практически не было, а из трубы из ПРК поступило всего 2,4 м³ ЖРО.

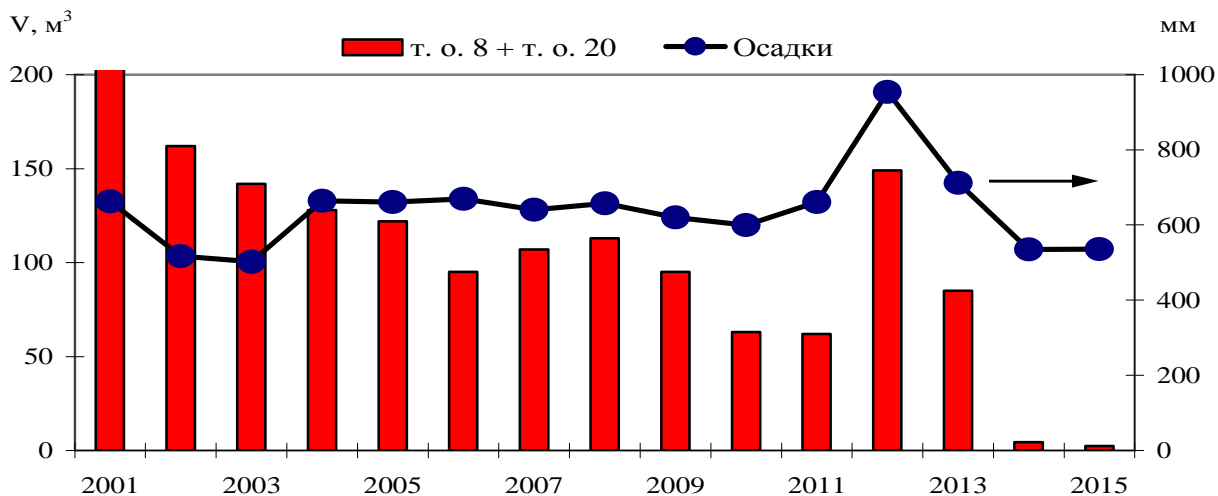


Рис. 2. Динамика поступления воды в помещение 001/1 из скважины 2.1-116 (т. о.8) и трубы из ПРК (т. о. 20).

В юго-восточной части объекта «Укрытие» постоянные водные скопления наблюдаются в южной части коридора 017/2, в помещениях 013/2, 014/2 и 018/2. Водные скопления в этих помещениях формируются за счет протечек с верхних отметок. Уровень воды в южной части помещения 017/2 составляет 25 – 30 см и определяется высотой порога дверного проема в помещение 018/2. При повышении уровня избыток воды через дверные пороги перетекает в помещения 018/2 и 025/3. В качестве примера на рис. 3 приведены фотографии скоплений РЗВ в помещении 017/2 на отметке -0,65 м и помещении 001/3 на отметке -2,60 м. Глубина водного скопления в помещении 001/3 – 1,05 м.



Помещение 017/2



Помещение 001/3

Рис. 3. Неорганизованные водные скопления на нижних отметках объекта «Укрытие».

Содержание урана, плутония, америция и кюрия определяли из одной пробы воды по ионообменной методике [15]. Активность ^{90}Sr определяли β -радиометрическими измерениями после радиохимического выделения, ^{137}Cs , $^{154,155}\text{Eu}$, ^{241}Am – γ -спектрометрическими измерениями, ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm – α -спектрометрическими измерениями после радиохимического выделения. Концентрацию урана определяли спектрофотометрическим методом. Погрешность определения концентрации урана и объемной активности радионуклидов не превышала 10 – 15 %. Концентрации макрокомпонентов определяли по общепринятым методикам.

Результаты и обсуждения

Значения pH и концентрации некоторых анионов и катионов в ЖРО объекта «Укрытие» по состоянию на 2015 г. представлены в табл. 3. Величина pH изменяется от 8,6 до 9,6, что свидетельствует о щелочной среде в водных скоплениях объекта «Укрытие». Химический показатель кислорода (ХПК) находится в пределах 40 – 160 мгО₂/дм³. Концентрация фосфатов (НРО₄²⁻) изменяется от 0,2 до 1,6 мг/дм³. Содержание карбонатов (СО₃²⁻) и гидрокарбонатов (НСО₃⁻) составляет 25 – 630 и 290 – 1440 мг/дм³ соответственно. Концентрация хлоридов (Сl⁻) во всех водных скоплениях примерно одинаковая и составляет 30 – 60 мг/дм³. В ЖРО объекта «Укрытие» содержится от 170 до 440 мг/дм³ сульфат-ионов (SO₄²⁻). В работах [1, 4] отмечается, что карбонаты, сульфаты, хлориды, силикаты, кальций и магний поступают в воду за счет взаимодействия атмосферных осадков и конденсата с конструкционными материалами объекта «Укрытие», в частности со «свежим» бетоном, залитым в помещения объекта «Укрытие» в 1986 г. Концентрация нитратов (NO₃⁻) составляет 40 – 390 мг/дм³. Максимальные концентрации нитратов до 600 мг/дм³ наблюдались в протечках из трубы из ПРК (т. о. 20), из коллектора с отметки +9,0 м в помещение 012/8 (т. о. 35) и в ЖРО помещения 012/13 после сеансов пылеподавления. Фосфаты и нитраты в водные скопления поступают при проведении сеансов пылеподавления. В соответствии с «Технологическим регламентом объекта «Укрытие» реактора блока № 4 ЧАЭС» 1Р-ОУ при выполнении пылеподавления в подкровельное пространство подается до 45 м³ 0,1 %-ный раствор азотнокислого гадолиния Gd(NO₃)₃ · 6 H₂O с начальной концентрацией Gd³⁺ - 520 мг/дм³ и NO₃⁻ - 620 мг/дм³. Динамика изменения концентраций гадолиния и нитрат-ионов в воде помещений объекта «Укрытие» показана на рис. 4 и 5 соответственно.

Таблица 3. Концентрация макрокомпонентов (мг/дм³) в РЗВ объекта «Укрытие»

Номер т. о.	pH	ХПК, мгО ₂ /дм ³	НРО ₄ ²⁻	СО ₃ ²⁻	НСО ₃ ⁻	Сl ⁻	SO ₄ ²⁻
6	9,0	89	0,38	77	510	61	440
7	8,6	28	0,35	25	290	34	170
17	8,8	87	0,74	49	380	31	210
18	9,3	68	0,85	110	450	33	240
20	9,1	86	0,46	68	380	36	170
21	9,6	67	0,41	630	1440	47	180
30	9,2	79	0,57	86	420	39	420
31	9,2	162	1,64	120	710	58	270
32	8,8	43	0,36	48	350	36	310
35	9,1	62	0,28	75	340	29	190
Номер т. о.	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ка ⁺ + Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Zn ²⁺
6	42	1,8	990	21	6,5	4,1	1,4
7	53	3,7	290	32	6,6	4,9	1,1
17	84	3,3	520	16	2,8	4,3	0,95
18	41	2,8	680	8,8	3,1	4,6	1,2
20	57	2,9	490	27	8,2	5,6	0,67
21	390	0,39	2050	2,4	1,9	3,3	0,63
30	89	2,4	740	18	4,7	3,9	0,76
31	120	1,8	920	19	5,2	4,8	0,97
32	49	2,8	350	31	6,5	6,1	2,1
35	52	1,6	470	17	4,4	3,9	0,75

Концентрация катионов калия и натрия (K⁺ + Na⁺) в ЖРО объекта «Укрытие» изменяется от 290 до 2050 мг/дм³, что на один-два порядка величины больше, чем кальция и магния. Содержание железа и цинка в пробах воды из различных водных скоплений составляет 3 – 6 и 0,6 – 2,1 мг/дм³ соответственно. Концентрация Ca²⁺ в воде помещения 012/13 составляет 2,4 мг/дм³, что почти в 10 раз меньше, чем в других водных скоплениях. Это можно объяснить тем, что в воде помещения 012/13 самая высокая концентрация СО₃²⁻, в результате чего образуются труднорастворимые карбонаты кальция, магния и стронция.

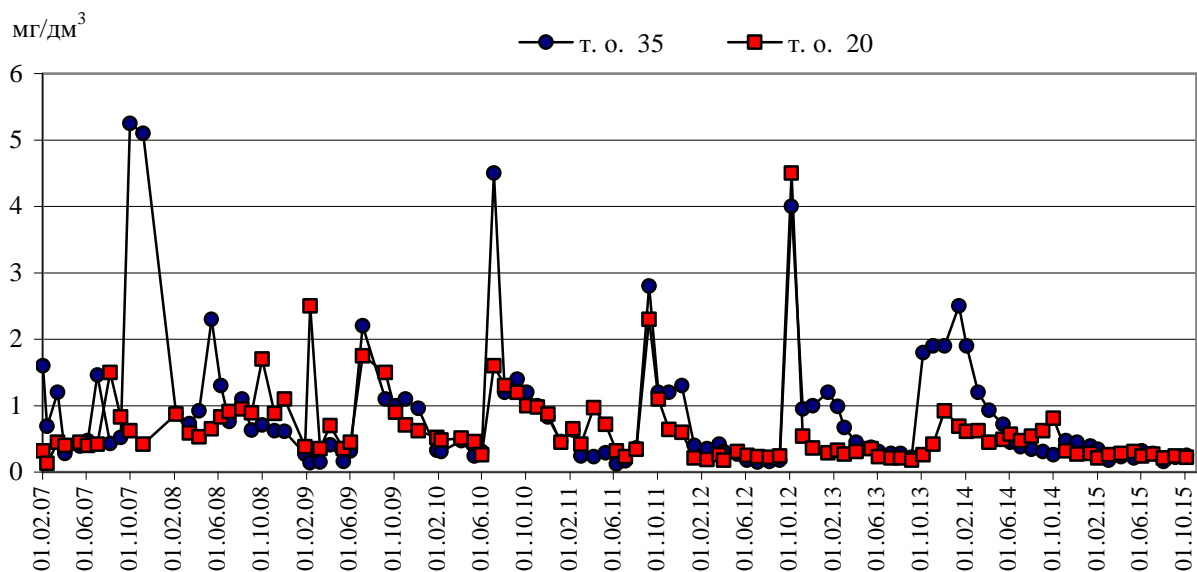


Рис. 4. Концентрация гадолиния в воде, отобранной в помещениях 01/3 (труба из ПРК, т. о. 20) и 012/8 (т. о. 35).

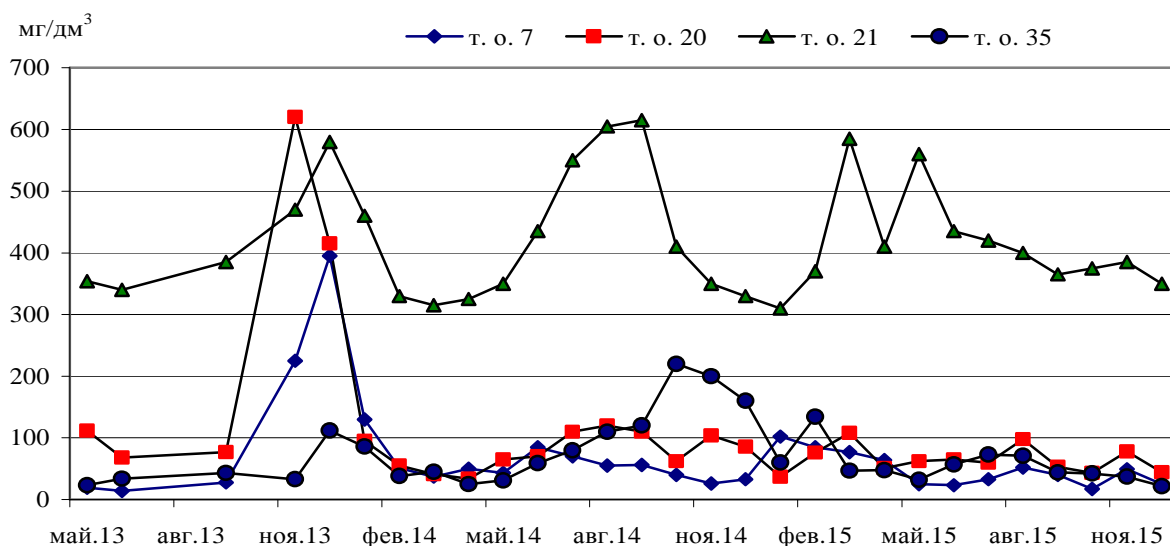


Рис. 5. Концентрация NO_3^- в воде, отобранной в помещениях 009/4 (т. о. 7), 012/13 (т. о. 21), 01/3 (т. о. 20) и 012/8 (т. о. 35).

В табл. 4 приведены усредненные данные по 12 пробам (ежемесячный отбор в каждой точке) за 2015 г. гамма-спектрометрических измерений и радиохимического анализа проб ЖРО, отобранных на нижних отметках объекта «Укрытие». Результаты представлены с отклонениями от среднего значения, которые изменяются от 10 до 90 % и характеризуют сезонные изменения концентраций урана и объемных активностей радионуклидов в ЖРО различных водных скоплениях. Наименьший разброс среднегодовых значений концентрации урана и объемной активности радионуклидов наблюдается в малопроточных скоплениях РЗВ, локализованных в помещениях 009/4, северной части помещений 012/5 – 8 и в помещениях 012/13 – 16. Наибольшие изменения концентраций урана и объемной активности ^{90}Sr и ТУЭ в течение года наблюдаются в протечках, поступающих из трубы из ПРК (т. о. 20) и коллектора с отметки +9,0 м (т. о. 35), и в помещении 017/2, через которое проходит основной водопроток в юго-восточной части блока Б.

Таблица 4. Содержание урана (г/м^3) и радионуклидов (Бк/м^3) в ЖРО объекта «Укрытие»

Номер т. о.	Уран	^{90}Sr	^{137}Cs	^{154}Eu	^{155}Eu
6	14 ± 2	$(2,8 \pm 0,8) \cdot 10^9$	$(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{10}$	$(3,9 \pm 0,6) \cdot 10^6$	$(6,8 \pm 1,1) \cdot 10^5$
7	12 ± 3	$(3,8 \pm 0,8) \cdot 10^9$	$(7,5 \pm 0,4) \cdot 10^9$	$(4,4 \pm 2,7) \cdot 10^6$	$(6,8 \pm 4,4) \cdot 10^5$
17	$2,1 \pm 1,7$	$(1,5 \pm 0,7) \cdot 10^8$	$(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^9$	$(3,1 \pm 2,6) \cdot 10^5$	$(5,6 \pm 5,4) \cdot 10^4$
18	$0,46 \pm 0,18$	$(2,6 \pm 0,6) \cdot 10^7$	$(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^9$	$(3,5 \pm 2,2) \cdot 10^4$	$(5,5 \pm 4,1) \cdot 10^3$
20	39 ± 11	$(4,9 \pm 2,5) \cdot 10^9$	$(2,3 \pm 0,7) \cdot 10^{10}$	$(1,6 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(2,5 \pm 1,2) \cdot 10^5$
21	$2,8 \pm 0,7$	$(1,9 \pm 0,5) \cdot 10^7$	$(5,5 \pm 0,9) \cdot 10^9$	$(2,8 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(4,8 \pm 1,7) \cdot 10^4$
30	$9,7 \pm 1,3$	$(1,9 \pm 0,4) \cdot 10^9$	$(8,9 \pm 1,1) \cdot 10^9$	$(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(3,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$
31	38 ± 6	$(3,6 \pm 1,2) \cdot 10^9$	$(2,9 \pm 0,3) \cdot 10^{10}$	$(5,4 \pm 1,1) \cdot 10^6$	$(1,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$
32	21 ± 7	$(5,6 \pm 1,9) \cdot 10^9$	$(2,4 \pm 0,6) \cdot 10^{10}$	$(5,2 \pm 4,6) \cdot 10^6$	$(9,1 \pm 7,6) \cdot 10^5$
35	$9,7 \pm 6,6$	$(4,3 \pm 2,1) \cdot 10^9$	$(2,3 \pm 1,4) \cdot 10^{10}$	$(7,8 \pm 3,2) \cdot 10^5$	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^5$

Номер т. о.	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am	^{244}Cm	^{242}Cm
6	$(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(3,7 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(2,8 \pm 0,5) \cdot 10^7$	$(8,1 \pm 1,3) \cdot 10^5$	$(4,5 \pm 0,7) \cdot 10^4$
7	$(9,7 \pm 5,6) \cdot 10^5$	$(1,9 \pm 1,1) \cdot 10^6$	$(2,1 \pm 1,3) \cdot 10^7$	$(6,5 \pm 3,9) \cdot 10^5$	$(4,8 \pm 3,1) \cdot 10^4$
17	$(1,3 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(3,1 \pm 2,6) \cdot 10^5$	$(1,4 \pm 1,2) \cdot 10^6$	$(2,9 \pm 2,6) \cdot 10^4$	$(2,7 \pm 2,4) \cdot 10^3$
18	$(2,2 \pm 0,9) \cdot 10^4$	$(5,6 \pm 2,3) \cdot 10^4$	$(2,1 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(3,3 \pm 1,8) \cdot 10^3$	$(3,2 \pm 1,8) \cdot 10^2$
20	$(8,7 \pm 3,7) \cdot 10^5$	$(1,9 \pm 0,8) \cdot 10^6$	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^7$	$(2,6 \pm 1,2) \cdot 10^5$	$(2,3 \pm 1,2) \cdot 10^4$
21	$(3,4 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(6,9 \pm 1,8) \cdot 10^5$	$(2,4 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(6,5 \pm 1,8) \cdot 10^4$	$(2,7 \pm 0,9) \cdot 10^3$
30	$(5,3 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^6$	$(9,7 \pm 2,1) \cdot 10^6$	$(2,8 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$(1,7 \pm 0,4) \cdot 10^4$
31	$(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(2,5 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(2,6 \pm 0,6) \cdot 10^7$	$(8,2 \pm 1,9) \cdot 10^5$	$(3,2 \pm 0,8) \cdot 10^4$
32	$(1,4 \pm 1,0) \cdot 10^6$	$(2,8 \pm 1,9) \cdot 10^6$	$(2,7 \pm 2,2) \cdot 10^7$	$(7,7 \pm 6,6) \cdot 10^5$	$(4,8 \pm 3,8) \cdot 10^4$
35	$(2,3 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(5,1 \pm 2,4) \cdot 10^5$	$(3,8 \pm 1,3) \cdot 10^6$	$(9,7 \pm 3,5) \cdot 10^4$	$(8,7 \pm 3,5) \cdot 10^3$

Концентрация урана в ЖРО находится в пределах $0,5 - 40 \text{ г/м}^3$ при наибольшем значении 54 г/м^3 в июле 2015 г. в т. о. 20 (труба из ПРК). Максимальная концентрация урана в ЖРО объекта «Укрытие» в период наблюдения 1996 – 2015 гг. была в помещении 012/7 (т. о. 32) и составляла 367 г/м^3 в марте 2000 г. и 1100 г/м^3 в январе 2002 г.

Объемная активность ^{90}Sr в ЖРО в зависимости от места отбора проб в 2015 г. изменялась от $1,9 \cdot 10^7$ до $5,6 \cdot 10^9 \text{ Бк/м}^3$. Максимальная объемная активность ^{90}Sr в ЖРО объекта «Укрытие» наблюдалась в 2000 г. – $2,4 \cdot 10^{10}$, 2002 г. – $4,6 \cdot 10^{10}$ и 2012 г. – $3,6 \cdot 10^{10} \text{ Бк/м}^3$.

Изменения объемной активности ^{137}Cs в постоянных скоплениях ЖРО и быстрых протечках радиоактивно загрязненной воды наименьшие относительно других радионуклидов. Объемная активность ^{137}Cs в ЖРО изменялась в 2015 г. от $1,2 \cdot 10^9$ (т. о. 18) до $2,9 \cdot 10^{10}$ (т. о. 31) Бк/м^3 . Наибольшие объемные активности ^{137}Cs в ЖРО наблюдались в южной части помещения 012/7 (т. о. 32) в 2000 г. – $3,2 \cdot 10^{11}$, в 2002 г. $1,2 \cdot 10^{12}$ и $1,4 \cdot 10^{11} \text{ Бк/м}^3$ в июне 2012 г.

Объемная активность относительно короткоживущих изотопов ^{154}Eu ($T_{1/2} - 8,8$ лет) и ^{155}Eu ($T_{1/2} - 4,9$ лет) в ЖРО находится в пределах $5,5 \cdot 10^3 - 5,4 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^3$. В июле 2012 г. в помещении 012/7 (т. о. 32) была максимальная объемная активность ^{154}Eu и ^{155}Eu – $2,7 \cdot 10^8$ и $6,2 \cdot 10^7 \text{ Бк/м}^3$ соответственно.

Суммарная α -активность ТУЭ ($^{238}\text{Pu} + ^{239+240}\text{Pu} + ^{241}\text{Am} + ^{244}\text{Cm} + ^{242}\text{Cm}$) изменяется от $1 \cdot 10^6$ до 10^8 Бк/м^3 . Следует отметить, что объемная активность ^{244}Cm в ЖРО объекта «Укрытие» практически равна объемной активности ^{238}Pu . Наличие в ЖРО объекта «Укрытие» ^{242}Cm обусловлено распадом материнского радионуклида $^{242\text{m}}\text{Am}$, который является мягким β -излучателем. Наибольший вклад в суммарную α -активность вносит ^{241}Am – более 80 %.

Динамика концентраций радионуклидов, урана и ТУЭ в помещении 001/3 обусловлена поступлением высокоактивных протечек со стороны бассейна-барботера и низкоактивных протечек со стороны каскадной стены. Переток ЖРО из бассейна-барботера в помещение 001/3 и, как следствие, повышение концентрации радионуклидов начинается в период интенсивного поступления влаги в объекте «Укрытие» в весенне-летний период. Преимущественное поступление низкоактивных протечек со стороны каскадной стены осенью и зимой приводит к разбавлению ЖРО в помещении 001/3. На рис. 6 представлена динамика среднегодовых объемных активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs , $^{238+239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в скоплении ЖРО в помещении 001/3 с 1996 по 2015 гг. Наложение линий временного тренда, имеющих экспоненциальный характер, показывает, что для указанных радионуклидов в водном скоплении помещения 001/3 в целом продолжает сохраняться тенденция к увеличению их объемных активностей.

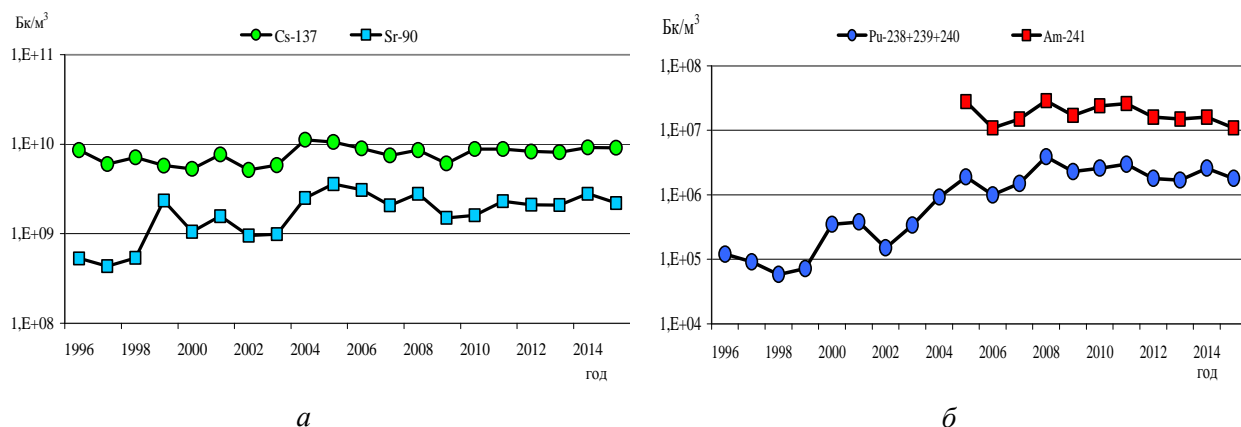


Рис. 6. Динамика среднегодовых объемных активностей радионуклидов в скоплении ЖРО в помещении 001/3 (т. о. 30) с 1996 г. по декабрь 2015 г. (а - ^{90}Sr и ^{137}Cs ; б - $^{238+239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am).

На рис. 7 представлена динамика среднегодовых объемных активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs , $^{238+239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в протечках ЖРО из ПРК в помещении 01/3. Наложение линий временного тренда, имеющих экспоненциальный характер, показывает, что для указанных радионуклидов в протечках в целом сохраняется тенденция к увеличению их концентраций.

Динамика изменений концентраций урана и объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в водных скоплениях, локализованных на 1-м и 2-м этажах бассейна-барботера показана на рис. 8 и 9 соответственно. Скопления ЖРО в южной части помещений 012/5-8 (т. о. 32) и северной части этих помеще-

ний (т. о. 31) на отметке -0,65 м разделены помещениями центральной части - ряды Ж – П (рис. 10), где вода отсутствует. В настоящее время гидравлическая связь между этими помещениями отсутствует. Возможен переток ЖРО в эти помещения из водных скоплений, локализованных выше на отметках +2,20 м и +6,0, однако экспериментальные данные свидетельствуют о том, что объемы перетока из данных помещений незначительны. Скопления ЖРО в южной части помещений 012/13-16 (т. о. 21) и северной части (т. о. 6) на отметке +2,20 м разделены помещениями центральной части, ряды Ж – П (рис. 10), где, вероятно, имеются водные скопления, к которым доступа нет. При значительном увеличении уровня воды в центральной части помещений 012/13 - 16 происходит переток ЖРО в северную часть помещения 012/13 (т. о. 21) и южную часть помещения 012/7 (т. о. 32), в результате чего происходит резкое возрастание концентрации урана и объемной активности радионуклидов в т. о. 21 и 32 (рис 8 и 9). Одновременно с увеличением концентрации урана и объемных активностей радионуклидов наблюдается значительное увеличение концентрации карбонатов и гидрокарбонатов в воде этих помещений (рис. 11).

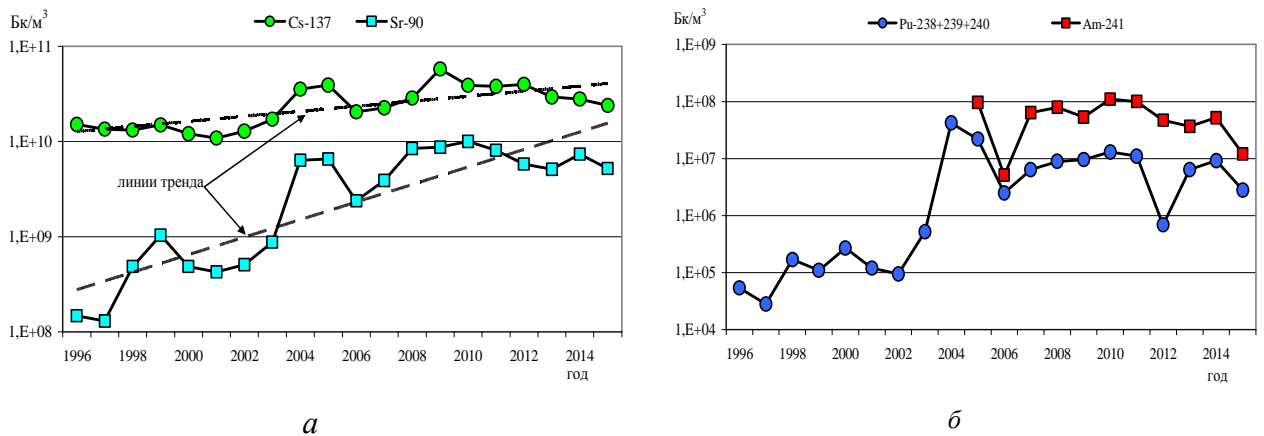


Рис. 7. Динамика среднегодовых объемных активностей радионуклидов в скоплении ЖРО в помещении 01/3 труба из ПРК (т.о. 20) с 1996 г. по декабрь 2015 г. (а - ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs; б - ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am).

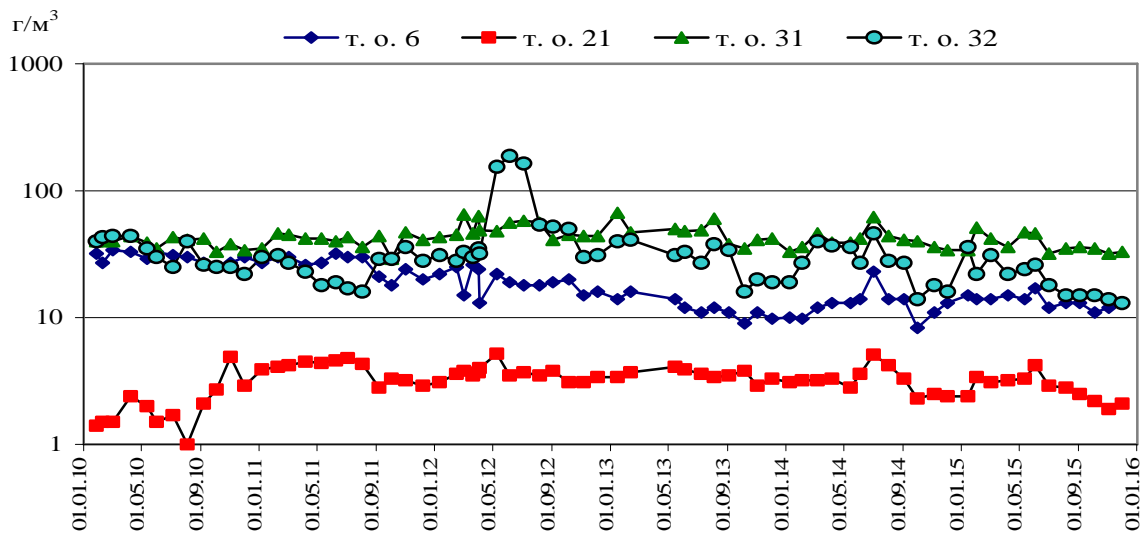


Рис. 8. Динамика концентрации урана в воде помещений 012/16 (т. о. 6), 012/13 (т. о. 21), 012/6 (т. о. 31) и 012/7 (т. о. 32).

На рис. 8 и 9 хорошо видно, что в помещении 012/13 значительное увеличение концентрации урана и объемных активностей радионуклидов произошло летом 2010 г., а в помещении 012/7 весной 2012 г. Причины таких изменений были различные. Так, летом 2010 г. в июле - августе были максимальные среднемесячные температуры воздуха (рис. 12), что привело к образованию большого количества конденсационной влаги и высокоактивная вода стала поступать из центральной части помещения 012/13 через трубу в разделительной стене на отметке +2,4 м в северную часть помещения

012/13. В результате низкой температуры в январе – феврале 2012 г. на отметках + 6,0 и + 9,0 образовалось большое количество льда. Вода, которая испарялась из незамерзающих водных скоплений на нулевой отметке, замерзала на более высоких отметках. Весной при повышении температуры лед начал таять и вода поступала в помещения ПРК и центральную часть помещения 012/15 и дальше в южную часть помещения 012/7. В результате высокоактивная вода была зафиксирована в помещении 012/7 (т. о. 32).

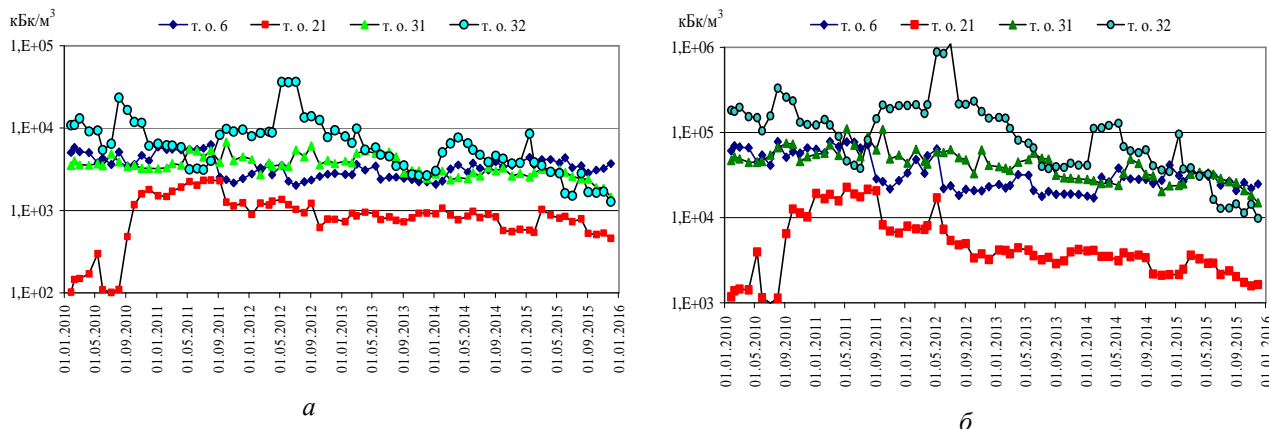


Рис. 9. Объемная активность радионуклидов в скоплениях ЖРО помещений бассейна-барботера (т. о. 6, 21, 31 и 32): а - $^{239+240}\text{Pu}$; б - ^{241}Am .

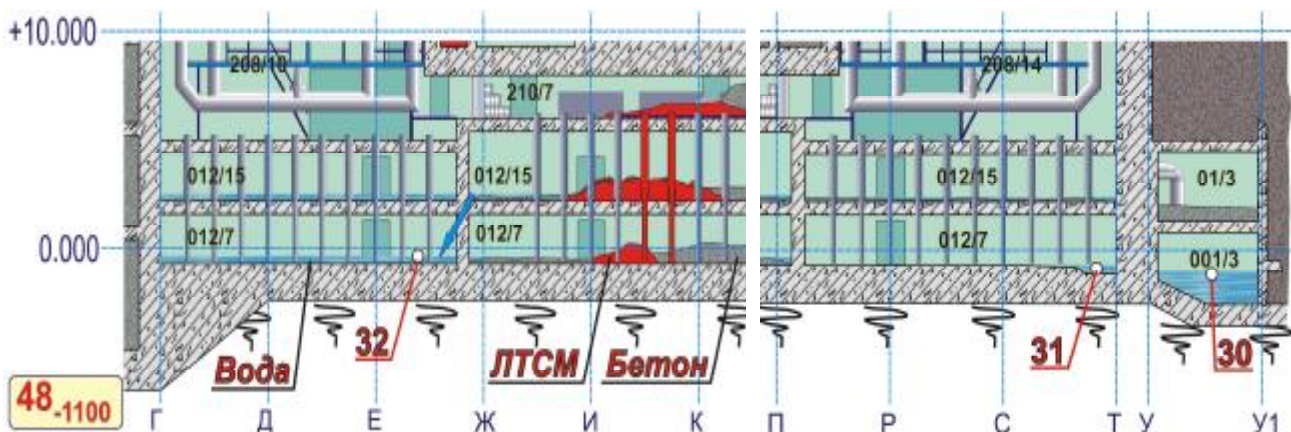


Рис. 10. Разрез помещений бассейна-барботера и ПРК по оси 48.

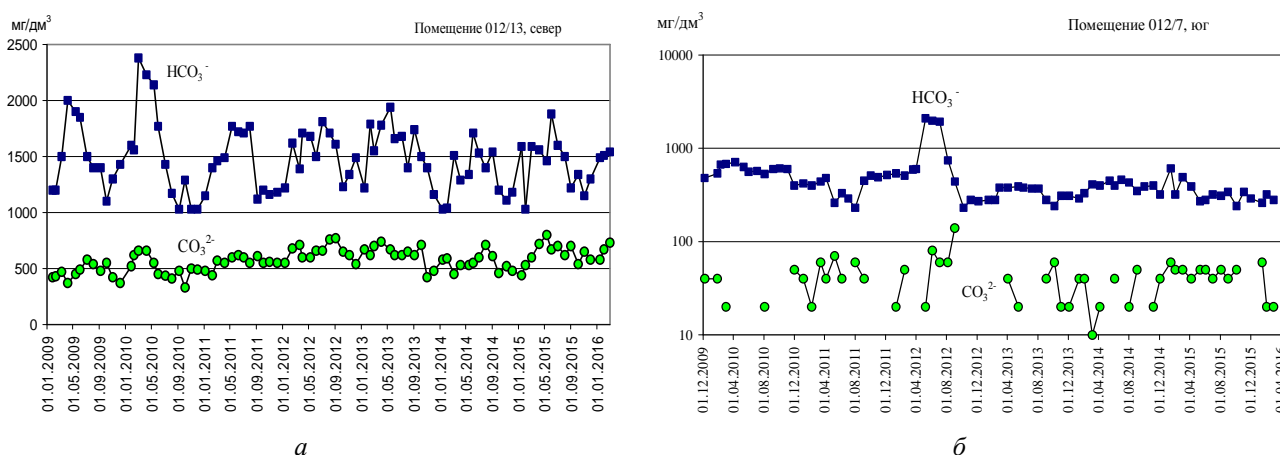


Рис. 11. Концентрации карбонат-ионов CO_3^{2-} и гидрокарбонатов HCO_3^- в воде помещений: а - 012/13 север; б - 012/7 юг.

На рис. 13 показана динамика изменения концентрации урана в ЖРО помещения 001/3 в период 1996 – 2015 гг. Линия тренда показывает устойчивый рост концентрации урана в этом скоплении ЖРО. Это является результатом того, что с марта 2013 г. заметно уменьшилось поступление воды из скважины 2.1–116, а приток ЖРО из ПРК уменьшился незначительно. Эта же тенденция наблюдается и в 2014 - 2015 гг. Самая высокая концентрация урана и объемные активности радионуклидов зафиксированы в 2004 г. в период опытных пусков модернизированной системы пылеподавления.

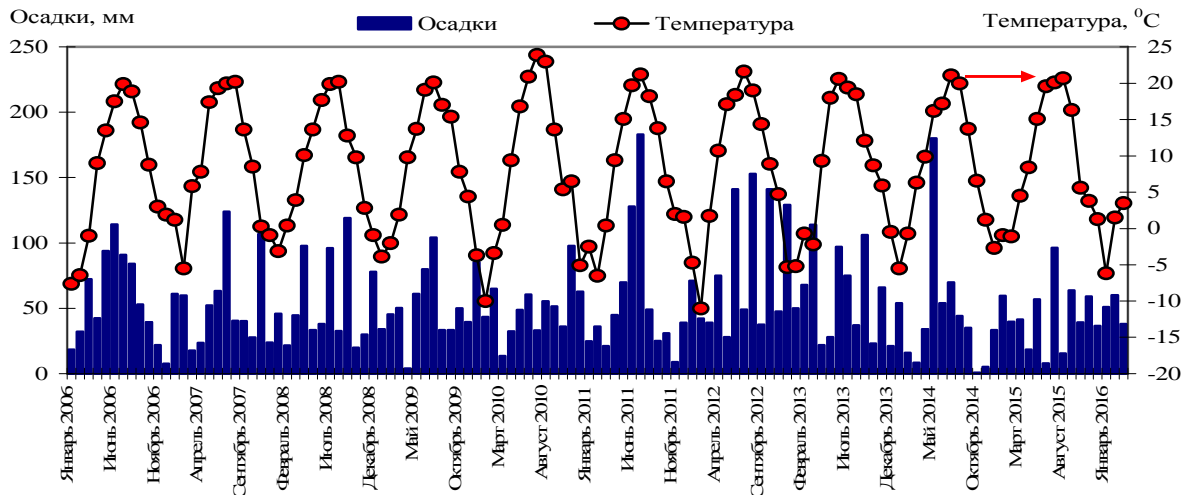


Рис. 12. Сезонные изменения среднемесячной температуры окружающего воздуха и количества атмосферных осадков.

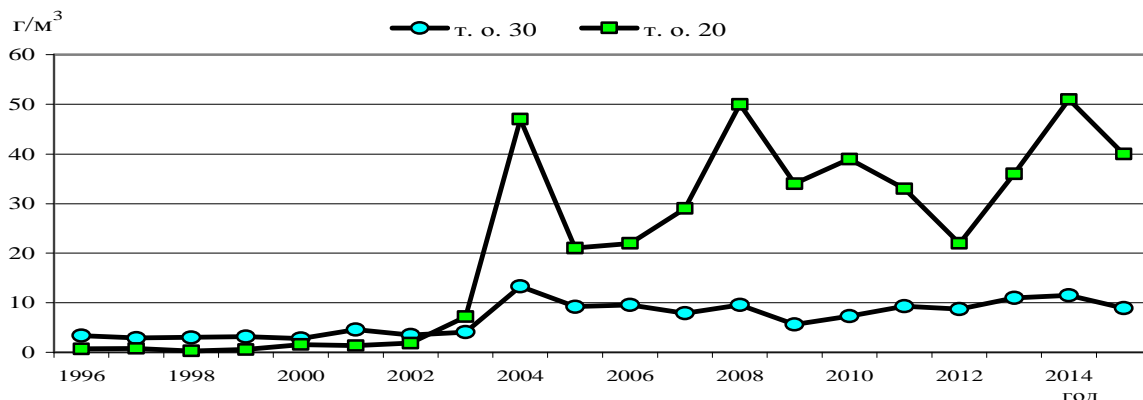


Рис. 13. Концентрации урана в воде помещения 001/3 (т. о. 30) и 01/3 (т. о. 20).

Для оценки ядерной и радиационной безопасности скоплений ЖРО необходимо знать не только валовое содержание урана, но и его изотопный состав, в частности массовую долю ^{235}U . Содержание изотопов урана в ЖРО объекта «Укрытие» определяли масс-спектрометрическими и α -спектрометрическими измерениями изотопов урана, выделенных из проб ЖРО. Концентрация ($\text{г}/\text{м}^3$) изотопов ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U в пробах ЖРО, отобранных в водном скоплении помещения 001/3 объекта «Укрытие», представлена в табл. 5. Массовые доли изотопов урана рассчитывали по результатам обработки α -спектров урана.

Таблица 5. Концентрация ($\text{г}/\text{м}^3$) и массовые доли изотопов урана (%) в ЖРО помещения 001/3 объекта «Укрытие»

Год	^{234}U		^{235}U		^{236}U		^{238}U	
	$\text{г}/\text{м}^3$	%	$\text{г}/\text{м}^3$	%	$\text{г}/\text{м}^3$	%	$\text{г}/\text{м}^3$	%
2010	0,0012	0,0161	0,077	1,05	0,016	0,212	7,24	98,73
2011	0,0019	0,0160	0,12	1,02	0,021	0,175	11,9	98,84
2012	0,0013	0,0164	0,074	0,92	0,013	0,177	7,98	98,93
2013	0,0015	0,0144	0,11	1,05	0,019	0,183	10,5	98,78
2014	0,0017	0,0173	0,090	0,91	0,021	0,212	9,75	98,88
2015	0,0019	0,0152	0,11	0,92	0,023	0,184	12,3	98,89

Доли урана ^{235}U и ^{236}U в пробах ЖРО помещения 001/3, отобранных в период 2010 – 2015 гг., составляют 0,91 – 1,05 % и 0,175 – 0,212 %, что хорошо согласуется с расчетными значениями для среднего выгорания топлива 4-го блока ЧАЭС. Данные, полученные α -спектрометрическими измерениями хорошо согласуются с результатами масс-спектрометрических измерений. Максимальное содержание урана в ЖРО объекта «Укрытие» наблюдалось в июне 2012 г. и составляло 180 – 190 г/м³, при этом концентрация ^{235}U не превышала 1,7 г/м³.

Наряду с абсолютными значениями объемной активности радионуклидов в ЖРО для выявления механизмов взаимодействия воды с ТСМ и особенностями миграции радионуклидов с водными потоками большое значение имеют отношения между активностями различных радионуклидов, которые представляют элементы различных групп периодической системы элементов. В табл. 6 представлены отношения активности различных радионуклидов и изотопов в пробах ЖРО.

Таблица 6. Соотношения между активностями радионуклидов в ЖРО объекта «Укрытие» (2015 г.)

Номер т. о.	$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$
6	9,3	760	0,490	7,54	0,22
7	1,9	1980	0,506	10,9	0,34
17	8,7	490	0,416	4,75	0,098
18	46	460	0,389	3,59	0,059
20	4,7	2600	0,464	5,80	0,13
21	290	28	0,501	3,45	0,095
30	4,7	1700	0,472	8,61	0,25
31	8,1	1430	0,484	10,5	0,33
32	4,3	1990	0,486	9,65	0,27
35	5,3	8530	0,460	7,62	0,19
Среднее	10,3 ± 9,8*	2220 ± 1850*	0,467 ± 0,037	7,24 ± 2,74	0,198 ± 0,101
**	1,21	45	0,468	1,84	0,055
Номер т. о.	$^{242\text{m}}\text{Am}/^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}/^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}/^{242}\text{Cm}^{***}$	$^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$	$^{154}\text{Eu}/^{155}\text{Eu}$
6	0,0020	0,029	17,6	6,96	5,85
7	0,0027	0,031	13,7	4,91	6,43
17	0,0023	0,021	11,2	4,80	5,41
18	0,0019	0,017	10,7	5,73	6,38
20	0,0026	0,023	10,9	6,73	6,48
21	0,0014	0,028	24,2	8,28	5,84
30	0,0021	0,029	16,4	5,51	5,83
31	0,0014	0,031	25,9	4,89	5,45
32	0,0022	0,028	15,9	5,23	5,74
35	0,0028	0,026	11,2	4,88	6,11
Среднее	0,0021 ± 0,0005	0,026 ± 0,005	15,8 ± 5,5	5,79 ± 1,17	5,95 ± 0,39
**	----	0,030	----	3,3	6,8

* Без т. о. 21.

** Расчет для топлива на 1 июля 2015 г. [16].

*** ^{242}Cm дочерний изотоп $^{242\text{m}}\text{Am}$.

Отношения активностей $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ и $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ в пробах ЖРО, отобранных в разных помещениях, значительно отличаются. Эти отношения также отличаются от аналогичных отношений в лавообразных ТСМ (ЛТСМ), что свидетельствует как о разной степени выщелачивания радионуклидов из ТСМ, так и о различном поведении радионуклидов в щелочных гидрокарбонатных растворах, которыми являются ЖРО объекта «Укрытие». Отношение активностей $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ для всех исследованных скоплений ЖРО выше, чем в ЛТСМ и облученном топливе 4-го блока ЧАЭС, и изменяется от 1,9 до 46 за исключением северной части помещения 012/13, где это отношение составляет 290. Следует отметить, что отношение $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ в этом скоплении минимальное и даже ниже, чем в ЛТСМ. Вероятно, из-за высокого содержания карбонатов более 600 мг/дм³ и соответственно высокого pH 9,8 в данном скоплении ЖРО происходит соосаждение стронция совместно с карбонатом кальция в виде SrCO₃. Это подтверждается тем, что в воде данного скопления наименьшая концентрация кальция 3 мг/дм³ при средней концентрации кальция для остальных водных скоплений 19 мг/дм³ (см. табл. 3).

Отношения активностей $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ и $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ изменяются от 0,095 до 0,34 и от 3,5 до 11 соответственно. Изменения среднегодовых значений отношений активности $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ показаны на рис. 14. Как видно, на рисунке максимальные значения отношений активности $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ наблюдались в 2012 г. В период 2014 – 2015 гг. относительное содержание ^{241}Am в ЖРО объекта «Укрытие» снизилось. В ЖРО и ЛТСМ отношение активности $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ с учетом погрешности определения хорошо совпадают, за исключением т. о. 6 и 21. Расчетное значение для базового топлива 3,3 в два раза ниже среднего значения $5,8 \pm 1,2$ для ЖРО. Это обусловлено ошибкой в расчете наработки изотопов ^{154}Eu и ^{155}Eu в топливе 4-го блока ЧАЭС за время штатной работы блока.

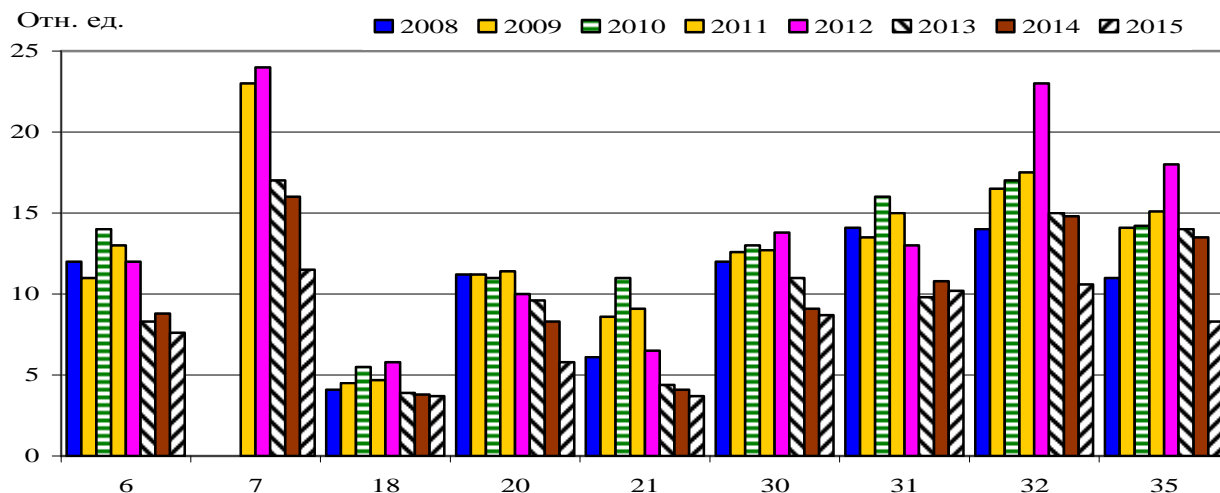


Рис. 14. Отношение активности $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ в ЖРО объекта «Укрытие»

Хорошо известно, что отношение активности изотопов плутония характеризует глубину выгорания облученного ядерного топлива $B = 2,92 + 30,26(^{238}\text{Pu}/^{238+239+240}\text{Pu}) \text{ МВт} \cdot \text{сут}/(\text{кг U})$ [17]. В исследованных пробах ЖРО отношение $^{238}\text{Pu}/^{39+240}\text{Pu}$ находится в интервале 0,39 – 0,51, что соответствует глубине выгорания топлива 11 - 13 МВт · сут/(кг U). Изменения среднегодовых значений отношений активности $^{238}\text{Pu}/^{39+240}\text{Pu}$ в ЖРО объекта «Укрытие» представлены на рис. 15.

Среднее значение отношений активностей $^{154}\text{Eu}/^{155}\text{Eu}$ для обследованных скоплений ЖРО составляет $5,9 \pm 0,4$, что немного ниже для измеренных значений отношений активностей $^{154}\text{Eu}/^{155}\text{Eu}$ в ЛТСМ и расчетного для базового топлива.

На рис. 16 показаны зависимости между отношениями активностей $^{244}\text{Cm}/^{242}\text{Cm}$ и $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ и $^{244}\text{Cm}/^{242}\text{Cm}$ и $^{154}\text{Eu}/^{155}\text{Eu}$ в ЖРО различных помещений объекта «Укрытие». Наблюдается удовлетворительная корреляция между отношениями изотопов кюрия, плутония и европия, что соответствует расчетам наработки изотопов кюрия, плутония и европия в зависимости от глубины выгорания топлива реактора 4-го блока ЧАЭС.

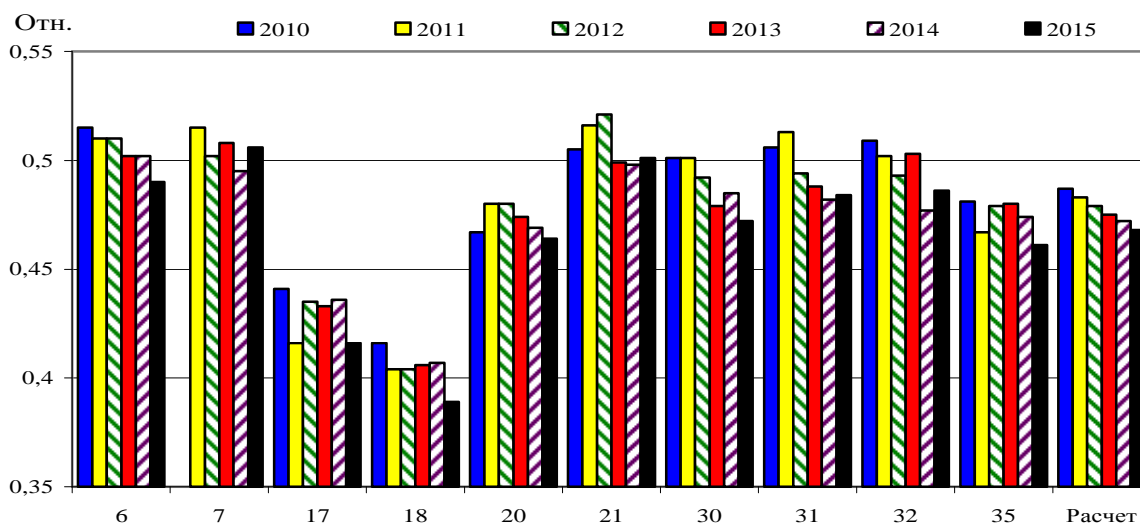


Рис. 15. Отношения активности $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в ЖРО объекта «Укрытие».

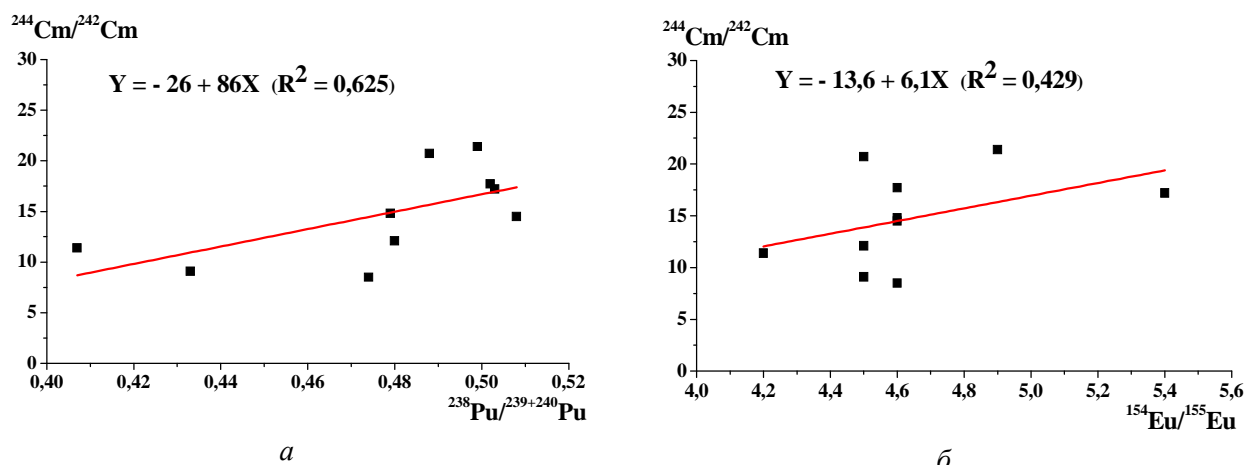


Рис. 16. Корреляционная зависимость между отношениями активностей $^{244}\text{Cm}/^{242}\text{Cm}$ и $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (а) и $^{244}\text{Cm}/^{242}\text{Cm}$ и $^{154}\text{Eu}/^{155}\text{Eu}$ (б) в ЖРО различных помещений объекта «Укрытие».

Выводы

В период 2014 – 2015 гг. объемы воды в неорганизованных скоплениях на нижних отметках объекта «Укрытие» за исключением помещения 001/3 значительно снизились.

Объемная активность радионуклидов в ЖРО объекта «Укрытие» в 2015 г. составляла: ^{90}Sr – $1,9 \cdot 10^7$ – $5,6 \cdot 10^9$, ^{137}Cs – $1,2 \cdot 10^9$ – $2,9 \cdot 10^{10}$, ^{154}Eu – $3,5 \cdot 10^4$ – $5,4 \cdot 10^6$, ^{238}Pu – $2,2 \cdot 10^4$ – $1,8 \cdot 10^6$, $^{239+240}\text{Pu}$ – $5,6 \cdot 10^4$ – $3,7 \cdot 10^6$, ^{241}Am – $2,1 \cdot 10^5$ – $2,8 \cdot 10^7$, ^{244}Cm – $3,3 \cdot 10^3$ – $8,2 \cdot 10^5$ Бк/м³.

В водном скоплении помещения 001/3 продолжает сохраняться тенденция к увеличению концентрации урана и объемной активности радионуклидов.

Отношения активностей $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ и $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ в РЗВ, отобранных в разных помещениях, заметно отличаются. Эти отношения также отличаются от аналогичных отношений в ЛТСМ, что свидетельствует как о разной степени выщелачивания радионуклидов из ТСМ, так и о различном поведении радионуклидов в щелочных гидрокарбонатных растворах, которыми являются РЗВ объекта «Укрытие».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов С. А., Корнеев А. А., Криницин А. П. и др. Исследования водотоков внутри объекта «Укрытие» // Радиохимия. – 2000. – Т. 42, № 3. – С. 276 – 280.
2. Щербин В. Н., Криницин А. П., Стрихарь О. Л. Определение ^{235}U в водотоках объекта «Укрытие» // Радиохимия. – 2000. – Т. 42, № 3. – С. 281 – 283.
3. Корнеев А. А., Криницин А. П., Стрихарь О. Л., Щербин В. Н. Жидкие радиоактивные отходы внутри объекта «Укрытие» // Радиохимия. – 2002. – Т. 44, № 6. – С. 545 – 552.
4. Криницин А. П., Стрихарь О. Л., Щербин В. Н. Проблема обращения с жидкими радиоактивными отходами объекта «Укрытие» // Радиохимия. – 2003. – Т. 45, № 5. – С. 461 – 465.
5. Одинцов А. А., Хан В. Е., Краснов В. А. и др. Трансурановые элементы в жидких радиоактивных отходах объекта «Укрытие» // Радиохимия. – 2009. – Т. 51, № 4. – С. 337 – 343.
6. Ключников А. А., Краснов В. А., Щербин В. Н., Рудько В. М. Объект «Укрытие»: 1986 – 2001. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2011. – 286 с.
7. Павлюченко Н. И., Хан В. Е., Криницин А. П. и др. Контроль неорганизованных сбросов и выбросов из объекта «Укрытие» в 2004 г. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2005. – Вип. 2. – С. 22 – 31.
8. Боровой А. А. Ядерная безопасность скоплений воды в объекте «Укрытие» // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, № 2. – С. 91 – 95.
9. Одинцов А. А., Хан В. Е., Огородников Б. И. Контроль факторов радиационной опасности помещения 001/3 объекта «Укрытие» // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2011. – Вип. 15. – С. 96 – 102.
10. Одинцов А. А., Хан В. Е., Краснов В. А., Щербин В. Н. Жидкие радиоактивные отходы на нижних отметках объекта «Укрытие» // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2011. – Вип. 16. – С. 110 – 123.
11. Одинцов А. А., Хан В. Е., В. А. Краснов и др. Радиоактивно загрязненная вода в помещениях объекта «Укрытие» // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2014. – Вип. 23. – С. 89 – 101.

12. Одинцов А.А., Хан В.Е., Калиновский А.К. Содержание ^{129}I в радиоактивно загрязненной воде объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2015. – Вып. 24. – С. – 62–69.
13. Руденко Л. И., Скляр В. Я., Хан В. Е. Очистка жидких радиоактивных отходов из объекта “Укрытие” от трансурановых элементов, Sr и γ -излучателей // Радиохимия. – 2004. – 46, № 2. – С. 184–187.
14. Руденко Л.И., Гуменная О.А., Хан В.Е., Джужа О.В. Механизм очистки жидких радиоактивных отходов от трансурановых элементов и урана методом комплексообразования и ультрафильтрации // Доп. НАН України. - 2009. - № 11. – С. 145–148.
15. Одинцов А. А., Пазухин Э.М., Хан В. Е. Методика одновременного определения содержания урана и трансурановых элементов в грунтовой воде и жидких радиоактивных отходах объекта “Укрытие” // Радиохимия. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 467–71.
16. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС // Отчет ИБРАЭ АН СССР, Инв. № 52/11-20. - М., 1991.
17. Пазухин Э.М., Боровой А.А. Соотношение изотопов плутония в зависимости от степени выгорания ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС // Радиохимия. – 2003. – Т. 45, № 2. – С. 191–196.

О. О. Одинцов, В. Е. Хан, В. О. Краснов, В. М. Щербин

Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

БАГАТОРІЧНИЙ МОНІТОРИНГ НЕОРГАНІЗОВАНИХ СКУПЧЕНЬ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Представлено результати багаторічного моніторингу неорганізованих скупчень рідких радіоактивних відходів (ЖРО) на нижніх позначках об'єкта «Укриття». Визначено об'єми ЖРО та динаміка їхніх сезонних змін. Експериментально визначено зміст макрокомпонентів, урану, продуктів поділу (ПД) ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs , $^{154,155}\text{Eu}$ і трансуранових елементів (ТУЕ) ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm в ЖРО об'єкта «Укриття» в період 1996 – 2015 рр. Концентрація урану в ЖРО об'єкта «Укриття» становила 1 – 190 г/м³. Об'ємна активність ПД в ЖРО знаходиться в межах $n \cdot 10^7$ - $n \cdot 10^{11}$ Бк/м³, а ТУЕ в межах $n \cdot 10^4$ - $n \cdot 10^8$ Бк/м³. Показано, що сезонні коливання концентрації урану та об'ємних активностей радіонуклідів у ЖРО можуть бути до одного порядку величини. Співвідношення між активностями $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ і $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ в ЖРО значно відрізняються від аналогічних співвідношень радіонуклідів у паливовмісних матеріалах об'єкта «Укриття». У період 1996 – 2015 рр. спостерігався стійкий тренд збільшення концентрації урану та об'ємних активностей радіонуклідів у найбільшому скупченні ЖРО у приміщенні 001/3.

Ключові слова: уран, плутоній, америцій, рідкі радіоактивні відходи, об'єкт «Укриття».

O. O. Odintsov, V. E. Khan, V. O. Krasnov, V. M. Shcherbin

Institute for safety problems of nuclear power plants NAS of Ukraine, Kirova st, 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

LONG-TERM MONITORING OF THE UNORGANIZED ACCUMULATIONS LIQUID RADIOACTIVE WASTERS OF OBJECT «UKRYTTYA»

The results of the long-term monitoring of the unorganized accumulations of liquid radioactive wasters (LRW) are presented on the lower marks of object «Ukryttya». The volumes of LRW and dynamics of their seasonal changes are certain. Maintenance of activity is experimentally certain, uranium, fission products of ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs , $^{154,155}\text{Eu}$ (FP) and transuranium of ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm (TUE) in LRW of object «Ukryttya» in the period of 1996 – 2015. Concentration of uranium in LRW of object «Ukryttya» was made by 1 – 190 g/m³. By volume activity of FP in LRW is within the limits of $n \cdot 10^7$ - $n \cdot 10^{11}$ Bq/m³, and TUE within the limits of $n \cdot 10^4$ - $n \cdot 10^8$ Bq/m³. It is showed that the seasonal variation of concentration of uranium and by volumes activity of radionuclides in LRW can make sizes to one order. Correlations between activity $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ and $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$ in LRW considerably differ from similar correlations of radionuclides in fuel-carrying materials of object «Ukryttya». In the period of supervisions of 1996 – 2015 yy. there was steady line of multiplying the concentration of uranium and by volumes activity radionuclides in most accumulation of LRW in the apartment 001/3.

Keywords: uranium, plutonium, americium, liquid radioactive waster, object “Ukryttya”.

REFERENCES

1. Bogatov S.A., Korneev A.A., Krynitsyn A. P. et al. Researches of water streams into object «Ukryttya» // Radiokhmiy. - 2000. – Vol. 42, № 3. – P. 276 – 280. (Rus)
2. Shcherbin V. M., Krinitsyn A. P., Strixar O. L. Determination ^{235}U of water streams into object «Ukryttya» // Radiokhmiy. - 2000. – Vol. 42, № 3. – P. 281 – 283. (Rus)
3. Korenev A. A., Krinitsyn A. P., Strixar O. L., Shcherbin V. M. Liquid radioactive waster into object «Ukryttya» // Radiokhmiy. – 2002. – Vol. 44, № 6. – P. 545 – 552. (Rus)

4. *Krinityn A. P., Strixar O. L., Shcherbin V. M.* The problem of handling the liquid radioactive wasters of object «Ukrytya» // Radiokhmiy. – 2003. – Vol. 45, № 5. – P. 461 – 465. (Rus)
5. *Odintsov O. O., Khan V. E., Krasnov V. O. et al.* Transuranium elements in the liquid radioactive wasters of object «Ukrytya» // Radiokhmiy. – 2009. – Vol. 51, № 4. – P. 337 - 343. (Rus)
6. *Kluchnikov A.A., Krasnov V.A., Shcherbin V. M., Rudko V.M.* объект «Ukrytya»: 1986 – 2001. – Chernobyl: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 2011. - 286 с. (Rus)
7. *Pavluchenko N.I., Khan V. E., Krinityn A. P. et al.* Control of the unorganized up casts and extras from an object «Shelter» in 2004 // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy I Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2005. – Iss. 2. – P. 22 – 31. (Rus)
8. *Borovoy A. A.* Nuclear safety of accumulations of water in an object «Ukrytya» // Atomnay energiy. - 2009. – Vol. 107, No. 2. – P. 91 – 95. (Rus.)
9. *Odintsov O. O., Khan V. E., Ogorodnikov B.I.* Control of factors of radiation danger of apartment 001/3 object «Shelter» // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2011. - Iss. 15. - P. 96–102. (Rus)
10. *Odintsov O. O., Khan V. E., Krasnov V. O., Shcherbin V. M.* Liquid radioactive waster on lower marks of object «Ukrytya» // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy I Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2011.- Issue. 16. - P.110-123. (Rus)
11. *Odintsov O. O., Khan V. E., Krasnov V. O. et al.* Radioactive contaminate water in the apartments of object «Shelter» // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2014. – Iss. 23. – P. 89 – 101. (Rus)
12. *Odintsov O. O., Khan V. E., Kalinovskiy A.K.* Contents of ^{129}I in radioactive contaminate water of object «Shelter». // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2015. – Iss. 24. – P. – 62 - 69. (Rus)
13. *Rudenko L. I., Cklyr V. Y., Khan V. E.* Cleaning of liquid radioactive waster from an object “Shelter” from transuranium, Sr and γ -emitters // Radiokhimiya. – 2004. – 46, № 2. – P. 184–187. (Rus)
14. *Rudenko L. I., Gumenay O.A., Khan V. E., Djuja O.V.* Mechanism of cleaning of the liquid radioactive waster from transuranium and uranium by the method of formation of complex connections and ultra filtration // Dopovidi NANU (Reports of NASU). - 2009. - № 11. – P. 145 – 148. (Rus)
15. *Odintsov O. O., Pazukchin E.M., Khan V. E.,* Procedure for Simultaneous Determination of Uranium and Trasuranium Elements in Groundwater and Liquid Radioactive Wastes from the Shelter // Radiokhimiya. – 2005. – Vol. 47, № 5. – P. 467 – 471.
16. *Borovoy A. A., Dovbenko A.A., Smolynkina M.B., Ctrogonov A.A.* Determination of nuclear-physical descriptions of fuel of 4th power unit of ChNPP. Report ISRNPP AS USSR, № 52/11-20. - Moskva, 1991. (Rus)
17. *Pazukchin E.M., Borovoy A. A.* Correlation of isotopes of plutonium depending on the degree of burning down of nuclear fuel of 4th block of ChNPP // Radiokhimiya. – 2003. – Vol. 45, № 2. – P. 192 – 196.

Надійшла 01.06.2016
Received 01.06.2016