

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА ЧАЭС И ФУКУСИМА-1

В. Н. Вашенко, И. Б. Кордуба, Ю. М. Кризская

Государственная экологическая академия последиplomного образования и управления
ул. Митрополита Василя Липковського, 35, корпус 2, Киев, 03035, Украина. E-mail: danileo@ukr.net.

В работе представлены результаты сравнительного анализа радиационно-экологических последствий тяжелых аварий на Чернобыльской АЭС и Фукусима-1. Рассмотрены пять стадий интенсивного выброса радиоактивных элементов в атмосферу и проведен анализ существующих оценок по Чернобыльским аварийным выбросам. Основная неопределенность результатов оценок связана с длительностью и нерегулярностью выброса радиоактивных веществ, сложностью и неоднозначностью состава выброса, трансформации и миграции выброшенных веществ, а также другими факторами. Также рассмотрен процесс и последствия аварии на АЭС Фукусима-1, которая по своим экологическим последствиям сравнима с Чернобыльской аварией, а общий объем радиационного выброса составил 15 % от выброса аварии на ЧАЭС, однако в результате предпринятых мер, дозовые нагрузки на население были снижены не менее чем в 4-5 раз. Акцентируется внимание на то, что в связи с окончательным выводом из эксплуатации водоёма-охладителя ЧАЭС путём частичного осушения и необходимостью приведения его в равновесное экологически безопасное состояние, необходимо рассмотреть задачу оценки перераспределения радиоактивных загрязнений и их общего количества в чаше водоёма.

Ключевые слова: авария, радионуклиды, экология, выброс, активность.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І РАДІАЦІЙНО-ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВАЖКИХ АВАРІЙ НА ЧАЕС ТА ФУКУСИМА-1

В. М. Ващенко, І. Б. Кордуба, Ю. М. Кризська

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, Київ, 03035, Україна. E-mail: danileo@ukr.net.

У роботі представлено результати порівняльного аналізу радіаційно-екологічних наслідків важких аварій на Чорнобильській АЕС та Фукусима-1. Розглянуто п'ять стадій інтенсивного викиду радіоактивних елементів у атмосферу та проведено аналіз існуючих оцінок щодо Чорнобильського аварійного викиду. Основна невизначеність результатів оцінок пов'язана з тривалістю та неоднорідністю викидів радіоактивних речовин, складністю та неоднозначною складу викиду, трансформації та міграції радіоактивних речовин, а також іншими факторами. Також розглянуто процес і наслідки аварії на АЕС Фукусима-1, яка за своїми екологічними наслідками порівнянна з Чорнобильською аварією, а загальний об'єм радіаційного викиду склав 15% від викиду аварії на ЧАЭС, однак у результаті вжитих заходів, дозові навантаження на населення були знижені не менше ніж у 4-5 рази. Акцентується увага на тому, що у зв'язку з остаточним виводом із експлуатації водоїми-охолоджувача ЧАЭС шляхом часткового осушення та необхідності приведення його в рівноважне екологічно безпечний стан, необхідно оцінити перерозподіл радіаційних загроз і їх загальну кількість у чаші водоїми.

Ключові слова: аварія, радіонукліди, екологія, викид, активність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Масштабы Чернобыльской катастрофы хорошо известны и ученым, и политикам всего мира [1]. В окружающую среду было выброшено около 3% трансурановых элементов, от их общего количества, накопленного на момент аварии в 4-м энергоблоке ЧАЭС, что составляет более 300 МКи или $1,3 \cdot 10^{19}$ Бк радионуклидов. Авария привела к загрязнению более 145 тыс. км² территории, включая около 5 тысяч населенных пунктов Украины, Республики Беларусь и Российской Федерации. Плотность загрязнения этой территории радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr превышала 37 кБк/м². Только в Украине было загрязнено 2293 поселков и городов с общим населением примерно 2,6 млн. человек. Всего жертвами Чернобыльской катастрофы стали почти 5 миллионов людей.

Авария на ЧАЭС привела к беспрецедентному облучению населения указанных выше государств. По уникальности пространственной, временной и профессионально-возрастной структуры распространения, а также по сочетанию внешнего и внутреннего облучения, авария на ЧАЭС не имеет аналогов в истории техногенных катастроф.

В результате аварии на 4-м блоке ЧАЭС были

уничтожены барьеры и системы безопасности, защищающие окружающую среду от радионуклидов, содержащихся в облученном топливе. Выброс активности из поврежденного реактора на уровне десятков миллионов Кюри в сутки длился 10 дней - с 26 апреля по 6 мая, после чего снизился в тысячи раз.

Процессы, происходившие в течение активной стадии аварии ЧАЭС, до сих пор полностью не изучены. Требуют дальнейшего исследования процессы воздействия радиации на окружающую среду загрязненных территорий, миграции и трансформации радиоактивных веществ и т.п. [2], а также вторичного переноса радионуклидов через все элементы биосферы.

Чернобыльская авария определила необходимость достоверной оценки величины радиоактивного загрязнения окружающей среды и радиологических последствий. После аварии оценку радиационного выброса из разрушенного реактора РБМК-1000 в атмосферу проводили различные эксперты независимыми методами. Однако даже на сегодня проблема согласования результатов оценок суммарной величины выброса и динамики изменения интенсивности основных радионуклидов во времени и пространстве в начальный период аварии остается

нерешенной. Неопределенность данных оценок связана с длительностью и не монотонным характером выброса радиоактивных веществ из аварийного реактора, сложностью и неоднозначностью нуклидного и физико-химического состава выброса, трансформации и миграции выброшенных веществ, и другими факторами. В последние годы остро актуальность приобрели задачи касающиеся обоснования и обеспечения долговременной экологической безопасности водоема-охладителя ЧАЭС в процессе и после стабилизации процессов его осушения. В частности, как показывают главные уроки Фукусимской катастрофы, крайне актуальной является задача о возможных экологических последствиях в результате влияния на ВО ЧАЭС землетрясений, ветров, смерчей [3].

Цель работы заключается в изучении существующих данных по радиоактивным выбросам после масштабных тяжёлых ядерных аварий с целью оценки их качества, в первую очередь с точки зрения обеспечения экологической безопасности загрязнённых регионов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В настоящей работе сделан критический анализ имеющихся данных касающихся оценки информации по Чернобыльским аварийным выбросам. Для достижения этого решались следующие задачи:

- 1) анализ данных отечественных и зарубежных источников по радиоактивному выбросу во время Чернобыльской аварии;
- 2) анализ данных по суммарному выбросу основных дозобразующих радионуклидов в атмосферу;
- 3) анализ их по нуклидного состава и динамики изменения первичного выброса в начальный период аварии;
- 4) провести сравнительный анализ результатов оценок Чернобыльского аварийного выброса, полученных экспертами разных стран мира.

Наиболее мощные выбросы радионуклидов в атмосферу из 4-го энергоблока ЧАЭС имели нестационарный характер и продолжались несколько суток. В состав выбросов входили радиоактивные газы, конденсированные аэрозоли и диспергированное ядерное топливо. В общем, продукты аварии включали большой перечень радионуклидов, состав которых соответствовал примерно их составу в облученном до аварии ядерном топливе обогащенного летучими соединениями нуклидов: органические соединения йода (CH₂I) и молярные соединения йода (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I, ¹³⁵I), цезия (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs), теллура (¹³²Te), инертных газов криптона (^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr) и ксенона (¹³³Xe, ¹³⁵Xe).

На второй стадии развития аварии мощность радиоактивных выбросов со временем постепенно уменьшалась из-за прекращения процесса горения и спада интенсивности тепловыделения в разрушенной активной зоне. Тепловым воздушным потоком из разрушенного реактора были подняты мелкодисперсные частицы ядерного топлива и продукты сгорания графитовой кладки.

Третья стадия аварии характеризовалась быстрым наращиванием выхода продуктов деления в

газообразной форме (цезий и рутений) за пределы разрушенного реакторного здания. Образование частиц ¹⁰³Ru и ¹⁰⁶Ru могло происходить за счет окисления рутения, находившегося на поверхности диспергированного ядерного топлива с последующим его восстановлением из летучего оксида RuO₄ на фрагментах конструктивных материалов. Топливные летучие частицы выпадали преимущественно в ближней зоне ЧАЭС - до 30 км и в том числе на поверхность водоема-охладителя ЧАЭС. С увеличением расстояния от источника выброса увеличивалась доля частиц рутения.

На четвертой стадии развития аварии в течение трех суток наблюдался процесс стабилизации выбросов радионуклидов в окружающую среду. Во время аварии происходило также образование конденсационных частиц за счет конденсации быстрых летучих продуктов деления (радиоизотопы ¹³¹I, ¹³⁴Ce, ¹³⁷Cs, ¹³²Te и др., вышедшие из матрицы ядерного топлива при высоких температурных показателях) на частицах графитовой пыли и конструктивных материалов. Удельная активность этих радионуклидов в летучих долях во многих случаях определялась промежутком времени более 3-х суток и температурой конденсации (T > 3000 °K), характеристиками поверхности частиц и т.д.

На пятой стадии аварии (на 10 сутки) наблюдалось резкое уменьшение выброса радионуклидов в атмосферу. Радионуклидный состав выбросов основных газоаэрозольных частиц представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Оценка газообразных продуктов деления, попавших в атмосферный воздух в результате Чернобыльской аварии

Радиоактивные газы, накопившиеся в активной зоне реактора РБМК-1000 26 апреля 1986			Общий объем выбросов радиоактивных газов при аварии	
Радионуклид	Период полураспада, T _{1/2}	Активность, ПБк	Активность, ПБк	Содержание радиоактивных газов, %
¹³³ Xe	5,3 суток	6500	6500	100
¹³¹ I	8,04 суток	3200	~1760	(50ч60)
¹³⁴ Cs	2,06 лет	180	~54	(20ч40)
¹³⁷ Cs	30,2 лет	280	~85	(20ч40)
¹³² Te	78 часов	2700	~1150	(25ч60)
¹⁰³ Ru	39,28 суток	4800	~168	3,5
¹⁰⁶ Ru	368,2 суток	2100	~73	3,5
¹⁴¹ Ce	32,5 суток	5600	~196	3,5
¹⁴⁴ Ce	284,3 суток	3300	~116	3,5

Из данных табл. 1, видно, что разница в общем объеме радионуклидного выброса в воздухе во время Чернобыльской аварии для некоторых радиоактивных газов достигала от 20 до 60 %.

Первоначальная информация о Чернобыльском выбросе была представлена советскими и зарубежными экспертами (табл. 2).

Данные таблицы 2, показывают, что разброс расчетных значений оценок суммарного выброса для одних и тех же радионуклидов, полученных разными

ми авторами, відхиляється в декілька раз, а для рутенія і стронція - на декілька порядків. В той же час сумарна активність викисту основних дозообразуючих нуклідів ^{131}I і ^{137}Cs збігаються між собою з погрешністю, не більше ніж 50 %.

Таблиця 2 – Первична розрахункова оцінка радіоактивного сумарного викисту при аварії на ЧАЕС, ПБк

Радио-нуклід	Страна			
	СССР	США	Англія	Франція
^{131}I	270,5	259,2	269,7	670
^{132}Te	148	74,0	48,1	22,9
^{137}Cs	11,2	29,9	36,6	73,4
^{90}Sr	0,06	6,6	7,9	–
^{103}Ru	22,2	111,0	119,8	61,2
^{106}Ru	0,74	33,7	58,7	31,1
^{144}Ce	16,7	92,5	88,9	0,07

Приведенные в табл. 2 результаты по уточненным оценкам суммарного выброса основных радионуклидов показывают существенный разброс, например, для изотопов теллура, йода, рутенія и нептуния. Различия данных для ^{137}Cs не превышает 55 %, для ^{140}Ba – 20 %, а для ^{144}Ce – 60 %. Поэтому уточнение суммарной активности Чернобыльских выбросов, выполненных разными авторами с использованием различных подходов и методов, могут приниматься как достаточно надежные.

Очень важно отметить, что баланс ядерного топлива в 4-м блоке ЧАЭС до и после аварии до сих пор еще не сведен. Официальные результаты оценок массы выброса ядерного топлива из разрушенного реактора, представленные в докладе МАГАТЕ в 1986 году, составляли (3÷4) % от полной загрузки реактора РБМК-1000 (190 тонн UO_2 обогащением 2 %), т.е. около 6÷8 тонн.

Результаты экспериментальных исследований,

проведенных сотрудниками ГЕОХИ им. В.И. Вернадского АН СССР (Москва) в мае-июне 1986 года показали, что выброс ядерного топлива на исследуемой территории составил (8÷10) %, т.е. около (15,8÷19,0) тонн.

В 2000 году сотрудники Украинского научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиологии (УкрНИИСХР, г. Киев), установили, что количество ядерного топлива, выброшенное в окружающую среду за пределы промплощадки ЧАЭС, составило (1,5±0,5) %, т.е. (2,85±0,95) тонн ядерного топлива, что в два раза ниже общепринятых.

Поэтому, вопрос о количестве выброшенного за пределы разрушенного реактора ядерного топлива остается открытым.

Во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС в атмосферу было выброшено до 100 % разных благородных газов, (20÷60) % изотопов йода, (15÷40) % изотопов цезия, и (3÷4) % менее летучих радионуклидов (^{95}Zr , ^{90}Sr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{140,144}\text{Ce}$ и транс плутониевые элементы) от их общего содержания в работающем реакторе на момент аварии. Следует отметить, что наиболее достоверные данные были получены только для суммарного выброса ^{137}Cs спустя 20 лет после аварии. Но до настоящего времени нет надежных и однозначных данных о количестве выбросов ядерного топлива во время аварии на 4 блоке ЧАЭС. Важным моментом является то, что до настоящего времени нет надежных однозначных данных о полном количестве выброшенного с активной зоны реактора ядерного топлива во время аварии. Этот факт является также важным и для уточнения оценки общего содержания радионуклидов в ВО ЧАЭС.

Уточненные оценки суммарной активности основных радионуклидов, выброшенных в ходе Чернобыльской аварии, приведенные в отечественных и иностранных изданиях [1, 4–7], показаны в табл. 3.

Таблиця 3 – Значения уточненных оценок суммарной активности основных радионуклидов, выброшенных в результате аварии на ЧАЭС

Радионуклід	Период полураспада, $T_{1/2}$, час.	Активность выброса, ПБк (%)			
^{85}Kr	$1,2 \cdot 10^5$	–	33 (100)	33 (100)	–
^{133}Xe	$1,21 \cdot 10^2$	185 (100)	1670 (100)	6500 (100)	6500 (100)
^{132}Te	$7,82 \cdot 10^1$	150 (20)	48 (15)	1040 (20)	~115 (25–60)
^{131}I	$1,93 \cdot 10^2$	167 (10)	480 (20)	1760 (50)	~1760(50–60)
^{134}Cs	$1,81 \cdot 10^4$	6 (8)	18 (10)	47 (15)	~54 (20–40)
^{137}Cs	$2,64 \cdot 10^5$	21,3 (10)	37,4 (13)	80,3 (20)	~85 (20–40)
^{89}Sr	$1,21 \cdot 10^3$	9,2 (1)	81 (4)	115 (5)	~115 (4–6)
^{90}Sr	$2,5 \cdot 10^5$	6,8 (1)	8,0 (4)	10 (5)	~10 (4–6)
^{103}Ru	$9,44 \cdot 10^2$	20 (2)	120 (2,9)	168 (3)	>168 (3,5)
^{106}Ru	$8,84 \cdot 10^3$	7 (2)	59 (2,9)	73 (3)	>73 (3,5)
^{140}Ba	$3,07 \cdot 10^2$	19 (5)	160 (5,6)	240 (5)	~240 (4–6)
^{95}Zr	$1,54 \cdot 10^3$	17 (1)	140 (3,2)	84 (3)	196 (3,5)
^{141}Ce	$7,8 \cdot 10^2$	15 (1)	100 (2,3)	84 (3)	196 (3,5)
^{144}Ce	$6,82 \cdot 10^3$	17 (2,0)	89 (2,8)	50 (3)	~116 (3,5)
^{239}Np	$5,64 \cdot 10^1$	99(3)	44 (3,2)	400 (3)	945 (3,5)
^{238}Pu	$7,68 \cdot 10^5$	0,01 (2,8)	0,03 (3)	0,015 (3)	0,035 (3,5)
^{239}Pu	$2,14 \cdot 10^8$	0,018(2,9)	0,026 (3)	0,013 (3)	0,03 (3,5)

Радионуклід	Період порушення, $T_{1/2}$, час.	Активність виброса, ПБк (%)			
^{240}Pu	$5,73 \cdot 10^7$	0,02(3,0)	0,037 (3)	0,018 (3)	0,042 (3,5)
^{241}Pu	$1,33 \cdot 10^5$	0,7 (3)	5,0 (3)	2,6 (3)	~6,0 (3,5)
^{242}Pu	$3 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-5}$ (3)	$7 \cdot 10^{-5}$ (3)	$4 \cdot 10^{-5}$ (3)	–
^{242}Cm	$3,91 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^{-4}$ (3)	0,78 (3,2)	0,4 (3)	~0,9(3,5)

Очевидно, что для понимания ядерно-физических процессов, происходивших в разрушенной активной зоне реактора, необходимо знать не только состав и общее количество выброшенных в атмосферу радионуклидов, но и динамику их выбросов в начальной стадии аварии. В табл. 4 приведены данные о динамике радиоактивных выбросов основных дозобразующих нуклидов ^{131}I и ^{137}Cs из разрушенного 4-го блока ЧАЭС в начальный период аварии [4–6, 8]. Из данных, приведенных в табл. 4, видно некоторую разницу в динамике выброса радионуклидов, установленную экспертами в 1986–1987 гг., после чего в последующих уточненных оценках отмечается резкий рост количества выброшенного ^{131}I .

Таблица 4 – Динамика изменения суточных выбросов ^{131}I и ^{137}Cs из разрушенного реактора

Дата	Активность выброса, ПБк							
	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs
26.04	17	6,8	149	7,1	30	15,2	704	20
27.04	26	1,1	46	3,8	114	14,1	204	12
28.04	20	1,0	42	1,1	152	10,3	150	9
29.04	18	0,9	33	2,3	54	10,0	102	6
30.04	8	0,5	20	1,9	10	2,9	69	5
01.05	6	0,6	21	2,5	12	2,4	62	4
02.05	19	2,0	41	3,2	15	3,1	102	6
03.05	22	2,4	106	4,7	20	4,2	107	7
04.05	20	3,3	104	5,0	32	5,0	129	8
05.05	21	2,7	110	5,8	42	9,1	131	8
Полный выброс	167	21,3	670	37,4	480	80,3	1760	85

Проведенный сравнительный анализ Чернобыльского выброса позволяет сделать следующие выводы:

1) итоговая оценка суммарного выброса основных радионуклидов во время начальной стадии аварии на ЧАЭС, проводимая различными специалистами, к сожалению, не является окончательной и достоверной, т.е. имеет консервативную, а не реальную основу;

2) большие расхождения в оценке динамики выброса ^{131}I и ^{137}Cs можно объяснить пространственными особенностями формирования полей радиоактивного загрязнения в отдельные периоды начальной стадии аварии, а также неполной и недостаточной достоверностью входной метеорологической информации;

3) в дальнейшем необходимо провести пересмотр официальных данных по составу, величине и динамике выброса радионуклидов в результате Чернобыльской аварии.

4) в связи с окончательным выводом водоемоохладителя ЧАЭС из эксплуатации и необходимо-

стью разработки стратегии приведения его в равновесное экологически безопасное стабилизированное состояние на очень длительные временные сроки важно оценить количество и популяционный состав попавших в него аварийных радиоактивных загрязнений.

Источниками поступления радионуклидов с аварийных блоков АЭС Фукусима-1 в окружающую среду могли стать поврежденные реакторы блоков № 1-3 и бассейны с отработанным ядерным топливом, находившиеся в разрушенных зданиях реакторного отделения.

В результате, по предварительным оценкам эксплуатирующей компании ТЕРСО, за один месяц после аварии до 13 апреля 2011 г., объем выброса радиоактивного йода-131 в окружающую среду составил 10^5 ТБк, а объем выброса цезия-137- 10^4 ТБк. Эти данные совпадают с оценками Агентства по ядерной и промышленной безопасности Японии NISA.

Но 7 июня NISA повысило уровень радиоактивного загрязнения окружающей среды, происшедшего в первую в первую неделю после аварии на АЭС Фукусима-1: в период с 11 по 16 марта суммарный выброс радионуклидов составили 770 тыс. ТБк. Согласно прежним оценкам объем выбросов за этот период составил 370 тыс. ТБк. Кроме того, по оценке NISA, расплавление активной зоны в начальный период происходило быстрее, чем предполагалось ранее.

По оценкам ТЕРСО, опубликованным 3 июня, на АЭС Фукусима-1 было накоплено больше 105 тыс. тонн воды, содержание радионуклидов в которой составляло около 720 тыс. ТБк. Позже появилась информация о том, что эксперты из японского университета Канадзавы выявили наличие радиоактивных изотопов плутония в почве вблизи АЭС, что также свидетельствует о разрушении корпуса одного из (или нескольких) реакторов и подтверждает то, что температура внутри реактора все еще оставалась критической [9].

Для сравнения: при аварии на ЧАЭС суммарная активность веществ, выброшенных в окружающую среду, составила, по разным оценкам, до $14 \cdot 10^6$ ТБк, в том числе $1,8 \cdot 10^6$ ТБк йода-131, $0,085 \cdot 10^6$ ТБк цезия-137, $0,01 \cdot 10^6$ ТБк стронция-90, $0,003 \cdot 10^6$ ТБк изотопов плутония, на долю благородных газов приходилось около 50 % от суммарной активности. Эти данные свидетельствуют о том, что авария на АЭС Фукусима-1 по своим радиационным последствиям не намного отстает от чернобыльской. Общий объем радиационного выброса с АЭС Фукусима-1 по предварительным оценкам составляет около 15 % от выброса чернобыльской аварии за тот же промежуток времени.

С первых дней аварии специалисты ТЕРСО, NISA, Токийского центра ВАО АЭС, Министерства здравоохранения, труда и социального обеспечения Японии, Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологий и других организаций, а также эксперты из МАГАТЭ, начали контролировать уровни радиации около АЭС Фукусима-1 и за ее пределами и информировать об этом общественность, как в своей стране, так и во всем мире.

Относительно объективности предоставляемой информации в настоящее время имеются разные мнения. Например, из информации, полученной 5 апреля от JAIF, стало известно, что правительство Японии скрывает от широкого представления данные о радиационной обстановке, которые были получены до 16 марта с помощью специальной компьютерной программы SPEEDI и которые показывают высокий уровень радиационного загрязнения окружающей среды за пределами 30 км от АЭС Фукусима-1. Эта программа дает прогноз распространения радиоактивных веществ в течение 24 часов, исходя из заданных данных. Однако правительство Японии не предоставило всей информации о прогнозах программы SPEEDI до 23 марта.

Результаты расчетов показали, что радиоактивные вещества предположительно могли распространиться в северо-западном и юго-восточном направлениях от АЭС, а уровни радиации, мощность которой составляла более 100 мкЗв/ч, могли иметь место в некоторых районах вне 30-км зоны, где люди находились практически под открытым небом 24 часа в сутки с 12 по 24 марта. Т.е. уровень излучения в 100 раз превышал лимит, установленный международной организацией по радиационной защите. Однако Комиссия по ядерной безопасности не подтверждает прогноз компьютерной программы, так как согласно ее данным на тот момент уровень утечки радиоактивных веществ нельзя было точно определить.

Тем не менее, проследить тенденции в изменении радиационной обстановки в регионе расположения АЭС можно. Это позволяет сделать информация о развитии событий на АЭС Фукусима-1, которую регулярно предоставляли с 12 марта и до конца мая Государственная инспекция ядерного регулирования Украины и ГП НАЭК «Энергоатом» на своих сайтах. Информация основывалась на сообщениях МАГАТЭ, ТЕРСО, NISA, JAIF и других организаций. Приведем здесь некоторые данные, предоставленные в информационных материалах этих организаций во временной последовательности со дня аварии.

Уровень радиационного фона возле АЭС Фукусима-1 и за пределами 30-км зоны до 16 марта хоть и повышался, однако оставался ниже того уровня, который требовал принятия мер защиты. Опасности для здоровья населения он не представлял.

23 – 24 марта 2011 г. Радиационная обстановка на площадке АЭС Фукусима-1 представлена на рис. 1 (по официальным сообщениям МАГАТЭ). Мощность дозы гамма-излучения на границе площадки составляла от 229,4 (возле Главных ворот, 1,0 км на юго-запад от АЭС) до 2015,0 мкЗв/ч (возле

админ. здания, 0,5 км на северо-запад от АЭС).

На расстоянии 3,3 км от АЭС в море концентрация радиоактивных изотопов I-131, цезия-134 и цезия-137 в 2-3 раза превышала допустимые уровни.

В 75-км зоне от АЭС в некоторых населенных пунктах 10 из 48 префектур выявлены факты превышения цезия-137 и йода-131 в питьевой воде, молоке, овощах. Потребление в пищу этих продуктов было временно запрещено.

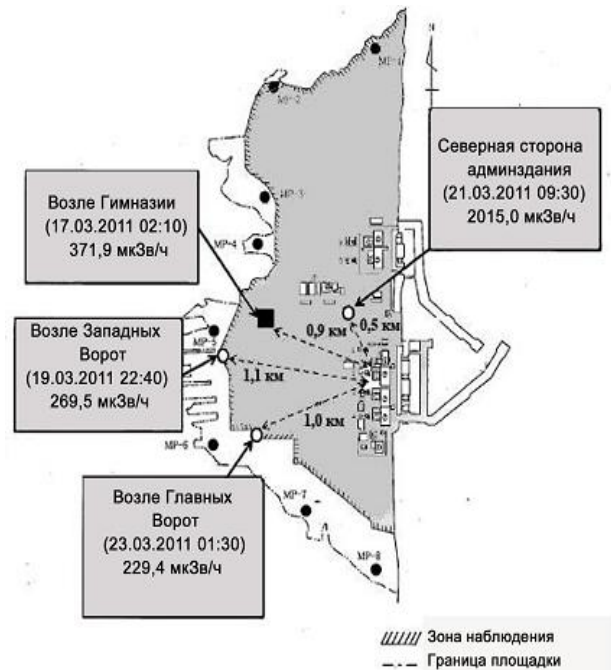


Рисунок 1 – Данные мониторинга площадки АЭС Фукусима-1 (время киевское)

5 апреля 2011 г. С 23 марта наблюдалась тенденция к снижению уровня мощности дозы гамма-излучения (график для семи префектур приведен на рис. 2).

NISA обнародовало данные мониторинга щитовидной железы 946 детей в возрасте до 15 лет. Результаты всех измерений оказались ниже установленных критериев.

Министерство сельского хозяйства Японии информирует, что сельскохозяйственные животные находятся на сезонном стойловом содержании и употребляют в пищу сухие корма, которые не были загрязнены в результате аварии. Фермерам рекомендованы дополнительные меры по защите животных от попадания радионуклидов с пищей и водой.

В связи с продолжающимся загрязнением морской воды введен запрет на промышленный лов рыбы и другую хозяйственную деятельность в море на территории радиусом 40 км от АЭС.

16–17 апреля 2011 г. В 45 из 47 префектур Японии мощность дозы гамма-излучения находилась на уровне природного фона и составляла от 0,05 до 0,1 мкЗв/ч. В то же время в префектуре Фукусима максимальная мощность дозы составляла до 20,0 мкЗв/ч, а в префектуре Ибараки – 1,4 мкЗв/ч.

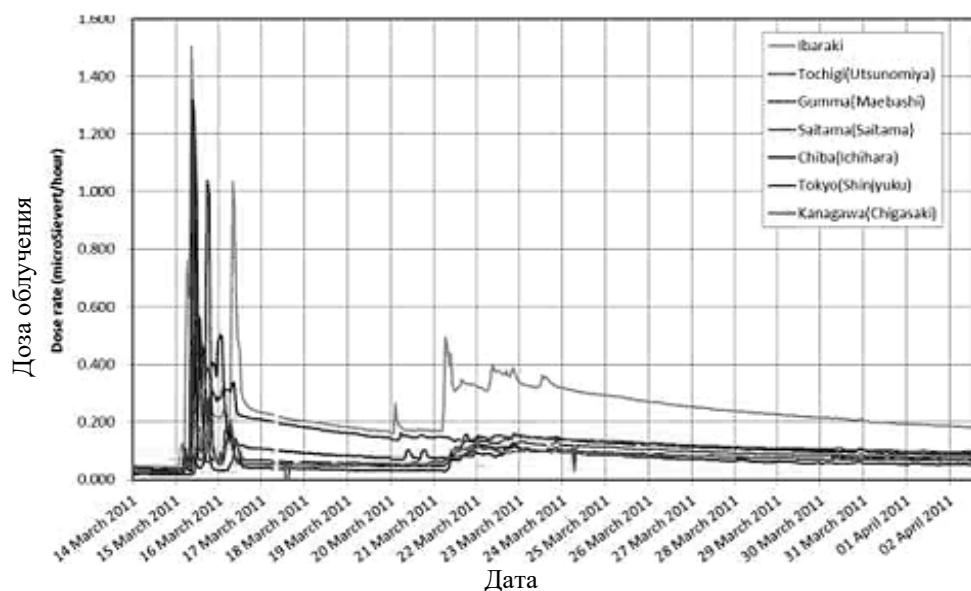


Рисунок 2 – Мощность дозы гамма-излучения с 15 марта по 3 апреля 2011г

Уровни дозы облучения на границе площадки АЭС и за ее пределами в период с 18 марта по 15 апреля 2011 г. приведены на рис. 3 – 5.

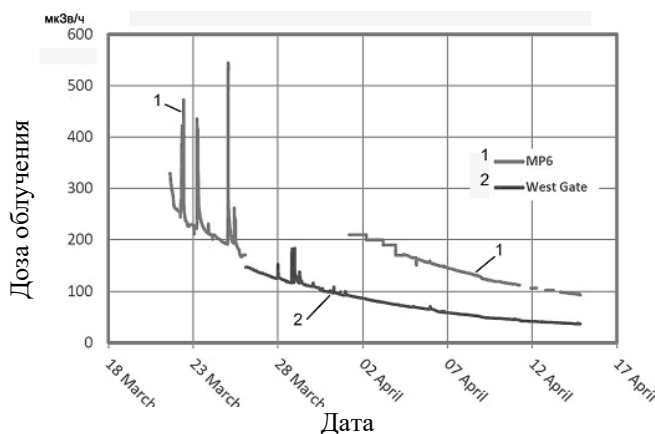


Рисунок 3 – Уровень дозы облучения на границе площадки АЭС Фукусима-1

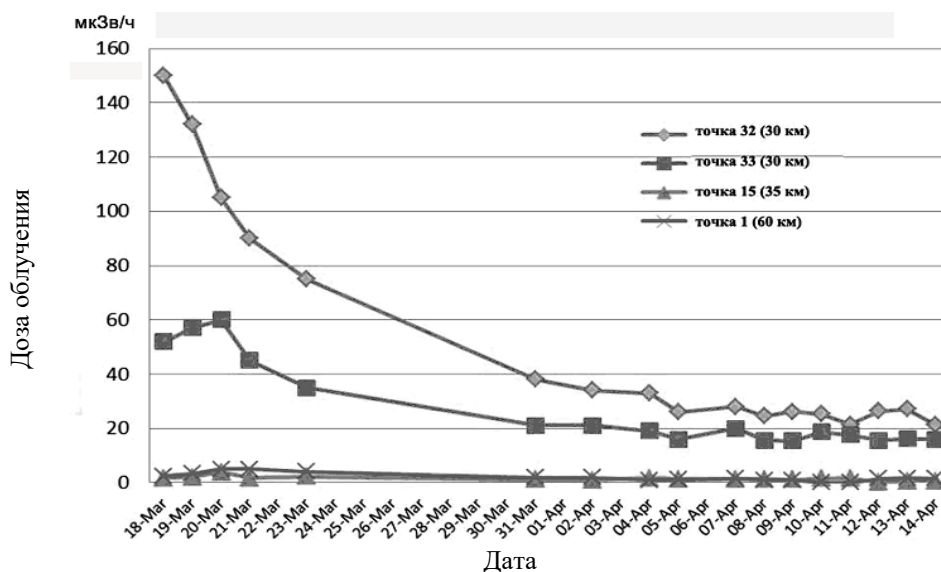


Рисунок 4 – Уровень дозы облучения за пределами площадки АЭС Фукусима-1

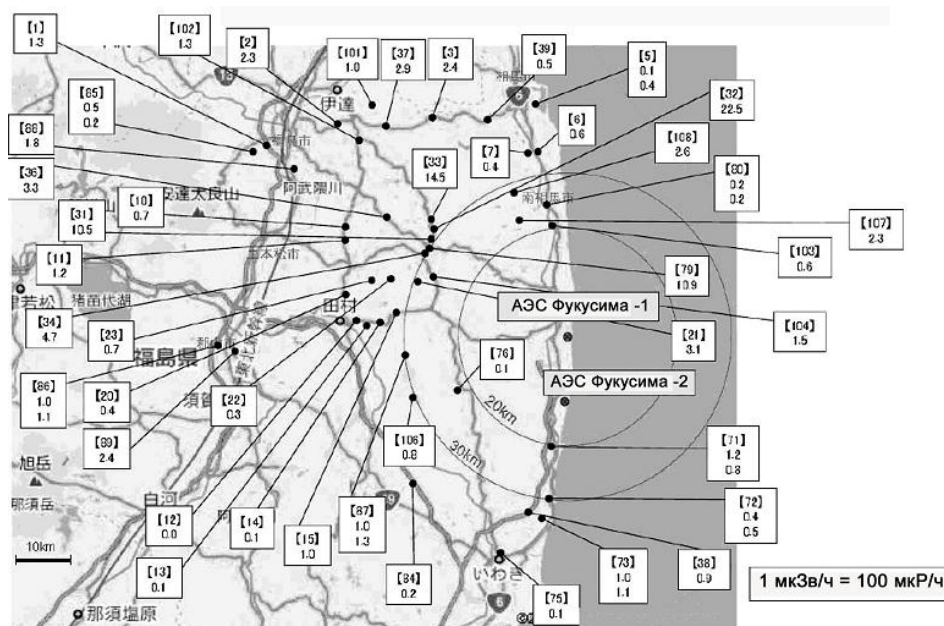


Рисунок 5 – Уровень дозы облучения возле АЭС Фукусима-1 на 15 апреля 2011 г., мкЗв/ч

20 мая 2011 г. Существенных изменений в уровне радиационного фона на площадке АЭС и в наиболее загрязненных префектурах (Фукусима, Ибараки) не наблюдалось.

29 мая 2011 г. Количество радиоактивных веществ в воде возле АЭС в 600 раз превышает норму.

Наблюдается общая тенденция к медленному уменьшению уровня фона и радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды на площадке АЭС и за ее пределами.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что в результате аварии на АЭС Фукусима-1 уровни радиоактивного загрязнения окружающей среды, начиная с 16 марта, значительно превышали природные (фоновые) и предельно допустимые значения для населения не только на границе площадки АЭС, но и за пределами 30-км зоны [10].

Ниже приведены отдельные результаты по измерению и анализу радионуклидов в разных местах и в разное время, полученные эксплуатирующей организацией ТЕРСО (табл. 5, 6).

Таблица 5 – Анализ нуклидов в воздухе у западных ворот Фукусима-Даичи 27 марта 2011 г. Данные: ТЕРСО

Нуклид	Плотность активности, Бк/м ³	Предел обнаружения, Бк/м ³
I ¹³¹	4,5·10 ⁻⁴	8,2·10 ⁻⁶
I ¹³²	1,8·10 ⁻⁴	1,3·10 ⁻⁴
Cs ¹³⁴	1,2·10 ⁻⁵	6,4·10 ⁻⁶
Cs ¹³⁷	1,4·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁶
I ¹³¹	2,1·10 ⁻⁴	9,5·10 ⁻⁶
I ¹³²	–	–
Cs ¹³⁴	1,6·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁶
Cs ¹³⁷	1,4·10 ⁻⁵	9,5·10 ⁻⁶
Te ¹²⁹	2,6·10 ⁻²	2,2·10 ⁻²
Te ^{129m}	1,9·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻⁴
Te ¹³²	1,2·10 ⁻⁴	5,7·10 ⁻⁶

Таблица 6 – Анализ нуклидов в морской воде в 30 м севернее Фукусима-Даичи из сбросного канала блоков № 5 и 6 29 марта 2011 г. Данные: ТЕРСО

Нуклид	Период полураспада	Плотность активности, Бк/м ³	Предел обнаружения, Бк/м ³
I ¹³¹	8,041 дня	2,7·10 ⁺¹	4,2·10 ⁻²
Cs ¹³⁴	2,062 столетия	5,6·10 ⁺⁰	3,2·10 ⁻²
Cs ¹³⁶	13,10 дня	5,6·10 ⁻¹	3,2·10 ⁻²
Cs ¹³⁷	30,17 столетия	5,7·10 ⁺⁰	2,8·10 ⁻²
Ba ¹⁴⁰	12,79 дня	8,8·10 ⁻¹	1,2·10 ⁻¹
La ¹⁴⁰	40,23 ч	3,7·10 ⁻¹	8,5·10 ⁻³

Большие плотности активности были обнаружены в пробах морской воды при измерении 500 мл за 1000 с в германиевом твердотельном детекторе. Больше всего короткоживущих изотопов, за исключением Cs¹³⁴ с периодом полураспада 2 года и Cs¹³⁷ с периодом полураспада 30, 17 лет.

В этой ситуации очень своевременными оказались меры радиационной защиты населения, принятые японскими властями. Во-первых, уже 11 марта было объявлено об аварии и эвакуации жителей 3-км зоны АЭС, 12 марта – об эвакуации жителей 10-км зоны, а затем и 20-км зоны, всего – более 185 тыс. человек. С 16 марта была проведена йодная профилактика среди эвакуированных и объявлено о запрете приема в пищу молока, зеленых овощей (лук, шпинат и др.), ограничении потребления водопроводной и питьевой воды.

Перечисленные выше меры позволили уменьшить дозу облучения населения в несколько раз и этим самым снизить вероятность возникновения онкологических заболеваний в будущем. Конкретную цифру назвать сейчас невозможно из-за отсутствия соответствующей информации. Однако, исхо-

дя из анализа данных по ликвидации последствий на Чернобыльской АЭС, можно предположить, что в результате предпринятых японскими властями мер, дозовые нагрузки на население были снижены не менее чем в 4-5 раз.

Следует заметить, что несвоевременно проведенная йодная профилактика, запрет на потребление свежего молока и молочных продуктов, некоторых овощей, а также замалчивание аварии на протяжении наиболее решающих для осуществления защитных мер дней привели к тому, что при чернобыльской аварии на загрязненных территориях в щитовидной железе детей и взрослых были сформированы биологически значимые дозы, приведшие к резкому увеличению частоты раковых заболеваний. В этом плане печальный опыт чернобыльской аварии по применению защитных мер для населения в Японии в значительной мере был учтен.

Через шесть дней после аварии на АЭС ее последствия начали ощущать на себе жители других стран. Метеорологические особенности в районе расположения Японских островов таковы, что в это

время года (весна) ветер направлен в основном в сторону Американского континента. Поэтому уже с 18 по 22 марта на западном побережье Канады в атмосфере были обнаружены радионуклиды йода-131 ($0,00055-0,00363 \text{ Бк/м}^3$) и цезия-137 ($0,00115-0,0095 \text{ Бк/м}^3$). А начиная с 22 марта йод-131 начал регистрироваться в Украине. Так, результаты измерений концентрации йода-131 в воздухе г. Киев, выполненных Украинским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом в период с 22 марта по 5 апреля 2011 г., указывают на резкий скачок до уровня $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$ (29 марта), а затем падение до $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$ (5 апреля) (рис. 6).

В соответствии с Нормами радиационной безопасности Украины допустимый уровень йода-131 в атмосферном воздухе для населения $4,0 \text{ Бк/м}^3$ [11].

Дополнительное содержание изотопов цезия-137 в воздухе от аварийной АЭС Фукусима-1 в Украине установить невозможно из-за наличия на значительной территории страны цезия-137 чернобыльского происхождения.

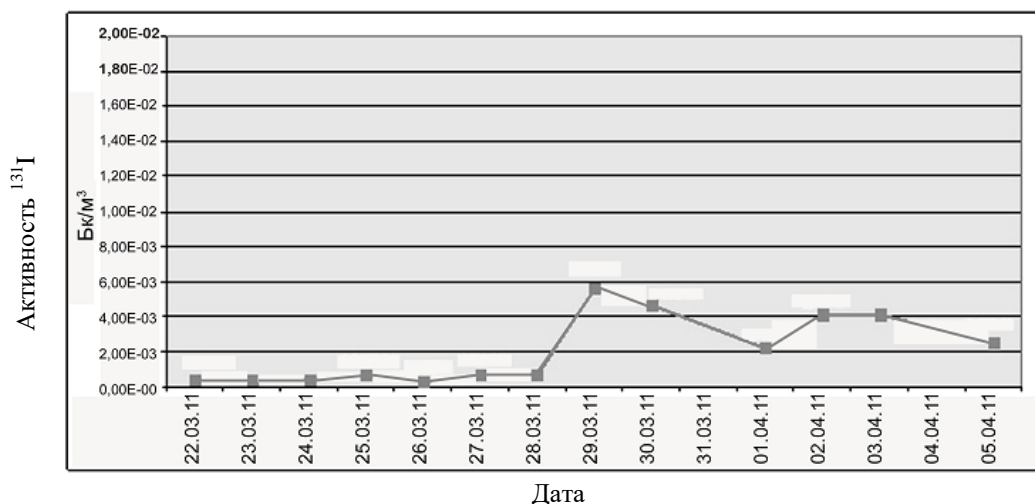


Рисунок 6 – Концентрация йода-131 (Бк/м³) в воздухе г. Киев в период с 22 марта по 5 апреля 2011 г.

Аналогичные измерения проводились на постах АСКРО, установленных в 30-км зонах наблюдения АЭС Украины, с 28 марта по 15 апреля, когда концентрация изотопа йода-131 в атмосферном воздухе снизилась до уровня чувствительности измерительных приборов. Наибольшее значение концентрации йода-131, обнаруженное в районах расположения АЭС, находилось на уровне $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$ (1 апреля 2011 г., Южно-Украинская АЭС) [12].

Первоначально авария на АЭС Фукусима-1 была переклассифицирована с 4-го уровня международной шкалы INES на 5-й уровень – «авария с широкими последствиями, связанными с тяжелым повреждением активной зоны». Однако, по мнению экспертов МАГАТЭ и ряда регулирующих органов других стран, аварию на АЭС Фукусима-1 следовало квалифицировать не ниже 6-го уровня - «тяжелая авария, значительный выброс радиоактивных продуктов за пределы площадки АЭС, которые требуют принятия соответствующих контрмер». Окончательно аварии на блоках № 1-3 были объединены в

общее событие, которое квалифицировано аналогично Чернобыльской АЭС 7-м уровнем - «большая авария».

ВЫВОДЫ. Процессы, происходившие в течение активной стадии Чернобыльской аварии на ЧАЭС, полностью не изучены. Требуют дальнейшего исследования процессы воздействия на окружающую среду загрязненных территорий, миграции и трансформации радиоактивных веществ и т.п.

До настоящего времени остается актуальной проблема согласования результатов оценок суммарной величины выброса и динамики изменения интенсивности основных радионуклидов во времени и пространстве в начальный период аварии. Неопределенность результатов оценок связана с длительностью и нерегулярностью выброса радиоактивных веществ из аварийного реактора, сложностью и неоднозначностью нуклидного и физико-химического состава выброса, трансформации и миграции выброшенных веществ, а также другими факторами.

Большие расхождения в оценке динамики выброса ^{131}I и ^{137}Cs можно объяснить пространственными особенностями формирования полей радиоактивного загрязнения в отдельные периоды начальной стадии аварии, неполной и недостаточной достоверностью входной метеорологической информации. Поэтому в дальнейшем необходим пересмотр официальных данных по составу, величине и динамике выброса радионуклидов в результате аварии на ЧАЭС.

Авария на АЭС Фукусима-1 по своим радиационным последствиям сравнима с Чернобыльской аварией. Общий объем радиационного выброса с АЭС Фукусима-1 по предварительным оценкам составляет около 15 % от выброса Чернобыльской аварии за тот же промежуток времени. В результате аварии на АЭС Фукусима-1 уровни радиоактивного загрязнения окружающей среды, начиная с 16 марта, значительно превышали природные (фоновые) и предельно допустимые значения для населения не только на границе площадки АЭС, но и за пределами 30-км зоны.

Оперативные организационные и профилактические меры после аварии на АЭС Фукусима-1 позволили уменьшить дозу облучения населения в несколько раз и тем самым снизить вероятность возникновения онкологических заболеваний в будущем. Сравнивая с аналогичными данными для ЧАЭС, можно предположить, что в результате предпринятых японскими властями мер, дозовые нагрузки на население были снижены не менее чем в 4-5 раз.

Несвоевременная йодная профилактика, запрет на потребление свежего молока и молочных продуктов, некоторых овощей, а также замалчивание аварии на протяжении наиболее решающих для осуществления защитных мер дней привели к тому, что при чернобыльской аварии на загрязненных территориях в щитовидной железе детей и взрослых были сформированы биологически значимые дозы, приведшие к резкому увеличению частоты раковых заболеваний. В этом плане печальный опыт чернобыльской аварии по применению защитных мер для населения в Японии в значительной мере был учтен.

На сегодня особую актуальность также приобретает задача переоценки радиоактивного загрязнения водоема-охладителя ЧАЭС в связи с его окончательным выводом из эксплуатации путем частичного осушения за счет инфильтрации воды сквозь ограждающую дамбу в р. Припять, а также в связи с необходимостью разработки долговременной стратегии приведения его в равновесное экологически безопасное состояние на длительных временных интервалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скалозубов В.И., Оборский Г.А., Козлов И.Л., Ващенко В.Н. и др. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме. – Одесса, 2013. – 244 с.
2. Кашпоров В.А., Лундин С.М., Зварич С.И. Загрязнение территории радионуклидной топливной компонентой Чернобыльских радиоактивных выпадений // Радиохимия. – 2003. – Т. 45, № 2. – С. 173–183.
3. Ващенко В.М., Кордуба І.Б. Аналіз смерчонебезпеки для вдосконалення технології екологічно безпечного виведення з експлуатації водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС // Екологічна безпека. – Київ, 2016. – № 2/2016 (22). – С. 128–135.
4. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, Вып. 2. – С. 137–145.
5. United Nations Sources and Effects of Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) // 2000 Report to General Assembly. – New York: United Nations. – 2000. – Vol. 11. – P. 451–566.
6. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт. – Доклад экспертной группы "Экология" Чернобыльского форума. [Серия докладов по радиологическим оценкам]. – Вена, МАГАТЭ, 2008. – 180 с.
7. Носовский А.В., Васильченко В.Н., Ключников А.А., Пристер Б.С. Авария на Чернобыльской АЭС: опыт преодоления, извлеченные уроки. – К.: Техника, 2006. – 264 с.
8. Рузан Э.А., Ячник О.И. Оценка выброса топлива при аварии на Чернобыльской АЭС по концентрации ^{90}Sr в почве 30-ти километровой зоны // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, Вып. 1. – С. 57–60.
9. Скалозубов В.И., Ключников А.А., Ващенко В.Н., Яровой С.С. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Фукусима как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах. – Киев, 2012. – 279 с.
10. Скалозубов В.И., Ващенко В.Н., Козлов И.Л., Клевцов С.В. Тяжелые аварии на атомных станциях с корпусными ядерными реакторами. Основы моделирования и анализ. – Одесса, 2015. – 319 с.
11. Скалозубов В.И., Ващенко В.Н., Габлая Т.В., Гудима А.А., Герасименко Т.В., Козлов И.Л. Повышение экологической безопасности атомной энергетики Украины в постфукусимский период. – Киев, 2013. – 128 с.
12. Скалозубов В.И., Ключников А.А., Комаров Ю.А., Шавлаков А.В. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР. – Чернобыль, 2010. – 200 с.

ANALYSIS AND RADIATION ECOLOGICAL CONSEQUENCES
OF HEAVY EMERGENCIES AT CHORNOBYL AND FUKUSHIMA NPP

V. Vashchenko, I. Korduba, Yu. Kryzka

State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management

vul. V. Lypkivskogo, 35, bldg.2, Kyiv, 03035, Ukraine. E-mail: danileo@ukr.net

Purpose. To survey the processes that took place after heavy emergencies at Chernobyl and Fukushima-1 NPPs. **Methodology.** A thorough comparison of available estimates of radioactive emissions in space and time and ecological consequences according to different authors' publications and official reports have been carried out. Generalization and conclusions have been made. **Results.** The estimate, comparative analysis and ecological consequences of the radioactive impact of Fukushima and Chernobyl emergencies at the environment have been considered and it has been shown that both ecological disasters share many similarities. However, the available research data is incomplete and inconsistent, therefore thorough reconsidering is required, especially in context of Chernobyl NPP coolant pool decommissioning. **Originality.** For the first time a thorough comparative analysis of radioactive emissions at Chernobyl and Fukushima emergency reactors was made. It has been shown that large discrepancies in ^{131}I and ^{137}Cs emissions dynamics estimates may be explained by spatial peculiarities of radioactive contaminated areas formation at the initial stages of the emergency, incomplete and uncertain meteorological data. Comparing to analogous data for Chernobyl NPP, an assumption was made that the civilians radioactive exposure were reduced by 4 to 5 times, thanks to the measures undertaken by Japan government. **Practical value.** Further reconsideration of the official data on compound, quantity and dynamics of radionuclides release are required. Another effort should be made in order to reassess the current ecological safety of the Chernobyl NPP industrial site during coolant pool decommissioning by drying out due to wind and tornado hazard.

Key words: emergency, radionuclide, ecology, emission, radioactivity.

REFERENCES

1. Skalozubov, V.I., Oborskiy, G.A., Kozlov, I.L., Vashchenko, V.N. et al. (2013) "Kompleks metodov pierieotsienki bezopasnosti anomnoy energietiki Ukrainy s uchietom urokov ekologichieskikh katastrof v Chiernobyli i Fukusimie" [Complex method of Ukrainian nuclear power safety re-estimate considering lessons of ecological disasters at Chernobyl and Fukushima], Odessa, Ukraine.
2. Kashporov, V.A., Lundin, S.M., Zvarich, S.I., (2003), "Contamination of the territory by radionuclide fuel component of Chernobyl radioactive fallouts", Radiochemistry, vol. 45, no. 2, pp. 173–183.
3. Vashchenko, V.M., Korduba, I.B., (2016), "Analysis of tornado hazard for improvement of environmentally safe decommissioning of Chernobyl NPP coolant pond technology", Ecological Safety, no. 2(22), pp. 128–135.
4. Borovoy, A.A., Gagarinskiy, A.Yu., (2001), "Radionuclides emission from the destroyed Chernobyl NPP power unit", Atomic Power, vol. 90, no. 2, pp. 137–145.
5. United Nations Sources and Effects of Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000 Report to General Assembly, United Nations, vol. 11., pp. 451–566.
6. "Ekologichieskiie posledstviia avarii na Chiernobylskoy AES i ikh prieodolienii: dvadtsatiliemiy opyt" [Environmental consequences of Chernobyl NPP emergency and their liquidation: twenty years' experience], Vienna, IAEA, Austria.
7. Nosovskiy, A.V., Vasilchenko, V.N., Kliuchnikov, A.A., Prister, B.S. (2006) "Avaria na Chiernobylskoy AES: opyt prieodolenia, izvlechiennyye uroki" [Chernobyl NPP emergency: liquidation experience and lessons learnt], Kyiv, Tiekhnika, Ukraine.
8. Ruzan, E.A., Yachnik, O.I., (2009), "Estimate of fuel ejection during the Chernobyl NPP emergency based on ^{90}Sr concentration in 30-km zone", Atomic Power, vol. 107, no. 1, pp. 57–60.
9. Skalozubov, V.I., Kliuchnikov, A.A., Vashchenko, V.N., Yarovoy, S.S. (2012) "Analiz prichin i posledstviy avarii na AES Fukusima kak faktor priedotvraschieniia tiazhilykh avariyy v korpusnykh rieaktorakh" [Analysis of causes and consequences of Fukushima NPP emergency as a factor of prevention of heavy emergencies in tank reactors], Kyiv, Ukraine.
10. Skalozubov, V.I., Vashchenko, V.N., Kozlov, I.L., Klietsov, S.V. (2015), "Tiazhilye avarii na atomnykh stantsiiakh s korpusnymi yadernymi riektorami. Osnovy modelirovaniia i analiz" [Heavy emergencies at nuclear powerplants with tank reactors. Basics for modeling and analysis], Odessa, Ukraine.
11. Skalozubov, V.I., Vashchenko, V.N., Gablaya, T.V., Gudyma, A.A. (2013), "Povyshieniie ekologichieskoy bezopasnosti atomnoy energietiki Ukrainy v postfukusimskiy period" [Increase of environmental safety of nuclear power of Ukraine in post-Fukushima period], Kyiv, Ukraine.
12. Skalozubov, V.I., Kliuchnikov, A.A., Komarov, Yu.A., Shavlakov, A.V. (2010), "Nauchno-tekhnichieskiie osnovy mieropriiaty povysheniia bezopasnosti AES s VVER" [Scientific and technological basis for increase of NPPs with PWR safety], Chernobyl, Ukraine.

Стаття надійшла 31.05.2017.