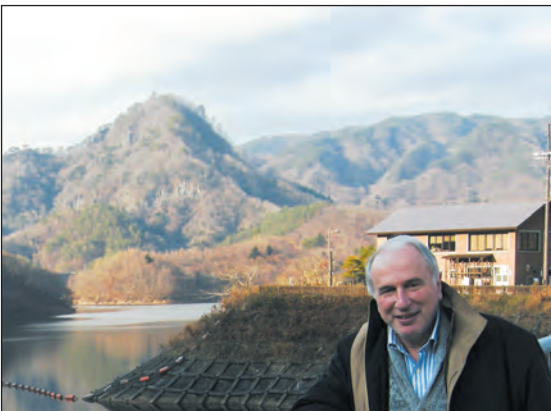




Віктор Бар'яhtar,
доктор фіз.-мат. наук,
академік НАН України,
директор Інституту магнетизму
НАН і МОН України,
м. Київ



Марк Железняк
канд. фіз.-мат. наук,
зав. відділу Інституту проблем
математичних машин і систем
НАН України,
м. Київ,
професор Інституту радіоактивності
навколишнього середовища
Університету Фукусіма



Марія Данилевич
мол. наук. співр.
Інституту магнетизму НАН і МОН України,
м. Київ

КАТАСТРОФИ НА АЕС ТА АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА В ХХІ столітті

Вступ

У наш час атомна енергетика (АЕ) стала значущим джерелом електроенергії. На сьогодні в 31 країні світу на 194 атомних електростанціях (АЕС) перебувають в експлуатації майже 440 атомних блоків різної потужності. Їхня загальна електрична потужність становить 234 600 МВт. Частка АЕ в загальному обсязі світового виробництва електроенергії мала максимальне значення 17 % у 1993 році та зменшилась до 10 % у 2012 році [1].

Порівняно з традиційними виробниками енергії, АЕС мають такі переваги: вони є потужними точковими джерелами енергії, що є дуже важливим для великих споживачів — металургійних, хімічних заводів, метрополітенів тощо. Другою позитивною рисою АЕС є той факт, що вони не застосовують кисню для виробництва електроенергії. Нагадаємо, що для роботи ТЕС на вугіллі, нафті або газі кисень потрібний для реакції горіння. Так, при спалюванні 1 кг вугілля, газу або нафти треба, відповідно, 2,7 кг, 4 кг та 3,4 кг кисню. Однією з переваг АЕС є собівартість кВт-год енергії, значно менша за собівартість електроенергії, виробленої теплоелектростанціями з використанням вугілля, нафти чи газу. Вартість енергії, яка виробляється вітровими електростанціями чи станціями з використанням сонячної енергії з напівпровідниками є також набагато вищою. Наведемо конкретні дані по Україні [2]. Тариф на електроенергію АЕС становить 22,2 коп. за кВт-год.; для ТЕС — 68 коп. за кВт-год.; для вітрових станцій — 1,24 грн. за кВт-год.; для сонячних електростанцій — 5,11 грн. за кВт-год. Ціна на ГЕС майже збігається з вартістю кВт-год. на АЕС і становить 20,6 коп за кВт-год., але резервів для побудови ГЕС в Україні немає.

Спинімося на особливостях виробництва атомної електроенергії в окремих державах [1]. Найбільша кількість АЕС та ядерних блоків розміщено в США: на 66 АЕС працюють 103 ядерні енергоблоки, що виробляють майже 20 % усієї електроенергії держави.

У Франції — на 19 АЕС працюють 58 енергоблоків, де виробляється 74 % усієї електроенергії. Оскільки потужність сучасних атомних енергоблоків є нерегульованою, то загальний обсяг електроенергії мають доповнювати теплові електростанції, потужність яких регульована, що важливо для роботи під час пікових навантажень. Отже, у Франції частину регульованих потужностей із виробництва електроенергії обрали, яка дорівнює 26 %.

У Канаді в експлуатації перебуває 19 реакторів CANDU. Як уповільнювач нейтронів у цих реакторах використовується важка вода (D_2O). Це єдина країна з реакторами на важкій воді

В Росії на 11 АЕС працюють 33 ядерні блоки, з яких 11 — блоки РВПК (реактор великої потужності, каналний). На Курській станції 4 блоки, на Ленінградській — 4 і на Смоленській — 3 блоки. Після аварії на ЧАЕС вони були модернізовані й нині їхня безпечність є значно вищою, ніж чорнобильських блоків зразка 1986 року. Загальна кількість вододіючих енергетичних реакторів (ВВЕР-1000 та ВВЕР-420) становить 12. Нарешті, один реактор на швидких нейтронах (БН). На думку вчених-атомників, реактор БН є одним із найперспективніших реакторів майбутньої атомної енергетики, оскільки в ньому "спалюється" як уран-235, так і уран-238. Тож у цьому типі реакторів як паливо може використовуватися торій. Зауважимо, що запаси торію в Україні є значно більшими від запасів урану. Насамкінець, реактор цього типу виробляє набагато менше радіоактивних відходів, ніж реактори інших типів. Реактор типу БН експлуатується в Росії вже близько 30 років, є добре вивченим та продемонстрував значні переваги в порівнянні з іншими реакторами, що перебувають в експлуатації. Реактор на швидких нейтронах був запропонований та реалізований академіком нашої академії *О.І. Лейпунським*.

В Україні тепер працює 4 АЕС загальною потужністю 13 835 МВт [2], на яких встановлено 15 енергоблоків (див. табл. 1). Запорізька АЕС потужністю 6 000 МВт — на сьогодні найпотужніша в Європі.

Таблиця 1. АЕС в Україні

СТАНЦІЯ	ТИП РЕАКТОРА	КІЛЬКІСТЬ БЛОКІВ	РІК ВВЕДЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ
ЗАЕС	ВВЕР-1000	6	84,85,86 87,89,95
РАЕС	ВВЕР—420	1	80
	ВВЕР—425	1	81
	ВВЕР—1000	2	86,2004
ХАЕС	ВВЕР—1000	2	87,2004
ПУ АЕС	ВВЕР—1000	3	82,85,89

У 2013 році на АЕС України було вироблено 44 % загальної кількості електроенергії в державі. За кількістю енергоблоків, які працюють, Україна займає десяте місце у світі та п'яте — в Європі.

У наш час достатньо актуальною є проблема продовження терміну експлуатації енергоблоків. У грудні 2013 року завершено роботи щодо продовження

терміну експлуатації першого енергоблоку ПУ АЕС. На думку керівництва атомної енергетики України та експертів МАГАТЕ, цей блок відповідає всім вимогам безпеки, які прийнято після катастрофи на Фукусімі. Також заплановано найближчим часом провести роботи з продовження терміну експлуатації другого енергоблоку Південноукраїнської АЕС та двох блоків ЗАЕС.

Наразі повернімося до загальних проблем атомної енергетики. Головною вадою діючих енергоблоків залишається їхня недостатня безпечність. У світі вже існують проекти фізично безпечних АЕС, проте вони ще далекі від впровадження в експлуатацію. Другий суттєвий недолік атомних електростанцій — це виробництво радіоактивних відходів, оскільки серед них наявні так звані довгоживучі, час напіврозпаду яких від 100 до 1000 та більше років.

Очікувана кількість АЕС у світі до 2030 року має зрости до 60 % [1]. Отже, вони можуть стати одним з основних джерел електроенергії.

Зауважмо, що за період 1952—2013 років у світі трапилося понад 10 потужних аварій: у Канаді, Великобританії, СРСР (2 аварії), Франції, США, Японії та Вірменії. За цей час сталася також велика кількість аварій на енергоблоках АЕС, на блоках атомних підводних човнів та на дослідних реакторах [3].

Спинімося докладніше на двох найпотужніших аваріях, що сталися на Чорнобильській АЕС та АЕС "Фукусіма".

Чорнобильська АЕС [4]

Аварія на енергоблоці №4 Чорнобильської АЕС сталася 26 квітня 1986 року о 01 год. 23 хв. 40 сек. під час проведення проектних випробувань однієї з систем забезпечення безпеки, яка входила до складу енергоблоку РБМК—1000. Випробування охоплювало перевірку ефективності використання енергії турбогенератора для забезпечення власних потреб при повному знеструмленні АЕС. Фактично це було електро-ядерне випробування, оскільки передбачалася зупинка реактора. Керівництво станції ухвалило рішення про проведення цього випробування без будь-якого погодження зі спеціалістами та керівництвом УРСР. Про проведення випробування не сповістили ні наукового керівника (Інститут атомної енергії ім. Курчатова), ні проектувальника (Науково-дослідний та конструкторський інститут енерготехніки).

Отже, головними причинами катастрофи є :

1. Проведення частково підготовленого експерименту (лише певною мірою правильного), що був фактично електро-ядерним.

2. Низький рівень професійної підготовки та культури операторів, керівництва станції, а також Міністерства електрифікації загалом у сфері ядерної безпеки АЕС.

3. Недостатній рівень безпеки графіт-уранового реактора РБМК—1000 за умови його роботи на малих потужностях.

Характеристика радіоактивного забруднення навколишнього середовища внаслідок Чорнобильської катастрофи [4, 5]

Унаслідок вибуху ядерного реактора 4-го блоку ЧАЕС та руйнування його захисних оболонок (рис. 1) відбувся потужний викид радіоактивних речовин у навколишнє середовище, загальна кількість якого близько 13 ЕБк ($1,3 \times 10^{19}$ Бк ([5], с. 6). Після побудови в 1986 році над зруйнованим реактором захисної споруди "Укриття" (рис. 2), викиди радіоактивних речовин у навколишнє середовище припинилися. Майже 200 радіоактивних ізотопів у різних фазових та хімічних формах переміщувалися в атмосфері за складними траєкторіями на відстані в тисячі кілометрів від ЧАЕС. У травні 1986 року їх спостерігали в усіх країнах Європи, на акваторіях Тихого, Атлантичного та Північного Льодовитого океанів. Найпомітнішими з радіонуклідів були ^{131}I та ^{137}Cs .

Співвідношення між різними радіонуклідами, залежно від часу викиду, суттєво відрізнялися. Серед основних фаз активних викидів умовно можна виділити три:

перша — характеризується розповсюдженням частинок ядерного палива (з накопиченими за час роботи реактора продуктами поділу цього палива та його активації) і частинок графіту (переважно дрібнодиспергованих), що утворилися внаслідок потужного вибуху реактора. Також були викинуті радіоактивні інертні гази, ізотопи йоду та тритію;

друга — характеризується сповільненням у часі зменшення потужності викидів радіоактивних речовин протягом наступних (від 26 квітня) п'яти днів, із викидом за сумарною активністю еквівалентним викидові першого дня. Це викликано поступовим зниженням температури паливномістких мас, зумовленим вжитими заходами щодо запобігання виникнення некерованої ланцюгової реакції, та зменшенням викидів зі зруйнованого реактора в атмосферу. При коливаннях температури в межах 600—1000°C до атмосфери надходили легколеткі елементи та їхні сполуки, серед яких превалювали ізотопи телуру, йоду та цезію;

третья — була викликана підвищенням температури паливномістких мас до 2000°C та вище, що супроводжувалось відповідним збільшенням потужності викиду та зростанням у ньому частки тугоплавких елементів: стронцію, цирконію, церію, ізотопів плутонію та інших.

Мова може йти і про *четверту* фазу — періодичних збільшеннях активності джерела викидів, що спостерігались ще майже до кінця травня 1986 року, проте забруднення повітря після цієї фази було в десятки разів меншим, ніж під час перших трьох фаз.

Колективна доза опромінювання населення України формувалась під впливом ^{131}I (в перші тижні після аварії), ^{90}Sr і ^{137}Cs (рис. 4). У таблиці 2 показано, як з часом змінювалась активність різних нуклідів. Ця зміна пов'язана не тільки з їхнім фізичним розпадом, але з проникненням їх у землю за десять років.



Рис. 1. Вигляд зруйнованого 4-го блоку ЧАЕС



Рис. 2. Загальний вигляд збудованого об'єкта "Укриття"

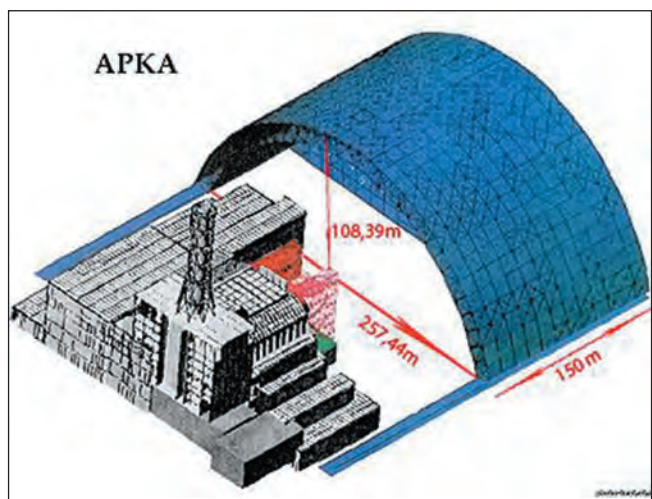
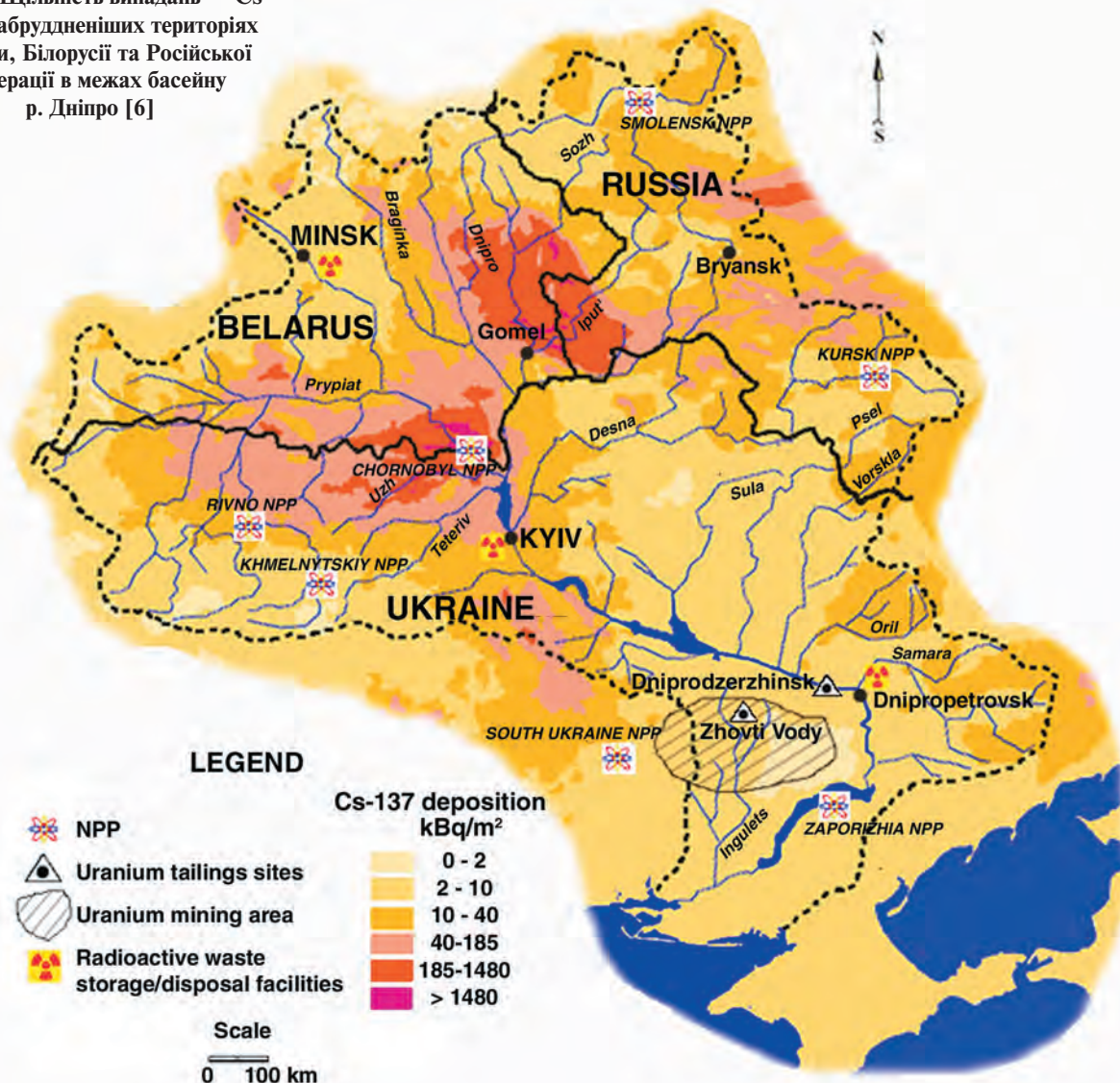


Рис. 3. Загальний вигляд майбутнього "Укриття" (<http://i.kp.ua/a/0x450/12583155.jpg>)

Рис. 4. Щільність випадань ^{137}Cs на найзабрудненіших територіях України, Білорусії та Російської Федерації в межах басейну р. Дніпро [6]



Заходи щодо захисту населення урядом України [5]

Урядова комісія СРСР за поданням голови Держкомгідромету *Ю.А. Израеля* та віце-президента АМН СРСР *Л.А. Ільїна* ухвалила рішення про створення тридцятикілометрової зони відчуження навколо Чорнобильської АЕС. За даними, отриманими в перші дні після аварії щодо рівнів радіації в цій зоні, комісія дійшла висновку, що мешкати в цій зоні небезпечно для життя людини.

Отже, 27 квітня уряд України організував евакуацію мешканців міста Прип'ять із навколишньої зони, потім із міста Чорнобиль та низки сіл із тридцятикілометрової зони. В перший період було вивезено близько 91 тисячу осіб. Зауважмо, що евакуацію з міста Прип'ять проведено на добу пізніше, ніж було заплановано. Хоч урядом України було підготовлено все до евакуації міста вже 26 квітня, проте уряд СРСР затримав проведення евакуації на добу, що безумовно було помилковим. Рівень радіації, який переносився вітром безпосередньо від міста Прип'ять, був таким

високим, що під впливом радіації загинув сосновий ліс навколо міста. Нагадаємо, що сосна гине, отримавши дозу в 1000 Бер (10 Греї), тоді як для людини ця доза становить 400 Бер (4 Греї). Вже в перші дні після аварії радіаційна розвідка повідомила, що найбільш постраждалими є Київська, Житомирська, Чернігівська та Рівненська області, а також місто Київ.

З метою захисту населення в травні 1986 року уряди України та СРСР ухвалили рішення про переселення з цих регіонів вагітних жінок і дітей віком до 18 років до санаторіїв та будинків відпочинку Кавказу, Криму, Карпат та Прибалтики. В другій половині травня з міста Києва до будинків відпочинку також відправлено студентів. Заняття в школах і вузах були достроково припинені. У вересні 1986 року студенти, учні та вагітні жінки повернулися до місць свого постійного проживання, проте це не стосувалося мешканців тридцятикілометрової зони.

Зауважимо, що роботи з ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС уряд проводив у тісному контакті з Академією наук України (рис. 5) та з Академією сільсько-

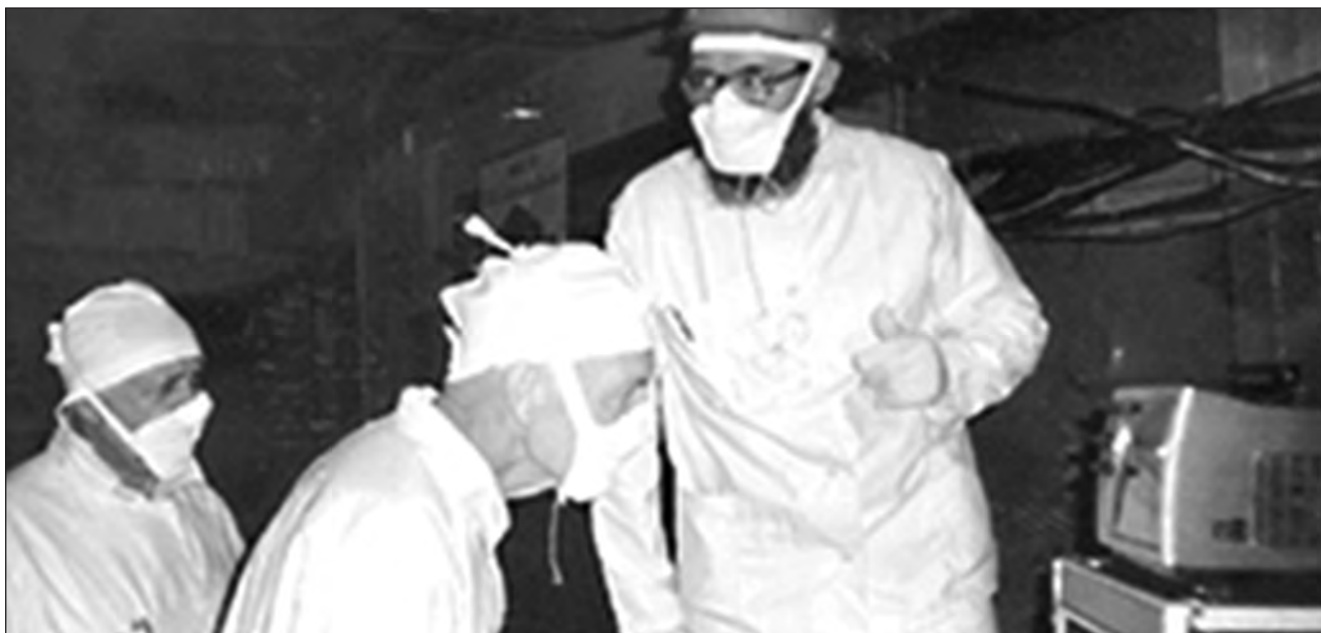


Рис. 5. У пункті контролю стану 4-го зруйнованого блоку ЧАЕС
(у центрі — президент НАН України академік Б.Є. Патон, ліворуч — віце-президент академік В.Г. Бар'яхтар,
пояснює — к.ф.-м.н. К.І. Чечеров)

господарських наук України. Результатом цієї плідної співпраці було ухвалення урядом України найефективніших рішень. Головними завданнями наукових організацій України протягом 1986—1987 років були:

1. Збір, класифікація та передання уряду інформації щодо забруднення сільгоспугідь, води Дніпра та річок Дніпровського басейну, озер Полісся, а також радіаційного забруднення повітря на постраждалих територіях. Зі самого початку на всіх молокозаводах міста Києва був організований контроль забруднення молока. Молоко з вмістом радіонуклідів понад норму ("брудне" молоко) до населення Києва та інших міст України не потрапляло. Вже в другій половині травня також налагоджено контроль за станом сільськогосподарських продуктів на ринках Києва та контроль молока в Житомирській та Чернігівській областях.

2. Надання рекомендацій уряду України з:

- прогнозування радіаційного забруднення довкілля та продуктів харчування у сезонній (періоди повеней, сильних вітрів, сніготанення, зрошення, різні вегетаційні періоди) та довгостроковій перспективі;
- термінового захисту населення;
- оцінки ефективності контрзаходів, які рекомендувались на промайданчику АЕС, в зоні відчуження та за її межами;
- довгострокової програми дій у Чорнобильській зоні відчуження;
- робіт на зруйнованому 4-му блоці ЧАЕС та в містах Прип'ять і Чорнобиль;
- пилепереборювання на дорогах зони відчуження;
- з роботи на працюючих блоках ЧАЕС.

Для запобігання подальших викидів зі зруйнованого 4-го блоку, вже в травні уряд СРСР ухвалив рішення про спорудження укриття над зруйнованим блоком. Проектування й будівництво цієї споруди було виконане впродовж шести місяців після аварії (рис. 2). У 1986 році в укритті встановлено систему

контролю гама- та нейтронних полів, теплового стану та сейсмічного контролю. Контрольно-вимірний апаратура давала змогу інженерам та науковцям комплексної експедиції Інституту атомної енергії ім. Курчатова та Академії наук України спостерігати за станом паливномістких мас у середині об'єкта укриття. Досвід експлуатації цього укриття засвідчив, що подальші викиди радіоактивних речовин із об'єкту практично відсутні. Однак, термін безпечної експлуатації "Укриття" завершується, тому 2011 року розпочали будівництво нового "Укриття", схему якого показано на рис. 3.

Помилки першого періоду (1986—1987 рр.)

1. Заборона інформування населення щодо аварії на ЧАЕС, у результаті чого не була проведена жодна профілактика населення у перші ж дні після аварії. Тільки в другій половині травня надано дозвіл на інформування населення про методи особистої гігієни. Карти радіаційного забруднення території України були засекречені до 1989 року.

2. Уряд СРСР зразу ж після аварії (1986—1987 рр.) відмовився від міжнародної співпраці з ліквідації наслідків ядерної катастрофи.

Евакуація населення та його влаштування [5]

Загалом у 1986 році евакуювали 116 тисяч осіб, у зв'язку з чим виникла проблема термінового будівництва житла для евакуйованих. У 1986—1987 роках для переселенців було побудовано 15 тисяч квартир у багатоквартирних будинках, 23 тисячі будинків та 800 об'єктів соціальної та культурної галузі. Для персоналу ЧАЕС звели місто Славутич. У період від 1986 до 1989 років загальна сума витрат на ліквідацію наслідків аварії становила 12,6 мільярдів доларів США.

Досвід ліквідації аварії на ЧАЕС 1986—1987 років

Нагадаймо найважливіші результати досвіду ліквідації наслідків аварії, здобуті вченими, інженерами та організаторами народного господарства України.

1. Будівництво об'єкта "Укриття" та оснащення його контрольно-вимірною апаратурою з метою контролю за рівнем гама-опромінення, рівнем нейтронного опромінення і сейсмічних коливань та датчиками контролю температури.

2. У 1986 році створено карти забруднення радіонуклідами тридцятикілометрової зони, найбільш забруднених областей України, Білорусі й Росії. Повний набір карт закінчено 1989 року.

Таблиця 2 [5].

Оцінки активності радіонуклідів, викинутих у довкілля внаслідок Чорнобильської катастрофи (на момент аварії та через 20 років)

Радіонукліди	Період напіврозпаду	Активність викиду, ПБк	
		26.04.1986	26.04.2006
Інертні гази			
⁸⁵ Kr	10,72 доби	33	9,058000
¹³³ Xe	5,25 доби	6500	< 0,000000
Легколеткі елементи			
¹²⁹ Te	33,6 доби	240	< 0,000000
¹³² Te	3,26 доби	1150	< 0,000000
¹³¹ I	8,04 доби	1760	< 0,000000
¹³³ I	20,8 години	2500	< 0,000000
¹³⁴ Cs	2,06 року	54	< 0,065000
¹³⁶ Cs	13,1 доби	36	< 0,000000
¹³⁷ Cs	30,0 року	85	53,550000
Елементи з проміжною леткістю			
⁸⁹ Sr	50,5 доби	115	< 0,000000
⁹⁰ Sr	29,12 року	10	6,210000
¹⁰³ Ru	39,3 доби	168	< 0,000000
¹⁰⁶ Ru	368 доби	73	< 0,000077
¹⁴⁰ Ba	12,7 діб	240	< 0,000000
Важколеткі елементи			
⁹⁵ Zr	64,0 діб	196	< 0,000000
⁹⁹ Mo	2,75 діб	168	< 0,000000
¹⁴¹ Ce	32,5 діб	196	< 0,000000
¹⁴⁴ Ce	284 діб	116	< 0,000002
²³⁹ Np	2,35 діб	400	< 0,000000
²³⁸ Pu	87,74 року	0,035	< 0,030000
²³⁹ Pu	24 065 років	0,030	< 0,030000
²⁴⁰ Pu	6537 років	0,042	< 0,042000
²⁴¹ Pu	14,4 років	6	2,292000
²⁴² Pu	376 000 років	0,00004	0,000040
²⁴² Cm	18,1 років	0,9	0,419000
Сума		13 935,89593	< 71,696119

3. Створено систему прогнозів забруднення радіонуклідами вод Дніпра та його водосховищ. Система використовувалась для оперативних прогнозів та обґрунтування водоохоронних заходів від 1986 до 1998 року [5, 6]. Починаючи від 1992 р., математичні моделі, розроблені для аналізу стану забруднень водних об'єктів зони впливу АЕС, впроваджувалися в Європейську систему підтримки прийняття рішень з реагування на радіаційні аварії — РОДОС, яка тепер працює з такою інтеграцією Чорнобильського досвіду в багатьох країнах світу.

4. Створено систему ведення сільського господарства на забруднених територіях, визначено коефіцієнти переносу радіонуклідів ґрунт — рослина — людина та фільтри очищення молока від радіонуклідів.

5. Запропоновано та створено систему виробництва сорбентів для захисту від радіонуклідів і радикалів. Наразі сорбенти активно використовуються лікарями України для лікування різних захворювань.

6. Створено систему очищення організму людини при тяжкому опроміненні радіонуклідами чи радикалами. Ця методика пройшла апробацію в шпиталях і продемонструвала свою ефективність.

7. Розроблено систему дозиметричного контролю та розрахунку доз ліквідаторів, евакуйованих та населення в зонах радіаційного контролю

АЕС "Фукусіма" ([7]—[11])

Другою, після Чорнобильської, великою ядерною аварією у світі була аварія на АЕС "Фукусіма". Ця аварія відбулася 11 березня 2011 року в Японії. Причиною аварії стало природне стихійне лихо — землетрус і, як наслідок цього, цунамі. Важливо підкреслити, що японський уряд і керівництво компанії ТЕЕКО (Токійська електро-енергетична компанія) відразу після аварії звернулись по допомогу до МАГАТЕ, фахівців Росії та України.

Нагадаймо, що всіх атомних станцій в Японії було 18. Діючих енергоблоків із них — 50 [1]. Усі блоки обладнано пристроями для автоматичної зупинки роботи блоку у випадку землетрусу та інших непередбачуваних природних катастроф. Атомна електростанція "Фукусіма" розташована близько до океану (рис. 6) на північному сході о. Хонсю на Північно-американській тектонічній плиті, якраз у тому місці, де вона стикається з Тихоокеанською плитою, що перебуває в постійному русі в напрямі Японії від Гавайських островів. Станція була захищена бар'єром заввишки 10 м, що мало б захистити її від цунамі, які спостерігались у цьому регіоні до 2011 року. Проте висота цунамі, що утворилось 11 березня, досягла позначки 14 м. Отже, причиною аварії на АЕС "Фукусіма" була природна катастрофа, й сталося це вперше в історії розвитку атомної енергетики.

На блоці № 3 в басейні було ядерне паливо, що містило декілька оксидів подільних елементів, виробництва Франції. Окрім того, 6375 відпрацьованих тепловиділяючих збірок, що перебували в центральному сховищі радіоактивних відходів і 496 блоків зі свіжим паливом.



Рис. 6. АЕС "Фукусіма" до землетрусу 11 березня 2011 р.

Порівняння руйнувань та рівня радіоактивності на ЧАЕС і "Фукусімі" показало, що масштаби обох катастроф значно відрізняються. Якщо на ЧАЕС викиди в навколишнє середовище становили 13 ЕБк, то на "Фукусімі" в навколишнє середовище було викинуто приблизно 0,5 ЕБк, що в 20 разів менше, ніж при аварії на Чорнобильській АЕС.

Землетрус й удар цунамі вивели з ладу зовнішні засоби електропостачання і резервні дизельні генератори, що стало причиною непрацездатності всіх систем нормального і аварійного охолодження та призвело до пожежі, розплавлення активної зони реакторів на енергоблоках 1, 2, та 3 у перші ж дні розвитку аварії (рис. 7). Розпочате зі запізненням на 12 годин охолодження енергоблоків морською водою призвело до утворення великої кількості водню в результаті пароконденсатної реакції та вибухів на енергоблоках № 1, 2, 3. З цих причин у навколишнє середовище було викинуто велику кількість благородних газів, а також телур—129, телур—132, йод—131, йод—133, цезій—134, цезій—136, стронцій—89, стронцій—90, цезій—137 (рис. 8).

Уряд Японії своєчасно повідомив населення про ядерну катастрофу на "Фукусімі".

Заходи щодо захисту населення, яке постраждало від катастрофи на АЕС "Фукусіма"

1. Йодна профілактика

Уже через три дні після аварії (14 березня) вжито заходів щодо повномасштабної йодної профілактики населення. Для цього було завезено 230 тисяч доз препаратів йоду та розпочато розподіл цих препаратів по центрах евакуації населення. Особливу увагу приділено йодній профілактиці дітей. Рішенням уряду Японії від 16 березня рекомендовано одноразовий прийом препаратів у таких дозах: діти до одного місяця — 12,5 мг, діти від 1 місяця до 3 років — 25 мг; діти від 3 до 13 років — 38 мг; від 13 до 40 років — 76 мг; після 40 років — йодна профілактика не потрібна. В Японії було ухвалено рішення про одноразовий прийом препаратів йоду, проте, за умови продовження викидів був рекомендований повторний прийом. Затримка йодної профілактики на 3 дні була пов'язана з тим, що довкілля АЕС "Фукусіма" зруйнувалося настільки, що доправити туди йодні препарати було майже неможливим.

Таблиця 3. Кількість паливних блоків на момент аварії на АЕС "Фукусіма"

Енергоблоки	У реакторах	У басейнах	
		Тих, що відпрацювали	Свіжих
Енергоблок 1	400	292	100
Енергоблок 2	548	587	28
Енергоблок 3	548	514	52
Енергоблок 4	0	1331	204
Енергоблок 5	548	946	48
Енергоблок 6	764	876	64

Таблиця 4. Оцінка активності радіонуклідів, що були викинуті у навколишнє середовище внаслідок аварії на АЕС "Фукусіма"

Радіонуклід	Період напіврозпаду	Активність викидів ПБк
⁸⁵ Kr	10,72 року	50
¹³³ Xe	5, 25 доби	10000
¹²⁹ Te	33,6 доби	10
¹³² Te	3,26 доби	100
¹³¹ I	8,04 доби	100
¹³³ I	20,8 року	100
¹³⁴ Cs	2,06 року	10
¹³⁶ Cs	13,1 доби	3



Рис. 7. а) Пожежа на АЕС "Фукусіма". Березень 2011 р.;
б) зруйнований 3-й блок АЕС "Фукусіма"



2. Евакуація населення

Ще одним важливим заходом було переселення 140 тисяч осіб. (Нагадаймо, що з 30-кілометрової зони ЧАЕС у 1986 році було переселено 116 тис. осіб). Безумовно, евакуація населення в Японії є складною економічною та соціальною проблемою, зважаючи на щільність заселення Японських островів, однак, уряд Японії справився з цим оперативно. 11 березня уряд Японії евакуював мешканців із 3-кілометрової зони навколо АЕС "Фукусіма-1" (зона №1). 12 березня було оголошено про евакуацію з 10-кілометрової зони. 15 березня зону евакуації було розширено до 20 км навколо станції (зона №2). Мешканці, які проживали на відстані від 20 до 30 км від АЕС, мали залишатись у приміщеннях, а в повітряному просторі над АЕС у радіусі 30 км заборонялися повітряні перельоти. Своєчасна евакуація населення, за оцінкою 2013 року, різко знизилася ймовірність онкологічних захворювань серед мешканців постраждалих регіонів навколо АЕС "Фукусіма".

План заходів із ліквідації наслідків аварії

У перші дні після аварії на АЕС "Фукусіма" японський уряд та фірма ТЕЕКО розробили план заходів із ліквідації наслідків аварії. Цей план передбачав першорядні дії, а також дальші роботи на 2012 і наступні роки та подальші довготривалі дії.

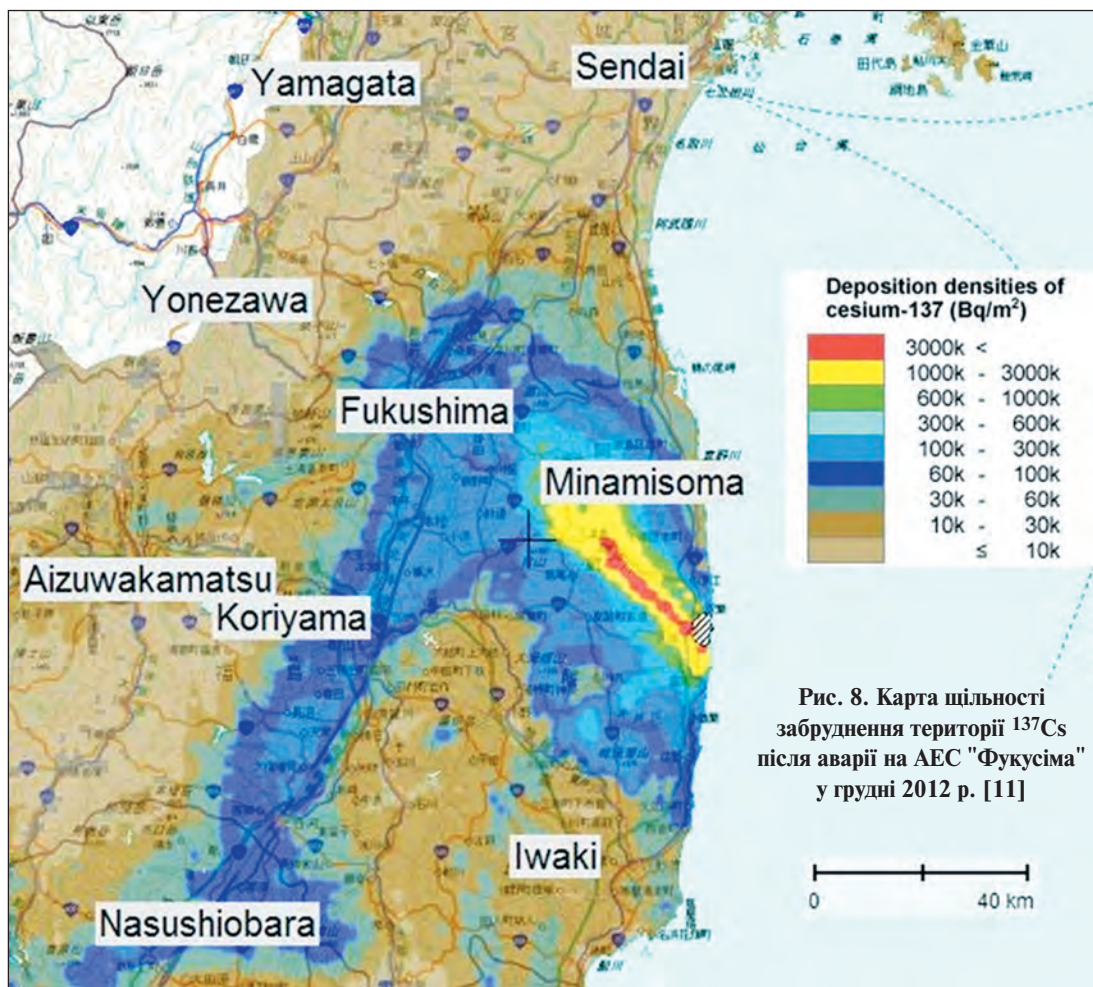


Рис. 8. Карта щільності забруднення території ¹³⁷Cs після аварії на АЕС "Фукусіма" у грудні 2012 р. [11]

План отримав офіційну назву "Дорожня карта". У 2012—2013 роках уряд Японії та керівництво фірми ТЕЕКО запрошували спеціалістів МАГАТЕ з метою обговорення дій за планом "Дорожня карта". Наведено оцінку заходів із ліквідації наслідків аварії на АЕС "Фукусіма" місією МАГАТЕ в 2013 році [7]: "Члени місії МАГАТЕ визнають, що переглянутий план розвитку був розроблений на основі більш реалістичних допущень, що відображали сучасні знання про стан кожного конкретного блоку, а також відгуки та думки всіх зацікавлених сторін. Консультації, надані першою місією МАГАТЕ в квітні 2012 року, також були враховані". В рамках переглянутого плану "Дорожня карта" були ухвалені такі рішення:

1. Створити більш активну організаційну структуру.

2. Зосередити роботу на вирішенні найважливіших та найскладніших питань, таких як управління забрудненими водними ресурсами та видалення палива.

Переглянутий план "Дорожня карта" визначає всеохоплюючу структуру робіт. У ньому також рекомендується використовувати національний та міжнародний досвід і технічні можливості, а також створення Міжнародного дослідницького інституту з виведення з експлуатації ядерних об'єктів. Завданнями такого інституту має бути проведення робіт, необхідних для безпечної реалізації та можливого прискорення діяльності в напрямі виведення з експлуатації АЕС "Фукусіма".

Використання досвіду Чорнобильських досліджень українських науковців у науковому забезпеченні робіт з ліквідації наслідків аварії на АЕС "Фукусіма" розпочалось наприкінці 2012 та 2013 рр. Спочатку були залучені фахівці Інституту проблем безпеки атомних станцій НАН України (*О.О. Ключников*). Після створення Інституту радіоактивності навколишнього середовища Університету Фукусіма (липень 2013 р.) для роботи в ньому з проблем забруднення водних систем запрошено фахівців Інституту проблем математичних машин і систем НАН України (*М.Й. Железняк* і *С.Л. Ківа*) та з проблем лісових екосистем — фахівців Інституту сільгоспродіології Національного університету біоресурсів (*В.А. Кашпаров*, *В.С. Йощенко*). Спільною рисою екологічних проблем після Чорно-

бильської і Фукусімської аварій є роль річок як шляхів виносу радіонуклідів з найзабрудненіших відселених територій на території за межами цих зон. Математичні моделі й методи, що були розроблені для вирішення цих завдань після Чорнобильської аварії в Україні [5, 6], почали впроваджуватись для японських річок.

Висновки

1. Найважливішим є висновок про те, що масштабна аварія може статися на будь-якій АЕС. Тож на кожній з АЕС мають бути розроблені плани технічних заходів із ліквідації аварії та захисту населення від її наслідків. З цими планами необхідно заздалегідь ознайомити весь персонал АЕС та населення тридцятикілометрової зони навколо станції.

2. Регулярно мають проводитись навчання з першочергових заходів ліквідації наслідків аварії та захисту населення. Зокрема, керівництву Міністерства палива та енергетики України й НАЕК "Енергоатом" потрібно поширювати серед населення інформацію про заходи зі захисту мешканців на всіх чотирьох АЕС України.

3. Порівняльний аналіз заходів із ліквідації наслідків катастроф на ЧАЕС та АЕС "Фукусіма" свідчить про той факт, що в обох випадках ні керівництво станцій, ні представники влади не були готові до таких катастроф. Також в обох випадках на станціях були відсутні плани дій у надзвичайних технічних ситуаціях та щодо надання допомоги особам, які отримали різні дози опромінення.

4. Керівництво АЕС "Фукусіма" не було ознайомлене з методами ліквідації наслідків таких масштабних аварій, як на Три Майл Айленд та на ЧАЕС.

5. На жаль, в Україні поступово втрачається неоціненний для всієї світової енергетики досвід із ліквідації таких аварій, як на ЧАЕС.

6. З метою успішної та безпечної роботи українських АЕС необхідною є термінова організація підготовки висококваліфікованих кадрів всіх рівнів для роботи на АЕС.

7. Безперечно, важливою умовою безпечної роботи ядерних об'єктів є політична стабільність у державі.

Автори висловлюють подяку к.ф.-м.н. *І.В. Лещенку* за цікавість до роботи та цінні зауваження. ■

Література

1. **Schneider M., Froggatt et al.** World Nuclear Industry Status Report 2013, — Mycle Schneider Consulting, July 2013, — 139 p.

2. НАЕК "ЕНЕРГОАТОМ", <http://www.energoatom.kiev.ua>

3. Nuclear power plant accidents: listed and ranked since 1952. — The Guardian, www.theguardian.com

4. "20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє. Національна доповідь України" / Під ред. В.І. Балогі та ін. — К.: Атіка, 2006. — 224 с.

5. **Бар'яхтар В.Г., Кухар В.П., Лось І.П., Пояров В.А., Холоша В.І., Шестопалов В.М.** Різномісна оцінка ризиків внаслідок аварії на ЧАЕС. — Проект №369. Український науково-технологічний центр. — Київ, 1998.

6. Radiological conditions in the Dnieper River basin: assessment by an international expert team and recommendations for an action plan. — Vienna: IAEA, 2006. — 186 pp.

7. IAEA, Preliminary summary report IAEA international peer review mission on mid and long term roadmap towards the

decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power station units 1—4. — Japan, 25 Nov. — 4 Dec. 2013.

8. **Omoto A.** The accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: What went wrong and what lessons are universal? // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 2013. — A731. — P. 3—7.

9. **Steinhauser G., Brandl A., Johnson T. E.** Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts // Science of the Total Environment. — 2014. — V. 470—471. — P. 800—817.

10. **Скалзузов Н.В., Ключников А.А., Ващенко В.Н., Яровой С.С.** Аналіз причин та наслідків аварії на АЕС Фукусіма як фактор попередження тяжких аварій у корпусних реакторах. — Чорнобиль: Інститут проблем безпеки АЕС, 2012. — 280 с.

11. Картографічна база даних радіаційного забруднення території Японії після аварії на АЕС Фукусіма, <http://ramap.jmc.or.jp/map/eng/>