

# Підходи до встановлення та обґрунтування розмірів зон аварійного планування навколо АЕС

■ **Богорад В. І.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3380-7110>

■ **Слепченко О. Ю.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-0099>

■ **Калита І. А.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7745-2940>

■ **Литвинська Т. В.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-8526>

■ **Чуприна С. В.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна

■ **Бєлих Д. О.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5782-9827>

Відсутність прозорих чисельних критеріїв визначення розміру зон аварійного планування, з одного боку, та необхідність встановлення таких зон, як з огляду на вимоги ключової щодо аварійного реагування публікації МАГАТЕ GSR Part 7, так і на розуміння місця зон аварійного планування в системі аварійного реагування держави, з іншого, робить актуальною задачу встановлення підходів для визначення величини аварійного викиду, на підставі якої можна проводити відповідне зонування. В статті пропонується до обговорення три підходи до визначення величини граничного викиду, відповідно до якої мають визначатися розміри зон аварійного планування. Також наведені, як приклад, оцінки розмірів зон аварійного планування навколо АЕС, виходячи з величини та радіонуклідного складу граничного викиду.

Ключові слова: радіонуклідний вектор, санітарно-захисна зона, зона спостереження, граничний викид, зони аварійного планування, аварійний викид.

© Богорад В. І., Слепченко О. Ю., Калита І. А., Литвинська Т. В., Чуприна С. В., Бєлих Д. О., 2020

У міжнародній практиці встановлення зон аварійного планування навколо об'єктів, які використовують радіаційно-ядерні технології, проводиться з метою запобігання або мінімізації детерміністичних ефектів і зниження ризиків стохастичних ефектів опромінення у разі виникнен-

ня ядерної або радіаційної аварії. Розміри цих зон встановлюються в державних планах протидії ядерним та радіаційним аваріям. У настанові МАГАТЕ № GS-G-2.1 [1], наприклад, пропонується мінімальний розмір зони попереджувальних заходів – 3–5 км, та зони планування термінових

захисних заходів – 5–30 км. Водночас зазначається, що «розумним для застосування є збільшення розміру зони попереджувальних заходів у два, а то й більше разів. Потрібно застосовувати іншу відстань, якщо її вибір обґрунтовується на деталізованому аналізі безпеки». В Україні до сьогодні така практика на законодавчому рівні була відсутня. Законодавчо визначені навколо АЕС зони (санітарно-захисна зона та зона спостереження) виконують такі функції:

санітарно-захисна зона – зона додаткового бар'єра безпеки, завдяки обмеженням на проживання в ній людей та ведення господарчої діяльності, не пов'язаної з роботою АЕС;

зона спостереження – зона додаткового радіаційного контролю за викидами та скидами з АЕС.

Прийняті Україною на шляху до вступу в ЄС зобов'язання щодо гармонізації існуючої в державі нормативної бази із забезпечення ядерної та радіаційної безпеки з міжнародними стандартами вимагають встановлення на законодавчому рівні зон аварійного планування навколо об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями та забезпечення цих зон необхідними матеріальними та організаційними ресурсами. Тому, оптимальне визначення розміру зон аварійного планування є важливою задачею як з безпекового, так і з економічного погляду.

Як в Україні, так і в міжнародній практиці, з метою підвищення ефективності аварійного реагування у разі аварій, прийнято групування об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями за рівнем загроз для довкілля та населення за п'ятьма основними категоріями, а саме:

об'єкти I категорії – це такі об'єкти, як АЕС, для яких події на майданчику (включно з подіями, які не враховані під час проектування) постулюються як такі аварії, що можуть призвести до виникнення серйозних детермінованих ефектів через опромінення населення за межами промислового майданчика. В разі аварій на цих об'єктах, залежно від їх масштабу, з боку держави мають бути впроваджені заходи із захисту населення від наслідків, зумовлених високими рівнями опромінення великої кількості людей аж до евакуації та переселення. Весь перелік таких заходів, залежно від очікуваних доз опромінення населення, наведено в [2];

об'єкти категорії II – це такі об'єкти, як деякі типи дослідницьких і ядерних реакторів, які використовуються в наукових цілях і як джерела живлення для двигунів суден (наприклад, кораблів і підводних човнів), і для яких події на майданчику постулюються як такі, що можуть призвести до підвищення доз опромінення людей за межами майданчика та виправдовують запровадження тих чи інших захисних заходів, проте для них події на майданчику постулюються як такі, що не можуть призвести до виникнення серйозних детермінованих ефектів за межами майданчика;

об'єкти категорії III (на відміну від категорії II) не містять установок, для яких постулюються події, що виправдовують запровадження термінових захисних заходів або ранніх захисних заходів за межами майданчика (визначення ранніх та термінових захисних заходів наведено в [2]);

до об'єктів IV категорії належать діяльність та дії, які можуть призвести до ядерної або радіаційної аварії, що виправдовує запровадження в передбачуваному місці захисних дій та інших заходів із аварійного реагування;

до об'єктів V категорії належать об'єкти категорії I або II, які розташовані в іншій державі, але радіаційний вплив від яких може бути суттєвим;

Для об'єктів I, II та V категорій відповідно до міжнародних рекомендацій [1] ключовим стратегічним напрямом розбудови системи аварійного реагування пропонується встановлення чотирьох основних зон аварійного планування, які відповідно до їх призначення мають виконувати кожна свої функції і мати відповідну до цих функцій інфраструктуру. Визначення цих зон та функції, які на них мають бути покладені, в [1] сформульовані в загальному вигляді, і кожна держава має конкретизувати ці визначення з урахуванням чинних на її території норм, правил та стандартів. У дещо скороченому варіанті визначення цих зон наведено нижче:

зона попереджувальних заходів устанавлюється лише для об'єктів категорії аварійної готовності I. Для цієї зони передбачають запровадження термінових захисних заходів та інших заходів реагування для попередження або мінімізації серйозних детермінованих ефектів. Для цієї зони має бути забезпечена можливість запровадження всіх попереджувальних захисних заходів, зокрема повна евакуація населення. В зоні попереджувальних заходів повинна бути впроваджена необхідна інфраструктура, передбачені транспортні засоби для переміщення населення, розроблені процедури вибору маршрутів;

зона планування термінових захисних заходів для об'єктів категорії аварійної готовності I або II, визначається як територія навколо об'єкта, яка встановлюється для об'єктів категорії аварійної готовності I та II, і для якої, ґрунтуючись на інформації про умови на об'єкті, якщо можливо, до виникнення будь-якого значного викиду радіоактивного матеріалу (тобто умови, які призводять до оголошення загальної аварії), та після виникнення викиду – на результатах моніторингу та оцінок радіаційної ситуації за межами майданчика, з метою зменшення ризику стохастичних ефектів, передбачають необхідні матеріальні ресурси для впровадження термінових захисних заходів, наприклад, укриття населення в спеціалізованих спорудах та/або проведення йодної профілактики;

зона розширеного планування, для об'єктів категорії аварійної готовності I, II та V визначається

як територія навколо об'єкта, для якої передбачають проведення моніторингу та оцінки радіаційної ситуації за межами майданчика, з метою ефективного зниження ризику стохастичних ефектів через запровадження довгострокових захисних та інших заходів реагування впродовж періоду часу від доби до тижня або декількох тижнів після значного радіоактивного викиду;

зона планування заходів щодо обмеження споживання продуктів харчування та товарів для об'єктів категорії аварійної готовності I, II та V – територія, для якої передбачають проведення заходів реагування для захисту харчових ланцюжків та водопостачання, а також для захисту інших товарів споживання від забруднення внаслідок значного радіоактивного викиду та захисту населення від споживання продуктів харчування й питної води, а також використання інших товарів споживання, які могли зазнати забруднення через значний радіоактивний викид.

Розміри зон аварійного планування, як зазначено в [1], мають бути встановлені для кожного об'єкта на підставі консервативних припущень щодо величини «значного» викиду одного або суміші радіонуклідів, отриманої за результатами аналізу аварій. При тому саме поняття «значного» викиду та радіаційні критерії встановлення цих зон залишаються, так би мовити, поза кадром. З огляду на те, що в кожній державі діє своя нормативна база, це вочевидь виправдано. Відповідно до вимог норм радіаційної безпеки України є цілком логічним зв'язати радіаційні критерії встановлення зон аварійного планування з критеріями, зазначеними [2] в таблицях Д.7.1, Д.8.1 та Д.8.3. А саме з критеріями, які відповідають рівням безумовної виправданості або нижнім межим виправданості для евакуації (I зона), укриття та йодної профілактики (II зона), переселення (III зона) та IV зона контрзаходів щодо обмеження, вилучення або заміни радіоактивно-забруднених продуктів споживання.

Зрозуміло, що встановлення зон аварійного планування має спиратися на певні матеріальні ресурси, кількість яких тим більша, чим більший розмір тієї чи іншої зони. Якщо для об'єктів II категорії варто очікувати, що навіть за найбільш консервативних припущень щодо аварійного викиду, розміри зон і відповідні ресурси будуть мати прийнятний для розуміння і навіть впровадження цієї стратегії характер, то для об'єктів категорії I ми неминуче матимемо проблему вибору сценарію аварії, на підставі якої потрібно проводити зонування.

Для прикладу звернемося до вмісту I-131 в активній зоні (A3). Ця величина складає приблизно  $10^{18}$  Бк дози опромінення щитовидної залози на різних відстанях від точки викиду в припущенні, що внаслідок важкої аварії в оточуюче сере-

довище потрапило 30 % загальної кількості I-131, що вимагає згідно з таблицею Д.7.1 [2] евакуації на відстані приблизно 115 км, а зони планування термінових заходів за критерієм йодної профілактики всі 150 км (розрахунки проводились програмою HotSpot 3.1 [3] для F-категорії стійкості атмосфери в припущенні короткочасного викиду з висоти 60 м).

Якщо звернутися до національних норм і правил безпеки АЕС, то можна побачити, що одним із критеріїв безпеки є критерій за очікуваною частотою виникнення аварій, за яких на межі санітарно-захисної зони АЕС (далі – СЗЗ) можуть створюватися умови для евакуації населення. Сам викид, для якого створюються умови з евакуації населення, в правилах безпеки АЕС [4] визначається як «граничний», і згідно з цими правилами, його частота не повинна перевищувати на реактор  $10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>, тобто 1 аварія на 100000 років. У звітах з аналізу безпеки діючих АЕС через оцінку вірогідності послідовності подій, які можуть призвести до граничного викиду, підтверджено виконання цього критерію.

Ціллю подальшого обговорення є як встановлення підходів до оцінки та обґрунтування розмірів зон аварійного планування, так і отримання наближених точкових оцінок цих розмірів.

Далі пропонується опис трьох підходів до визначення величини граничного викиду, які дозволять провести необхідне зонування тільки на підставі нормативно визначеної частоти граничного викиду (ймовірнісний), визначення величини самого граничного викиду (детерміністичний) та на основі досвіду аварії на Чорнобильській АЕС 1986 року (реалістичний). Зауважимо, що назви підходів носять досить умовний характер і, передусім, відображають їх головну ідею.

Розрахунки будуть проводитися для перших трьох зон з огляду на великий рівень невизначеності параметрів, які зумовлюють прогнози оцінки концентрації радіонуклідів у продуктах харчування і, для свого визначення, потребують застосування спеціальних підходів та методів.

Зауважимо також про те, що розрахунки, які наведені нижче, мають оціночний характер і проводяться для тих значень параметрів, які автори статті вважають референтним. Ці параметри можуть бути уточнені шляхом використання актуалізованих даних щодо реальних характеристик енергоблоків АЕС або застосування більш точних моделей розповсюдження радіоактивного викиду в атмосфері.

Із консервативних міркувань, для проведення оцінки розмірів зон аварійного планування далі вважається, що всі аварійні викиди сконцентровані на короткому інтервалі часу, що, крім іншого, дозволяє нехтувати радіоактивним розпадом та мінливістю метеорологічних умов.

**Ймовірнісний підхід до визначення величини граничного викиду**

У повному обсязі ймовірнісний підхід до визначення величини граничного викиду має спиратися на оцінки частоти аварій, що призводять до радіоактивних викидів, унаслідок яких створюються умови для запровадження заходів щодо захисту населення. Зрозуміло, що ці заходи мають спиратися на певні матеріальні ресурси. Насамперед до таких заходів належить евакуація населення. Чинними в Україні правилами безпеки АЕС вимагається проведення такої оцінки для підтвердження того, що ймовірність усіх радіоактивних викидів, які створюють умови з евакуації населення на межі СЗЗ та за її межами, менше певної величини. Але такий аналіз не дає відповіді на питання, яку саме ймовірність або частоту потрібно застосовувати з метою встановлення розмірів зон аварійного планування. Якщо найбільшу з допустимих, то це рішення не консервативне; якщо найменшу – то це призведе до нереально великих розмірів зон. Можна взяти, наприклад, ймовірність, яка відповідає медіані розподілу випадкової величини, якою, в нашому випадку, є величина викиду. В підході, що описується далі, пропонується оперувати з деякою функцією від викиду, яка в певному сенсі описує деяку середню за своїми наслідками аварію.

Припустимо, що є  $N$  кінцевих станів АЕС за величиною аварійного викиду і кожному викиду  $Q_i$  відповідає вірогідність  $p_i$ . Для функції  $F_j(Q_i)$ , яка викиду  $Q_i$  ставить у відповідність значення  $j$ -го параметра в точці максимуму приземних концентрацій граничного викиду (на межі СЗЗ або за її межами, якщо максимум знаходиться за межею СЗЗ) можна визначити величину  $M(F_j(Q_i), n)$  (залежність  $M(F_j(Q_i), n)$  від кількості енергоблоків фактично означає, що значний викид на одному з двох однакових реакторів має більшу ймовірність ніж на одному (зразу ж встає питання, як бути з визначенням безпеки АЕС за частотою граничного викиду, хоча це не є темою цієї статті), та дорівнює  $\sum_1^N p_i(n) \cdot F_j(Q_i)$ , для якої справедлива нерівність:

$$M(F_j(Q_i), n) \leq \max_{\forall i \leq s} (F_j(Q_i, n)) \cdot \sum_1^s p_i(n) + \max_{\forall i > s} (F_j(Q_i)) \cdot \sum_s^N p_i(n) < (D_{0,j} + \max_{\forall i > s} (F_j(Q_i)) \cdot p_{sum}(n), \tag{1}$$

де:

$n$  – кількість енергоблоків на одному майданчику;

$p_{sum}(n) = \sum_s^N p_i(n)$  – сумарна вірогідність граничного викиду, при тому

$$p_1(n) \geq p_2(n) \geq \dots \geq p_s(n) \geq \dots \geq p_N(n), \text{ для } F_j(Q_1) \leq F_j(Q_2) \leq \dots \leq F_j(Q_s) \leq \dots \leq F_j(Q_N);$$

$D_{0,j}$  – для кожного індексу  $j$  приймають значення нижніх меж виправданості дози, яку відвертають шляхом евакуації за перші 2 тижні після аварії відповідно до таблиці Д.7.1 [2]:

$j = 1, D_{0,1} = 50$  мЗв – ефективна доза опромінення всього тіла;

$j = 2, D_{0,2}$  – доза опромінення щитовидної залози дитини,  $D_{0,2} = 300$  мГр;

$j = 3, D_{0,3}$  – доза опромінення шкіри  $D_{0,3} = 500$  мГр.

Функція  $D_j(Q_i, n) = D_{0,j} + \max_{\forall i > s} (F_j(Q_i)) \cdot p_{sum}(n)$  буде верхньою оцінкою математичного очікування функції  $F_j(Q_i)$ .

Загалом  $Q_i$  можна інтерпретувати як радіонуклідний вектор  $(q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,n})$ , координатами якого є величини радіоактивного викиду за кожним з радіонуклідів. При тому для  $a_1 \geq 0, a_2 \geq 0, \dots, a_n \geq 0$

$$F_j(a_1 \cdot q_{i,1}, a_2 \cdot q_{i,2}, \dots, a_n \cdot q_{i,n}) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot F_j(q_{i,k}), \text{ а}$$

$$\max_{\forall i > s} (F_j(Q_i)) = \sum_{k=s}^N F_j(\max_{\forall i > s} (q_{i,k})),$$

де  $a_v$  – може приймати будь-які позитивні значення. Отже:

$$D_j(Q_i, n) = D_{0,j} + \sum_{k=1}^n F_j(p_i(n) \cdot \max_{\forall i > s} (q_{i,k})). \tag{2}$$

Далі для проведення подальших розрахунків потрібно визначитися з такими параметрами:

значення складових радіонуклідного вектора  $(q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,n})$ , на яких  $F_j(Q_i)$  приймає максимальне значення з врахуванням потужності ядерного реактора;

значення критеріїв, відповідно до яких встановлюються рівні для проведення невідкладних контрзаходів;

значення величини частоти граничного викиду з урахуванням кількості енергоблоків;

значення метеорологічних параметрів і параметрів джерела викиду.

Визначення складових радіонуклідного вектора  $(q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,n})$ , на яких  $F_j(Q_i)$  приймає максимальне значення, має проводитись на підставі даних аналізу запроектованих аварій для конкретного енергоблоку з наступним вибором найгіршого, щодо радіаційних наслідків, сценарію. Однак, з огляду на подібність фізичних процесів, які є основою ядерних перетворень, нормованих на 1 кВт електричної енергії, допустиме використання для реакторів типу LWR (PWR, BWR, ВВЕР, РБМК) узагальнених даних. У таблицях 1 та 2 наведені дані щодо вмісту радіонуклідів (РН) в активній зоні (далі – АЗ) на момент аварії, нормованого на 1 МВт електричної енергії [5], та виходу РН гермооб'єм з розплавленої АЗ, нормований на вміст в АЗ.

Таблиця 1 – Вміст РН в АЗ на момент аварії, нормований на 1 МВт електричної енергії

РН	Вміст в АЗ кБк/(1000МВт)	РН	Вміст в АЗ кБк/(1000МВт)	РН	Вміст в АЗ кБк/(1000МВт)
Kr-85	2,07e+13	Rh-105	1,81e+15	Cs-134	2,78e+14
Kr-85m	8,88e+14	Te-127	2,18e+14	Cs-136	1,11e+14
Kr-87	1,74e+15	Te-127m	4,07e+13	Cs-137	1,74e+14
Kr-88	2,52e+15	Te-129	1,15e+15	Ba-140	5,92e+15
Rb-86	9,62e+11	Te-129m	1,96e+14	La-140	5,92e+15
Sr-89	3,48e+15	Te-131m	4,81e+14	Ce-141	5,55e+15
Sr-90	1,37e+14	Te-132	4,44e+15	Ce-143	4,81e+15
Sr-91	4,07e+15	Sb-127	2,26e+14	Ce-144	3,15e+15
Y-90	1,44e+14	Sb-129	1,22e+15	Pr-143	4,81e+15
Y-91	4,44e+15	I-131	3,15e+15	Nd-137	2,22e+15
Zr-95	5,55e+15	I-132	4,44e+15	Np-239	5,92e+16
Zr-97	5,55e+15	I-133	6,29e+15	Pu-238	2,11e+12
Nb-95	5,55e+15	I-134	7,03e+15	Pu-239	7,77e+11
Mo-99	5,92e+15	I-135	5,55e+15	Pu-240	7,77e+11
Tc-99m	5,18e+15	Xe-131m	3,70e+13	Pu-241	1,26e+14
Ru-103	4,07e+15	Xe-133*	6,29e+15	Am-241	6,29e+10
Ru-105	2,66e+15	Xe-133m	2,22e+14	Cm-242	1,85e+13
Ru-106	9,25e+14	Xe-135	1,26e+15	Cm-244	8,51e+11

Таблиця 2 – Вихід РН з розплавленої АЗ, нормований на вміст в АЗ до початку аварії

Хімічний елемент	Частка виходу з АЗ
Xe, Kr	0,95
I, Br	0,64
Cs, Rb	0,64
Te, Sb, Se	0,44
Ba	0,14
Sr	0,15
Ce, Np, Pu	0,03
Ru, Mo, Tc, Rh, Pd	0,012
La, Y, Pm, Zr, Nd, Eu, Nb, Pr, Sm	0,017

У припущенні незалежності подій, які супроводжуються граничним викидом для різних блоків АЕС, імовірність виникнення однієї події на інтервалі часу  $T$  років для  $n$  енергоблоків дорівнює:

$$p_{sum}(n) = 1 - \exp(-\eta \cdot n \cdot T), \quad (3)$$

де:  $\eta$  – частота виникнення події ( $рик^{-1}$ ).

З огляду на те, що  $\eta \cdot n \cdot T \ll 1$  для визначення  $p_{sum}(n)$  можна використовувати спрощену формулу:  $p_{sum}(n) = \eta \cdot n \cdot T$ .

Згідно з загальними правилами безпеки АЕС [4] частота граничного викиду не перевищуватиме  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$ . Це означає, що ймовірність граничного викиду протягом 30 років (проектний час експлуатації енергоблока)  $p_{sum}(n)$  для 6, 4, 3 та 2 енергоблоків буде дорівнювати або не перевищуватиме відповідно  $1,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,9 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,6 \cdot 10^{-3}$ .

Згідно з даними таблиці 1 та таблиці 2

$$p_{sum}(n) \cdot \max_{\forall i \geq s} (q_{i,k}) = p_{sum}(n) \cdot \psi_{melt,k} \cdot \psi_0 \cdot q_k \cdot E, \quad (4)$$

де:

$q_k \cdot E$  – наведена до номінальної потужності енергоблока  $E$  активність  $k$ -го радіонукліда в АЗ (таблиця 1);

$\psi_{melt,k}$  – величина частки виходу радіонукліда як хімічного елемента в гермооб'ємі з розплавленої АЗ;

$\psi_0$  – частка виходу радіонукліда за межі енергоблока. Ця частка для короткострокового викиду приймається рівною 1.

У разі, коли на одному майданчику розташовані енергоблоки з різною потужністю  $E_1, E_2$ , то:

$$p_{sum}(n) \cdot \max_{\forall i \geq s} (q_{i,k}) = p_{sum}(n_1) \cdot \psi_{melt,k} \times \times \psi_0 \cdot q_k \cdot E_1 + p_{sum}(n_2) \cdot \psi_{melt,k} \cdot \psi_0 \cdot q_k \cdot E_2, \quad (5)$$

де:

$n_1$  – кількість енергоблоків з потужністю  $E_1$ ;

$n_2$  – кількість енергоблоків з потужністю  $E_2$ ;

Якщо  $p_{sum}(n_1) = n_1 \cdot p_{sum}(1)$ , то в межах прийнятих припущень

$$p_{sum}(n) \cdot \max_{\forall i \geq s} (q_{i,k}) = = \psi_{melt,k} \cdot \psi_0 \cdot q_k \cdot p_{sum}(1) \cdot (n_1 \cdot E_1 + n_2 \cdot E_2) = = \psi_{melt,k} \cdot \psi_0 \cdot q_k \cdot p_{sum}(1) \cdot E. \quad (6)$$

Згідно з Д.7.2 1 [2] обов'язкове впровадження того чи іншого контрзаходу відбувається тільки за

Таблиця 3 – Значення функції для різних категорій стійкості атмосфери та відповідні їм відстані від точки розташування джерела викиду

	Категорії стійкості					
	A	B	C	D	E	F
	Відстань, км					
	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	6,0
Значення функції						
$D_1(Q_i)$ , мЗв	<500	<500	<500	<500	<500	<500
$D_2(Q_i)$ , мГр	<1000	<1000	1930	2550	2730	1730
$D_3(Q_i)$ , мГр	<3000	<3000	<3000	<3000	<3000	<3000

умови перевищення рівнів безумовної виправданості для цього заходу, а також з огляду на те, що контрзаходи, які є основою аварійного планування дорого коштують і є дискомфортними для населення, саме рівні безумовної виправданості (а не нижньої межі виправданості) мають бути в основі визначення розмірів зон аварійного планування.

Одним із невідомих, але критичних для невеликих відстаней, параметрів є постульована висота викиду. Консервативним щодо величини приземних концентрації можна вважати припущення, що ефективна висота викиду знаходиться на рівні найвищої точки енергоблока (для ВВЕР-1000 (320) цей рівень складає 66 м). У разі, якщо ефективна висота викиду нижче цього рівня, викид буде потрапляти в зону аеродинамічної тіні будівлі енергоблока, внаслідок чого буде сформоване об'ємне джерело.

Проведені за допомогою моделей атмосферного переносу розрахунки, які використовує комп'ютерна програма [3], показують, що приземні концентрації від такого джерела на рівні землі на осі факела на відстанях 2 км і більше приблизно такі ж, і навіть менші, як і для висотного джерела.

Можна назвати й інші параметри, які необхідно або обґрунтувати, або аргументувати з погляду на природу процесу розповсюдження радіоактивного викиду в атмосфері чи щодо дотримання певних вимог нормативних документів.

У таблиці 3 для встановлених вище припущень щодо частки АЗ, яка потрапляє в оточуюче середовище внаслідок «найгіршої із аварій», для 6000 МВт електричної потужності енергоблока наведені значення  $D_j(Q_i)$  функції для різних категорій стійкості атмосфери та відповідні відстані (відстані, на яких за своїм визначенням функція  $D_j(Q_i)$  досягає максимуму) від умовної точки розташування джерела викиду (точка, від якої визначається розмір СЗЗ).

Далі для отримання чисельних оцінок розмірів зон аварійного планування розрахунки проводились за такими початковими даними:

Кількість енергоблоків – 6;  
 Сумарна потужність –  $6 \cdot 10^3$  МВт;  
 Тип джерела – точкове;  
 Тип викиду – короточасний;  
 Ефективна висота – 66 м;  
 Категорія стійкості атмосфери для ближньої зони (< 6км) Е, для дальньої – F;  
 Швидкість сухого осадження аерозолів – 0,01 м/с;  
 Швидкість вітру – найменша для цієї категорії стійкості (таблиця 4).

Таблиця 4 – Залежність категорії стійкості атмосфери від швидкості вітру на рівні землі.

Швидкість вітру [3], м/с	Категорії стійкості атмосфери		
< 2	A	B	F
2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D

Межі зон аварійного планування розраховуються для викиду  $Q_{0,j}$  такого, що:

$$F(Q_{0,j}, n) = D_j(Q_i, n). \quad (7)$$

У таблиці 5 вказані отримані під час розрахунків відстані від АЕС з різною кількістю енергоблоків, на яких для викиду  $Q_{0,j}$  та погодних умов, що призводять до найгірших радіаційних наслідків, виконуються критерії безумовної виправданості для евакуації (I зона), укриття та йодної профілактики (II зона), переселення (III зона). Ці відстані в межах імовірного підходу можуть бути прийняті за розміри відповідних їм зон аварійного планування (в дужках вставлена категорія стійкості атмосфери, для якої реалізується захід).

Таблиця 5 – Розміри аварійного планування для АЕС з різною кількістю енергоблоків

Кількість енергоблоків (МВт)	Зона I (Евакуація)	Зона II		Зона III (Переселення <sup>1</sup> )
		(Укриття)	(Йодна профілактика)	
Відстань <sup>2</sup> від АЕС, км				
6 (6000)	10	40	50	70
4 <sup>3</sup> (2880)	5	25	35	50
3 (3000)	5	25	35	50
2 (2000)	2.5	10	20	45

<sup>1</sup> Критерієм переселення згідно з таблицею Д.8.1 [2] є потужність дози від забруднення свіжою осколочною сумішшю.

<sup>2</sup> Розміри зон округлялись до зручних для сприйняття величин.

<sup>3</sup> Розрахунки проводились для випадку розташування на одному майданчику 2 блоків по 440 МВт та 2 блоків 1000 МВт.

### Детерміністичний підхід до визначення величини граничного викиду

В основі детерміністичного методу встановлення розмірів зон аварійного планування навколо АЕС лежать консервативні припущення щодо величини та радіонуклідного складу аварійного викиду з урахуванням умов та обмежень на кордонах СЗЗ та зони спостереження (ЗС), застосованих під час встановлення та затвердження в установленому порядку їх розмірів. А саме:

1. Викид має належати до категорії граничних у термінології розділу II [4]: на кордоні СЗЗ створюються умови, що вимагають евакуації населення;

2. На кордоні ЗС та за її межами у разі запроектованих аварій, частота яких дорівнює або перевищує значення показників, установлених відповідно до підпункту 4.1.1 пункту 4.1 розділу IV [4], дози опромінення населення на кордоні ЗС та за її межами не перевищуватимуть критеріїв введення невідкладних контрзаходів (нижніх меж виправданості) – евакуації та йодної профілактики:

ефективна доза – 50 мЗв (вимоги до евакуації (50 мЗв за ефективною дозою та 500 мЗв за еквівалентною дозою на шкіру, надлишкові в тому сенсі, що їх виконання вже забезпечене встановленими в цьому ж пункті обмеженнями на частоту запроектованих аварій);

доза на щитоподібну залозу: у дітей – 50 мЗв; у дорослих – 200 мЗв;

доза на шкіру – 500 мЗв.

Зважаючи на те, що, з погляду на їх радіотоксичність, найбільш небезпечними радіонуклідами, які є в АЗ реактора є радіоізотопи цезію, йоду, стронцію та плутонію, для визначення зон аварійного

планування розглядається граничний викид, для кожного з цих радіонуклідів окремо. За такий вибір говорить і те, що до цих радіонуклідів в нормах радіаційної безпеки встановлюються рівні втручання. Якщо ж звернутися до можливих сценаріїв розвитку аварій, такий вибір відповідає всьому спектру аварій, які супроводжуються значним викидом продуктів поділу – починаючи з викиду летючих продуктів поділу з газового зазору твел (цезій, йод) та закінчуючи плавленням АЗ ядерного реактора (стронцій, плутоній).

В основу визначення розмірів зон аварійного планування згідно з логікою, яка була використана для імовірнісного підходу, обираються критерії, які відповідають рівням безумовної виправданості контрзаходів.

У таблиці 6 наведені дози опромінення щитоподібної залози та ефективні дози опромінення всього тіла за 14 діб в точці максимуму приземних концентрацій R (MAX) за межею СЗЗ, які розраховані за допомогою програми [3] для радіонуклідів Cs-134, I-131, Sr-90 та Pu-238 (вибір цих радіонуклідів обумовлений ступенем їх радіотоксичності згідно з [2]) в припущенні, що кожний із зазначених вище радіонуклідів має активність 1000 ТБк (10<sup>15</sup> Бк). Початкові дані для розрахункової метеорологічної моделі обираються, як і раніше, під час обговорення імовірнісного методу. А саме, ефективна висота викиду – 66 м; швидкість сухого осадження аерозолів – 0,01 м/с; швидкості вітру обираються найменшими для кожної із категорій стійкості (таблиця 4).

Таблиця 6 – Дози опромінення щитоподібної залози та ефективні дози опромінення всього тіла за 14 діб в точці максимуму приземних концентрації за межею СЗЗ

Радіонуклід	Категорії стійкості атмосфери					
	A	B	C	D	E	F
	R (MAX)					
	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	6,0
Опромінення щитоподібної залози						
I-131, Гр	9,7E-02	2,1E-01	2,7E-01	3,7E-01	4,0E-01	2,4E-01
Опромінення всього тіла						
I-131	7,4E-03	1,6E-02	2,0E-02	2,8E-02	3,0E-02	1,8E-02
Cs-134	2,3E-02	5,1E-02	6,4E-02	8,8E-02	9,5E-02	5,6E-02
Sr-90	2,6E-02	5,6E-02	7,0E-02	9,7E-02	1,0E-01	2,1E-02
Pu-238	3,1E+01	6,9E+01	8,6E+01	1,2E+02	1,3E+02	2,6E+01

Визначення граничного викиду [4], граничний викид для кожного з радіонуклідів задовольняє рівнянню:

$$Q_{D,i} = \min_j \frac{D_{0,i}}{D_{i,j}} \cdot 10^{15} \text{ Бк}, \quad (8)$$

де:

$Q_{D,i}$  – величина граничного викиду по  $V$ -му радіонукліді;

$D_{i,j}$  – визначається за таблицею 5,  $j$  – номер категорії стійкості атмосфери на момент викиду.

Якщо подальші розрахунки розмірів зон аварійного планування проводити для граничного викиду, який задовольняє рівнянню (8), то для першої зони ця відстань автоматично буде дорівнювати відстані до межі СЗЗ, тобто 2,5 км.

У таблиці 7 вказані відстані від АЕС, на яких для викиду  $Q_{D,i}$  та погодних умов, що призводять до найгірших радіаційних наслідків, застосовуються критерії меж безумовної виправданості для укриття та йодної профілактики (II зона), переселення (III зона).

### Реалістичний підхід

З боку реалістичного підходу до встановлення зон аварійного планування було б цілком

Таблиця 7 – Розміри зон аварійного планування для АЕС (детерміністичний підхід)

Радіонуклід	Зона II (укриття) (йодна профілактика)		Зона III (переселення <sup>1</sup> )
	Відстань <sup>2</sup> від АЕС, км		
I-131	-	30	-
Cs-134	45	-	110
Sr-90	45	-	150
Pu-238, 239, 240	45	-	80

<sup>1</sup> Критерієм переселення згідно з таблицею Д.8.1 [2] є щільність забруднення території радіонуклідами Cs, Sr та Pu.

<sup>2</sup> Розміри зон округлялись до зручних для сприйняття величин.

логічним звернутися до однієї із важких аварій, яка вже відбулася. Наприклад, аварія на Чорнобильській АЕС 1986 року. Цю аварію без сумніву можна віднести до розряду гіпотетичних. На рисунку 1 показана динаміка сумарного викиду радіоактивних речовин протягом 10 діб та окремо викиду Cs-137 [6].

На рисунку 2 показана векторна діаграма розподілу величини сумарної активності викиду за напрямками (вздовж векторів показані дати та час викидів).

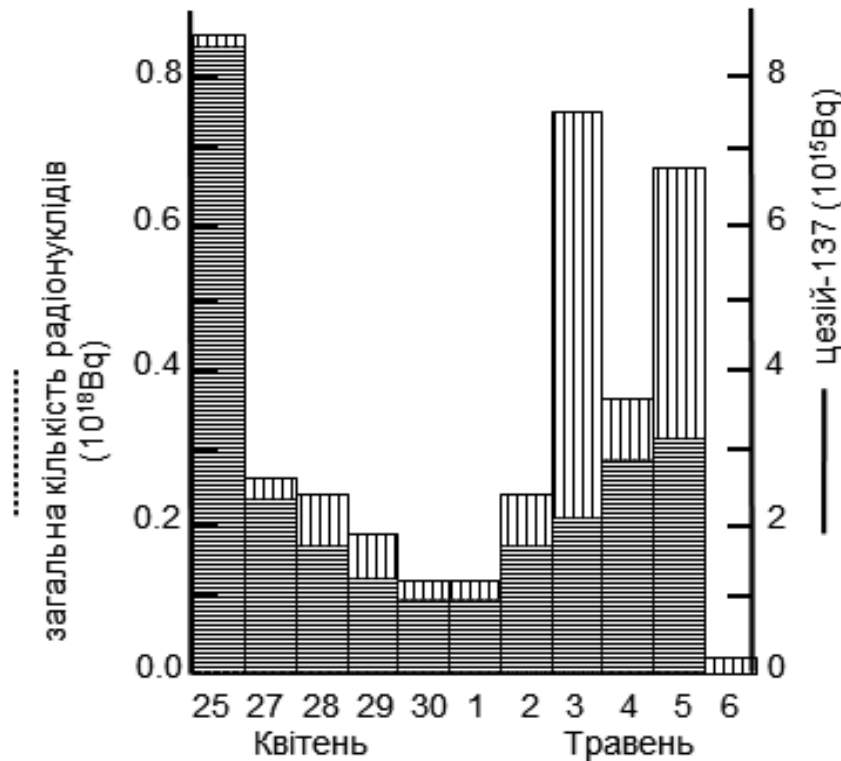


Рисунок 1 – Щодобові радіоактивні викиди з аварійного блока [6]



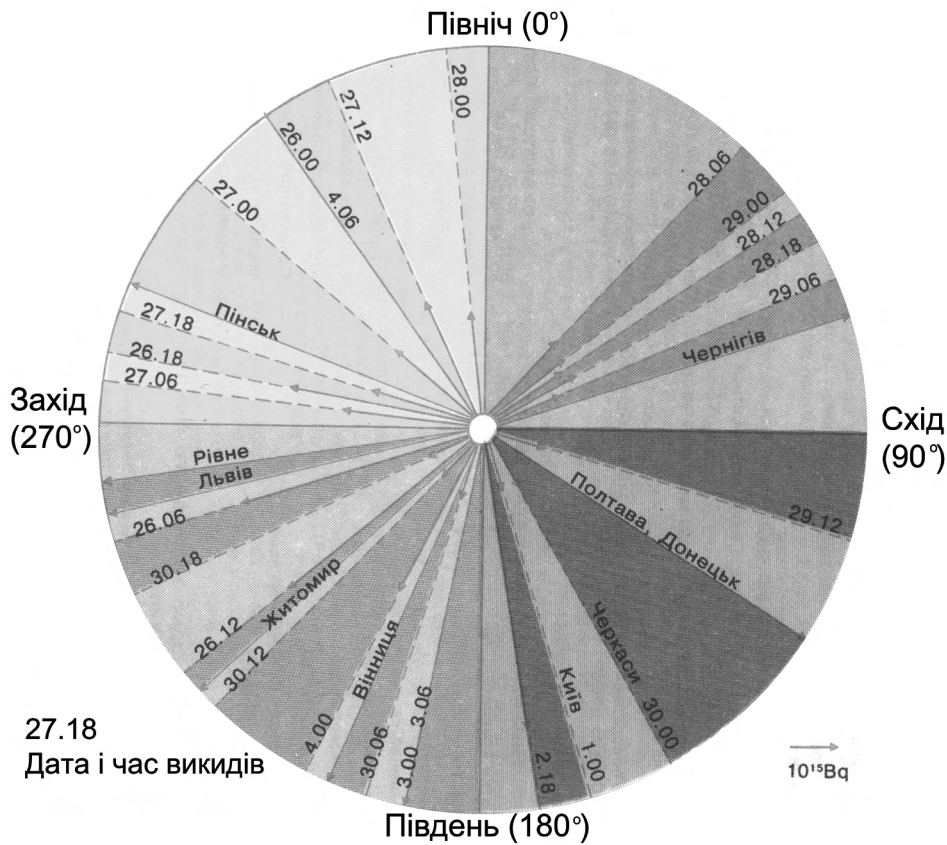


Рисунок 2 – Векторна діаграма радіоактивних викидів (у Бк), побудована для середнього напрямку вітру в граничному шарі атмосфери [6]

З рисунка 2 видно, що найбільший за величиною викид в одному напрямку відбувався 26 квітня та 4 травня 1986 року і за абсолютною величиною становив  $8,5 \cdot 10^{15}$  Бк

Категорії стійкості атмосфери для розрахунків беруться такими:

E – до 6 км;

F – на дальніх відстанях (>6 км).

Радіоактивний викид складається з чотирьох дозоутворюючих радіонуклідів (обґрунтування дивись вище), які знаходяться у викиді в такому співвідношенні, що і в паливі (таблиця 1). Усі інші параметри викиду беруться такими, як і під час проведення попередніх оцінок.

Виконавши необхідні розрахунки, отримаємо такі значення радіонуклідного викиду в Бк:

I-131 –  $6,95E+15$

Cs-137 –  $6,13E+14$

Sr-90 –  $3,02E+14$

Pu-238 –  $4,65E+12$

У таблиці 8 вказані розміри зон аварійного планування для АЕС отримані із застосуванням реалістичного підходу.

Якщо повернутися до контрзаходів із захисту населення, які були впроваджені з початку аварії на Чорнобильській АЕС у липні-травні 1986 року, то зауважимо про те, що евакуація та йодна профілактика були проведені для містечка енергети-

Таблиця 8 – Розміри зон аварійного планування для АЕС (реалістичний підхід)

Радіонуклід	Зона I	Зона II		Зона III (переселення <sup>1</sup> )
		(укриття)	(йодна профілактика)	
Відстань <sup>2</sup> від АЕС, км				
I-131	10	40	50	-
Cs-134	<2,5	5	-	40
Sr-90	<2,5	5	-	110
Pu-238, 239, 240	4	40	-	100

<sup>1</sup> Критерієм переселення згідно з Таблицею Д.8.1 [2] щільність забруднення території радіонуклідами Cs, Sr та Pu.

<sup>2</sup> Розміри зон округлялись до зручних для сприйняття величин.

ків (5 км від 4-енергоблока), а переселення було проведено на відстані 30 км, що завдяки метеорологічним умовам, які супроводжували радіоактивний викид, відповідає чинним на сьогодні нормам радіаційної безпеки щодо проведення цих контрзаходів. Втім такі заходи як укриття та йодна профілактика на відстанях до 50 км не були проведені через відсутність стратегії дій

(зокрема, законодавчо визначених зон аварійного планування) на випадок ядерної аварії.

### Висновки

Розглянуті в статті підходи до визначення розмірів зон аварійного планування на підставі проведеного чисельних розрахунків показали, що ця задача може бути вирішена як з погляду ймовірного підходу до вибору граничного викиду, так і з погляду детерміністичного розуміння цієї задачі. Водночас, всі три підходи, розглянуті в статті, не передбачають використання великого обсягу матеріалів з безпеки ядерних енергоблоків і навіть дають можливість практично повністю від них абстрагуватися.

Під час застосування ймовірного підходу на відміну від детерміністичного та реалістичного, розміри зон залежать від кількості енергоблоків на одному майданчику, що, на думку авторів, більше узгоджується з уявленнями про безпеку, і розвиток якого є більш перспективним.

У таблиці 9, яку можна вважати підсумковою, вказані значення граничних викидів за дозоутворюючими радіоізотопами цезію, йоду, стронцію та плутонію для трьох, розглянутих в статті підходів.

Таблиця 9 – Значення граничних викидів за дозоутворюючими радіоізотопами для ймовірного, детерміністичного та реалістичного підходів

I-131	Cs-134	Sr-90	Pu-238
Ймовірнісний підхід, Бк/1000 МВт			
3,69E+14	3,26E+13	7,54E+11	1,16E+10
Детерміністичний підхід, Бк/1000 МВт			
2,5 E+15	5,3 E+15	5,0E+15	4,16E+11
Реалістичний підхід, Бк/1000 МВт			
6,95E+15	6,13E+14	3,02E+14	4,65E+12

Проведені розрахунки показали, що під час застосування детерміністичного підходу розмір III зони суттєво більший за ті, що отримані в двох інших методах. Це зумовлено тим, що в межах детерміністичного підходу розміри зон встановлювались окремо для кожного радіонукліда. Водночас, для III зони найбільш критичним радіонуклідом, згідно з таблицею Д.8.3. [2] є Sr-90, якого в реальних аварійних викидах значно менше ніж радіонуклідів цезію та йоду. Це добре видно з таблиці 9.

У підсумку, з урахуванням усіх трьох підходів до встановлення зон аварійного планування, остаточно можна рекомендувати такі радіуси (*R*) (радіуси визначаються відповідно до п.3.3 [7]) зон аварійного планування АЕС:

**Зона I (зона попереджувальних заходів)** – 5–10 км (залежно від відстані до найбільш віддаленої від енергоблоків будівлі в містечку енергетиків та кількості сумарної потужності всіх енергоблоків АЕС);

**Зона II (зона планування термінових захисних заходів)** – 50 км, незалежно від кількості енергоблоків;

**Зона III (зона розширеного планування)** – 110 км, незалежно від кількості енергоблоків.

Описані в статті підходи та оцінки розмірів зон аварійного планування носять узагальнений характер і, на думку авторів, можуть бути використані під час актуалізації нормативної бази з питань аварійної готовності та реагування.

### Список використаної літератури

1. Нормы безопасности МАГАТЭ. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. № GSR Part 7.
2. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1997 № 62.
3. HotSpot 3.0 Homann S., F. Aluzzi, Software Manual, LLNL-SM-636474.
4. Загальні положення безпеки атомних станцій. НП 306.2.141-2008. Затвердж. наказом Держатомрегулювання України від 19.11.2007 № 162, зареєстр. в М-ві юстиції України 25.01.2008 за № 56/14747.
5. INTERNETIONAL RTM-95. Volume 2. US regulatory commission.
6. Атлас чорнобильської зони відчуження. НІЦ радіогідроекологічних досліджень НАН України, 1996 р.
7. Вимоги щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції. НП 306.2.173-2011. Затвердж. наказом Держатомрегулювання та МОЗ України від 07.11.2011 № 153/766, зареєстр. в М-ві юстиції України 24.11.2011 за № 1343/20081.

### References

1. IAEA Safety Standards Series. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7.
2. Radiation Safety Standards of Ukraine NRBU-97. State Health and Safety Regulations. DGN 6.6.1-6.5.001-98. Approved by Resolution of the Chief State Medical Doctor of Ukraine No. 62 dated 01 December 1997.
3. Homann, S., Aluzzi, F. HotSpot 3.0 Software Manual, LLNL-SM-636474.
4. General Safety Rules for Nuclear Power Plants. NP 306.2.141-2008. Approved by SNRIU Order No. 162 dated 19 November 2007, registered in the Ministry of Justice of Ukraine under No. 56/14747 dated 25 January 2008.

5. INTERNETIONAL RTM-95. Volume 2. U.S. Regulatory Commission.

6. Collection of maps of Chernobyl exclusion zone. (1996). Radioenvironmental Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine.

7. Requirements for determining the size and boundaries of the NPP observation area. NP 306.2.173-2011. Approved by SNRIU Order No. 153/766 dated 07 November 2011, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 24 November 2011 under No. 1343/20081.

### **Approaches to the Establishment and Justification of the Size of Emergency Planning Areas around NPPs**

**Bogorad V., Slepchenko O., Kalyta I., Lytvynska T., Chupryna S., Bielykh D.**

State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

Emergency planning zones around facilities that use radiation and nuclear technologies are set up in order to prevent or minimize deterministic effects and reduce risks of stochastic effects of radiation exposure in case of nuclear or radiological emergency. In international practice, in order to enhance effectiveness of response to emergencies, it is common to set up emergency planning zones for nuclear facilities in accordance with their level of threat for the environment and public. As the establishment of such zones requires certain material resources, the size of the zones is to be justified.

As of today, sanitary-protective zone and monitoring zone in Ukraine could be considered, to a certain extent, as analogues of such emergency planning zones. However, the main functional load of these zones are relevant more for routine operation of nuclear facilities than for the issues of emergency planning and do not have such a specific for the emergency planning zones functions as ensuring necessary infrastructure for conducting such urgent protective actions as evacuation, sheltering, notification, relocation and others in case of severe accidents at NPPs.

Absence of transparent numerical criteria for determining the size of emergency planning areas, on one hand, and necessity to determine such areas as required by the key IAEA publication GSR Part 7, as well as due to understanding the importance of emergency planning areas in the state emergency response system, on the other hand, make the task on establishing approaches to the definition of the scope of emergency release, which is a framework for emergency zoning, crucial.

The paper proposes to discuss two approaches to defining the scope of the boundary release, according to which the size of the emergency planning areas is to be defined. The paper presents results of assessing the size of the emergency planning areas around NPPs based on the scope and radionuclide composition of the boundary release.

**Key words:** boundary release, emergency planning zone, emergency release, monitoring zone, radionuclide vector, sanitary-protective zone.

Отримано 06.02.2020.