

УДК 621.039.586:343.326(049.2):504.064.3

В. Берковський^{1,2}✉, Г. Ратія^{1,2}, Ю. Бончук^{1,2}

¹Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини Національної Академії медичних наук України», вул. Мельникова, 53, м. Київ, Україна, 04050

²Науково-дослідний інститут радіаційного захисту Академії технологічних наук України, вул. Мельникова, 53, м. Київ, Україна, 04050

ІНДИВІДУАЛЬНИЙ РАДІОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПІСЛЯ ЗНАЧНИХ ВИКИДІВ РАДІОНУКЛІДІВ У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Ядерні установки можуть містити великий обсяг радіоактивного матеріалу, а надзвичайна ситуація, спричинена аварією, стихійним лихом або зловмисною дією, може призвести до неконтрольованих викидів радіонуклідів у навколишнє середовище. У статті міститься короткий огляд індивідуального радіологічного моніторингу у випадках значних викидів радіонуклідів у навколишнє середовище та представлена нова Доповідь 92 Міжнародної комісії з радіаційних одиниць і вимірювань (МКРО) з питань радіаційного моніторингу для захисту населення після значних викидів радіонуклідів у навколишнє середовище. Доповідь 92 була підготовлена з урахуванням результатів НДР «Розробка програми радіаційно-гігієнічного моніторингу для радіологічного захисту людини при радіаційних аваріях та актах ядерного тероризму», що виконувалась у лабораторії дозиметрії внутрішнього опромінення ННЦРМ НАМН України у 2016–2018 рр. Комітет з підготовки Доповіді очолював науковий керівник цієї НДР, до складу Комітету входили провідні експерти з Великобританії, Італії, Китаю, Німеччини, Росії, Словенії, США, України, Японії та Міжнародного агентства з атомної енергії. Підготовка Доповіді 92 підтримана Агентством із захисту навколишнього середовища США, Комісією з ядерного регулювання США, Міністерством енергетики США, НАМН України та Науково-дослідним інститутом радіаційного захисту АТН України.

Ключові слова: радіологічний моніторинг, ядерні або радіологічні надзвичайні ситуації, радіаційне опромінення, програми моніторингу, індивідуальний моніторинг.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2018. Вип. 23. С. 37–48. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-37-48.

V. Berkovski^{1,2}✉, G. Ratia^{1,2}, Yu. Bonchuk^{1,2}

¹State Institution «National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 53 Melnykova str., Kyiv, 04050, Ukraine

²Radiation Protection Institute of the Academy of Technological Sciences of Ukraine, 53 Melnykova str., Kyiv, 04050, Ukraine

INDIVIDUAL RADIOLOGICAL MONITORING AFTER MAJOR RELEASES OF RADIONUCLIDES TO THE ENVIRONMENT

Nuclear installations may contain a large inventory of radioactive material and an emergency caused by an accident, natural disaster, or malevolent act may cause uncontrolled releases of radionuclides to the environment. The paper presents a brief overview of individual radiological monitoring in case of major releases of radionuclides to the environment and introduces the new Report 92 of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) on Radiation Monitoring for Protection of the Public after Major Releases of Radionuclides to the Environment. The Report was prepared taking into account the results of the research «Development of the program for radiation and hygienic monitoring for the radiological protection of human under radiation accidents and acts

✉ Берковський Володимир Борисович, e-mail: v.berkovskyy@gmail.com

of nuclear terrorism» which was carried out in the internal dosimetry laboratory of the NRCRM of NAMS of Ukraine in 2016–2018. The Report Committee was headed by the scientific supervisor of the research, the Committee consisted of leading experts from UK, Italy, China, Germany, Russia, Slovenia, United States, Ukraine, Japan, and experts from the International Atomic Energy Agency. The preparation of the Report was supported by the US Environmental Protection Agency, US Nuclear Regulatory Commission, US Department of Energy, National Academy of Medical Sciences of Ukraine, and Radiation Protection Institute of the ATS of Ukraine.

Key words: radiological monitoring, nuclear or radiological emergencies, radiation exposure, monitoring programmes, individual monitoring.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2018;23:37-48. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-37-48.

ВСТУП

Найзначніші ядерні аварії трапились на Чорнобильській АЕС (колишній СРСР, 1986 р.) та на АЕС Фукусіма Дайічі (Японія, 2011 р.). Ядерні чи радіологічні надзвичайні ситуації можуть також виникати на інших типах об'єктів або з пристроями, що містять значні обсяги радіоактивного матеріалу. Такі події можуть призводити до великомасштабного забруднення навколишнього середовища та вимагати захисних заходів і радіологічного моніторингу населення та аварійного персоналу. Прикладом таких подій є аварія у м. Гоянія з медичним джерелом (Бразилія, 1987 р.) та аварії з ядерною зброєю біля селища Паломарес (Іспанія, 1966 р.) і Туле (Данія, 1968 р.).

Ядерні або радіологічні надзвичайні ситуації трапляються зрідка, але у випадку виходу радіоактивного матеріалу в навколишнє середовище необхідні швидкі заходи для запобігання та пом'якшення його наслідків для здоров'я населення. Оператори ядерних установок, призначені урядові організації та спеціалізовані медичні установи повинні мати адекватні можливості для радіологічного моніторингу, готові до використання у надзвичайних ситуаціях. Основна мета радіологічного моніторингу у випадку надзвичайної ситуації полягає в тому, щоб захистити життя та здоров'я потенційно постраждалих осіб, а також у швидкому і точному збиранні даних для інформування осіб, які повинні негайно приймати рішення про застосування захисних заходів.

У 2016–2018 рр. в лабораторії дозиметрії внутрішнього опромінення ННЦРМ НАМН України виконувалась НДР за темою, що стосується радіологічного моніторингу у випадку надзвичайних ситуацій, а саме – «Розробка програми радіаційно-гігієнічного моніторингу для радіологічного захисту людини при радіаційних аваріях та актах ядерного тероризму». Результати цієї НДР було використано при підготовці Доповіді 92 Міжнародної комісії з радіаційних одиниць і вимірювань (МКРО) з питань радіаційного моніторингу для за-

INTRODUCTION

Major nuclear accidents occurred at the Chornobyl NPP (former USSR, 1986), and at the Fukushima Daiichi NPP (Japan, 2011). Nuclear or radiological emergencies may also occur at other types of installations or with devices containing significant amounts of radioactive material. Such events may result in large-scale environmental contamination and necessitate protective actions and radiological monitoring of the members of the public and emergency workers. The Goiania accident with a medical source (Brazil, 1987) and accidents with nuclear weapons in Palomares (Spain, 1966) and Thule (Denmark, 1968) are examples of such events.

Nuclear or radiological emergencies are rare, but when a release of the radioactive material to the environment occurs, protective actions need to be implemented promptly to mitigate the impact on public health. The operators of nuclear installations, the designated governmental organizations and specialized medical institutions, should have adequate radiological monitoring capabilities ready to use if an emergency occurs. The primary goal of radiological monitoring in case of an emergency is to protect lives and health of potentially affected persons and to collect data quickly and accurately to inform decision makers who must decide on protective actions immediately.

In 2016–2018 years in the internal dosimetry laboratory of the NRCRM of NAMS of Ukraine, it was performed the research on the topic of radiological monitoring in case of emergencies, namely, «Development of the program for radiation and hygienic monitoring for the radiological protection of human under radiation accidents and acts of nuclear terrorism». The results of this research were used during the preparation of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 92 on Radiation Monitoring for

хисту населення після значних викидів радіонуклідів у навколишнє середовище [1]. Участь у підготовці Доповіді є важливим внеском України (ННЦРМ НАМН України та Науково-дослідного інституту радіаційного захисту АТН України) у діяльність МКРО.

Доповідь 92 МКРО подає докладну практичну інформацію про радіологічний моніторинг для захисту населення і навколишнього середовища від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання після значних викидів радіоактивного матеріалів до навколишнього середовища. У звіті розглядається розробка та експлуатація програм і систем радіологічного моніторингу за межами об'єкта. Матеріал Доповіді базується на досвіді, отриманому в результаті реагування на попередні аварії з радіоактивними викидами або потенційними радіоактивними викидами, поєднаному з аналізом різних стратегій та процедур, які використовуються країнами в усьому світі. Доповідь 92 МКРО містить такі розділи:

- Глава 1. Вступ.
- Глава 2. Значні радіоактивні викиди у навколишнє середовище.
- Глава 3. Програми моніторингу.
- Глава 4. Системи та методи моніторингу.
- Глава 5. Величини, що використовуються у радіаційному захисті.

У додатках надаються додаткові пов'язані деталі та обговорюються конкретні радіологічні надзвичайні ситуації. Обговорення зосереджено на надзвичайних та існуючих ситуаціях опромінення, спричинених аваріями на атомних електростанціях, але ця Доповідь може також бути корисною у випадку інших ядерних або радіологічних надзвичайних ситуацій. Цільовими користувачами Доповіді є особи та організації, відповідальні за планування, проектування і функціонування радіологічного моніторингу за межами об'єкта на державному, регіональному та місцевому рівнях. Доповідь також може бути корисною державним органам влади та організаціям, які регулюють та впроваджують готовність до надзвичайних ситуацій і реагування на них, а також для відновлення навколишнього середовища територій, постраждалих від надзвичайної ситуації.

РАДІОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ОПРОМІНЕННЯ

Міжнародна комісія з радіологічного захисту [2] та Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) [3] визначають надзвичайну ситуацію опромінення як ситуацію, яка виникає внаслідок аварії, зловмисного акту або будь-якої іншої несподіваної події та вимагає

Protection of the Public after Major Releases of Radionuclides to the Environment [1]. Participation in the preparation of this Report is an important contribution of Ukraine (by the NRCRM of NAMS of Ukraine and Radiation Protection Institute of the ATS of Ukraine) to the ICRU activities.

The ICRU Report 92 provides detailed practical information on radiological monitoring for the protection of the people and the environment from harmful effects of ionizing radiation after major releases of radioactive material to the environment. The Report deals with the design and operation of off-site radiological monitoring programmes and systems. The material of the Report is based on the experience gained from responding to prior accidents that involved radioactive releases or potential radioactive releases combined with analyses of various policies and procedures used by countries worldwide. The ICRU Report 92 includes the following chapters:

- Chapter 1. Introduction;
- Chapter 2. Major Radioactive Releases to the Environment;
- Chapter 3. Monitoring Programs;
- Chapter 4. Monitoring Systems and Methods;
- Chapter 5. Quantities used in Radiation Protection.

Appendices provide additional related details and discuss specific radiological emergencies. The discussion is focused on emergency and existing exposure situations caused by accidents at nuclear power plants, but the Report may also be handy in case of other nuclear or radiological emergencies. Target users of the Report are individuals and organizations responsible for the planning, design and operation of off-site radiological monitoring at national, regional and local levels. The Report can also be useful for national authorities and organizations regulating and implementing the emergency preparedness and response and the environmental remediation of areas affected by an emergency.

RADIOLOGICAL MONITORING IN AN EMERGENCY EXPOSURE SITUATION

The International Commission on Radiological Protection [2] and International Atomic Energy Agency (IAEA) [3] define an emergency exposure situation as a situation that arises from an accident, a malicious act, or any other unexpected

оперативного реагування для запобігання або зменшення негативних наслідків. Попереджувальні заходи мають бути належним чином розглянуті до настання надзвичайної ситуації. Після виникнення надзвичайної ситуації опромінення людини може бути зменшене лише шляхом негайного запровадження захисних заходів та інших заходів реагування. Рішення щодо конкретних захисних дій повинні ґрунтуватися на плані дій у випадку надзвичайних ситуацій, інформації про аварійне джерело та дані радіологічного моніторингу. Радіологічний моніторинг є важливою частиною системи управління надзвичайними ситуаціями, і його значення зростає з розвитком надзвичайної ситуації [1].

ДАНІ ДЛЯ РАДІОЛОГІЧНИХ ОЦІНОК

Оцінка зовнішнього опромінення, як правило, включає оцінку опромінення від хмари викиду та опромінення від випадіння на ґрунті. У надзвичайній ситуації опромінення доза зовнішнього опромінення від радіонуклідів у хмарі викиду може бути оцінена за вимірюваннями потужності дози або за вимірюваннями концентрацій радіонуклідів у повітрі. Коли це можливо, важливо відібрати зразки і виміряти радіаційно значущі радіонукліди, представлені у хмарі викиду.

В умовах надзвичайної ситуації опромінення доза зовнішнього опромінення від радіонуклідів у випадіннях на ґрунт може бути визначена за результатами вимірювань потужності дози опромінення, зроблених після проходження хмари викиду. Вона також може бути отримана з концентрацій активності, виміряних у зразках навколишнього середовища. Дози зовнішнього опромінення від випадіння радіоактивного матеріалу, як правило, розраховуються для обмеженого часового проміжку (від декількох годин до декількох днів), що відповідає запровадженню невідкладних захисних заходів, таких як укриття або евакуація. Ефект екранування будівельними конструкціями може враховуватися за наявності таких даних та ефективності укриття.

Початкові розрахунки доз внутрішнього опромінення повинні в першу чергу бути спрямовані на інгаляційний шлях опромінення, оскільки цей шлях є важливим для реалізації невідкладних захисних заходів, таких як укриття, евакуація та йодна профілактика. Доза внутрішнього опромінення за рахунок інгаляційного шляху надходження радіонуклідів, присутніх у хмарі викиду, може бути отримана з вимірювань концентрацій активності радіонуклідів у повітрі або з результатів моделювання на основі моніторингу джерела. На оцінку дози внутрішнього опромінення за рахунок інгаляційного шляху над-

event, and requires prompt action to avoid or reduce adverse consequences. Preventive measures have to be considered well before an emergency. Once an emergency occurs, human exposure can be reduced only by promptly implementing protective actions and other response actions. Decisions on specific protective actions should be based on the emergency plan, information about the emergency source, and data of radiological monitoring. Radiological monitoring is an important part of the emergency management system, and its importance increases as the emergency progresses [1].

DATA FOR RADIOLOGICAL ASSESSMENTS

The assessment of external exposure will generally include assessments of exposure from the plume and from deposits on the ground. The external exposure in the emergency exposure situation from radionuclides present in the plume can be derived from dose rate measurements or from measurements of the concentrations of airborne radionuclides. When possible, it is important to sample and measure the radiologically significant radionuclides present in the plume.

External exposure in the emergency exposure situation from radionuclides deposited on the ground can be derived from dose rate measurements made after the plume passage. It can also be derived from activity concentrations measured in environmental samples. External doses from the deposition of radioactive material are generally calculated for a limited time period (from few hours to few days) that is consistent with the implementation of urgent protective actions, such as sheltering or evacuation. The effect of shielding by building structures may be taken into account provided that data are available and that sheltering has been effective.

The initial calculations of doses from internal exposure should be primarily directed to inhalation because this pathway is important for the implementation of urgent protective actions, such as sheltering, evacuation, and prophylaxis with stable iodine. The internal dose from inhalation of radionuclides present in the plume can be derived from measurements of radionuclide activity concentrations in air, or from model results based on source monitoring. Both radionuclide composition and physical and chemical forms of air-borne

ходження значно впливають радіонуклідний склад та фізико-хімічні форми радіонуклідів у повітрі.

Надходження радіоактивного матеріалу з харчовими продуктами та питною водою також може робити значний внесок до дози опромінення населення у надзвичайній ситуації опромінення, особливо для щитоподібної залози. У разі виникнення надзвичайної ситуації на атомній електростанції, оцінку дози щитоподібної залози на основі моніторингу харчових продуктів та питної води слід доповнити вимірами ^{131}I у щитоподібній залозі людини. При оцінці дози опромінення щитоподібної залози особливу увагу слід приділяти дітям та підліткам, як найбільш уразливим групам населення.

Своєчасне і ефективне застосування належних захисних заходів, таких як укриття, евакуація, йодна профілактика та обмеження споживання забруднених харчових продуктів, можуть істотно знизити сумарне опромінення і змінити відносну роль радіонуклідів.

Наприклад, надходження радіонуклідів йоду, особливо ^{131}I , є основним джерелом доз опромінення щитоподібної залози, що формуються протягом декількох тижнів після аварії. Надходження радіоїодів після Чорнобильської катастрофи призвело до понад 6 тисяч раків щитоподібної залози серед осіб, які були дітьми чи підлітками під час аварії. Для жителів міста Прип'ять, розташованого у 2 км від зруйнованого Чорнобильського реактора, оцінка поглинутої дози в щитоподібній залозі коливається від 0,07 Гр для дорослих до 2 Гр для немовлят, причому середньозважена за популяцією доза опромінення щитоподібної залози оцінюється у 0,17 Гр [4].

ПРОГРАМИ МОНІТОРИНГУ

Програма моніторингу визначає середовища та їх радіологічні характеристики, що підлягають вимірюванню, радіонукліди, що підлягають визначенню, просторове розташування і частоту відбору проб або вимірювань та системи моніторингу, які будуть використовуватися. Розробка та функціонування радіологічного моніторингу на національному рівні та на рівні об'єктів повинні базуватися на оцінках прогнозованої небезпеки. Стандарти безпеки МАГАТЕ [5] встановлюють вичерпний набір вимог, що стосуються готовності та реагування на ядерну або радіологічну надзвичайну ситуацію. Оцінка небезпеки характеризує радіологічні ризики в термінах величини, ймовірності, часового та просторового шаблону формування потенційного опромінення населення. Оцінка небезпеки повинна проводитись на

radionuclides strongly influence the assessed inhalation dose.

Intake of radioactive material with food and drinking water can also considerably contribute to the public exposure in the emergency exposure situation, especially to thyroid. In case of an emergency at the nuclear power plant the thyroid dose assessment based on food and drinking water monitoring should be complemented with the measurements of ^{131}I in human thyroids. For thyroid dose assessment, special attention should be paid to children and adolescents, the most vulnerable population group.

The timely and effective application of an adequate set of protective actions, such as sheltering, evacuation, administration of stable iodine, and restrictions on contaminated food consumption can substantially decrease the total exposure and modify the relative role of radionuclides.

For example, the intake of radioactive isotopes of iodine, especially ^{131}I , is the main cause of thyroid doses formed within a few weeks after an emergency. After the Chernobyl accident, the intake of radioiodines led to more than 6,000 thyroid cancers among people who were children or adolescents at the time of the accident. For the residents of Pripyat, a town located 2 km from the destroyed Chernobyl reactor, the estimated absorbed dose to thyroid ranged from 0.07 Gy for adults to 2 Gy for infants, with the population-weighted average thyroid dose estimated to be 0.17 Gy [4].

MONITORING PROGRAMMES

A monitoring programme specifies the media and their radiological characteristics to be measured, radionuclides to be quantified, spatial locations and frequencies of sampling or measurements, and monitoring systems to be used. The design and operation of radiological monitoring at the national and facility levels should be based on the outcomes of a prospective hazard assessment. The IAEA Safety Standards [5] establish a comprehensive set of requirements related to preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. The hazard assessment characterizes the radiological risks in terms of the magnitude, probability, temporal, and spatial patterns of the potential exposures to members of the public. The hazard assessment should be conducted in the early stages of planning for a new

ранніх стадіях планування нового об'єкта, у реагуванні на дії сусідніх країн або для оновлення попередньої оцінки небезпеки, що відображує зміни у знаннях, прирості та переміщенні населення тощо. Обсяги і масштаби національних, регіональних та об'єктових заходів аварійного моніторингу повинні бути співставними з потенційною величиною і типом небезпеки, пов'язаними з об'єктом або діяльністю.

Після оцінки, яка визначила потреби у моніторингу, перед початком введення в експлуатацію об'єкту повинна бути розроблена загальна стратегія радіологічного моніторингу. Стратегія має бути спрямована на конкретні цілі моніторингу і визначати ролі та відповідальність. Слід також враховувати потреби в радіологічних експертах з питань оцінки дози, особах, що приймають рішення, респондентах у часі та географічному розташуванні, а також залежно від типу рішень про захисні дії та дії з реагування, які можуть бути необхідними.

Багато країн вже запровадили програми і системи радіологічного моніторингу. Ці програми та системи суттєво відрізняються у проектуванні, обладнанні та отримуваних даних. Міжнародні стандарти безпеки [6] визначають вимоги до радіологічного моніторингу і надають вказівки щодо застосування цих вимог [7, 8].

Особливістю програм моніторингу в надзвичайних ситуаціях опромінення є широке охоплення не лише екологічних середовищ і можливих шляхів опромінення, але також потенційно опроміненого населення шляхом розгортання програм тріажу та індивідуального моніторингу. У випадку виникнення надзвичайної ситуації на атомній електростанції, індивідуальні програми моніторингу повинні зосереджуватися на зовнішньому забрудненні населення, вмісті радіоактивного йоду в щитоподібній залозі та вмісті гамма-випромінюючих радіонуклідів у всьому тілі.

На рисунку 1 показано загальну послідовність у часі та взаємозв'язок різних елементів національних, регіональних і об'єктових програм моніторингу (ПМ).

Після аварії на Фукусімі з'явилися ініціативи від населення, дослідницької спільноти і неурядових організацій щодо проведення вимірювань радіоактивності у навколишньому середовищі за допомогою різних методів та обладнання. Більшість зусиль громадськості були спрямовані на моніторинг потужності дози зовнішнього опромінення з використанням недорогих, комерційно доступних або саморобних дозиметрів потужності дози. Деякі з цих пристроїв поширюють дані про потужність дози і пов'язані

facility, in response to a neighboring countries' activities, or to update an earlier hazard assessment to reflect changes in knowledge, population growth and movement, etc. The scope and extent of the national, regional, and site-specific emergency monitoring arrangements should be commensurate with the potential magnitude and type of hazard associated with the facility or activity.

After an assessment has identified monitoring needs, an overall strategy of radiological monitoring should be developed before commissioning of the facility. The strategy should address the specific objectives of monitoring and assign roles and responsibilities. It should also consider the needs of radiological dose assessment experts, decision makers, and responders over time and geographical location and as a function of the type of decisions on protective actions and response actions that might be necessary.

Many countries have already established radiological monitoring programmes and systems. These programmes and systems vary significantly in design, equipment, and data produced. The International Safety Standards [6] stipulate top-level requirements on radiological monitoring and provide guidance on the application of these requirements [7, 8].

A feature of monitoring programmes in emergency exposure situations is their broad coverage of not only environmental media and possible pathways of exposure, but also of the potentially exposed members of the public via deployment of triage and individual monitoring programmes. In case of an emergency at a nuclear power plant, the individual monitoring programmes should be focused on the external contamination of members of the public, content of radioiodine in the thyroid gland, and content of gamma-emitting radionuclides in the whole body.

Figure 1 illustrates the general time sequence and relationship of various elements of national/regional monitoring programs and facility-related monitoring programs.

After the Fukushima accident, initiatives emerged from members of the public, the research community, and non-governmental organizations to carry out measurements of the radioactivity in the environment with various methods and equipment. The majority of public efforts were focused on monitoring the external dose rate with inexpensive commercially available or self-made dose rate monitors. Some of these devices shared the dose rate data and associated geographical coordinates through col-

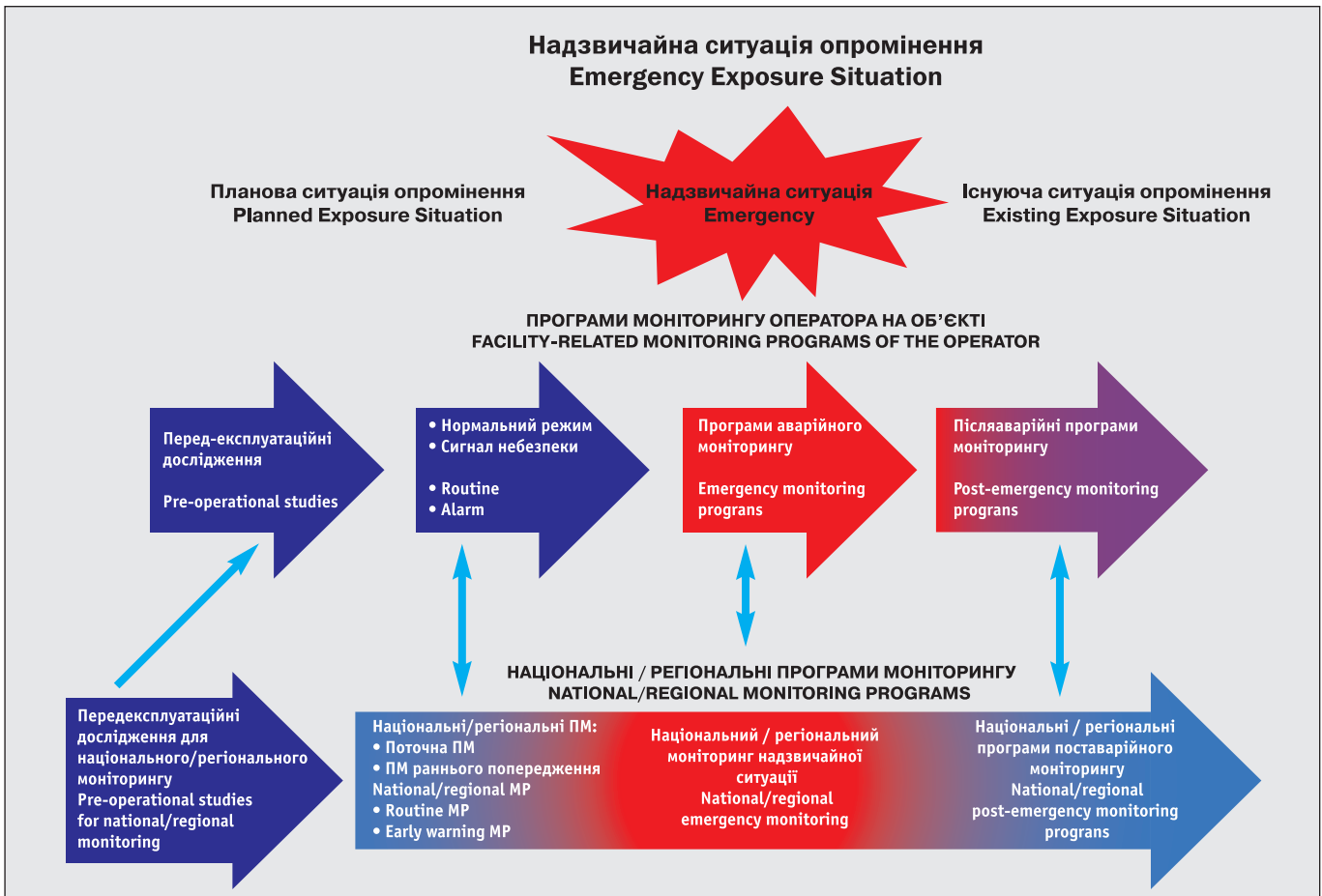


Рисунок 1. Національні, регіональні та об'єктові програми моніторингу у планових, надзвичайних та існуючих ситуаціях опромінення.

Figure 1. National/regional and facility-related monitoring programs in planned, emergency, and existing exposure situations.

географічні координати через спільні інструменти та соціальні мережі. Цей підхід здатний забезпечити дуже великий обсяг даних у реальному часі, однак достовірність окремих вимірювань і даних в цілому може бути важко оцінити. Очікується, що обсяг моніторингу, який проводиться зацікавленими сторонами, буде значно ширшим у майбутньому. Було б важливо враховувати такі дані моніторингу в рамках національних програм готовності та реагування на надзвичайні ситуації і надавати відповідні рекомендації щодо підвищення якості та надійності результатів вимірювань.

ПРОГРАМИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ

Індивідуальний моніторинг є важливим аспектом реагування на надзвичайні ситуації на ядерному реакторі. Індивідуальний моніторинг – це процес вимірювання дози опромінення або контамінації радіонуклідами визначеної особи. У надзвичайній ситуації опромінення індивідуальний моніторинг повинен тривати до тих пір, поки всі потенційно

laborative tools and social networks. This approach is capable of providing a very large volume of real-time data, but the reliability of individual measurements and the dataset as a whole can be difficult to assess. It can be expected that the scope of monitoring conducted by interested parties will be much broader in the future. It will be important to consider such monitoring data within national emergency preparedness and response programmes and to provide appropriate guidance on improving the quality and reliability of measurement results.

INDIVIDUAL MONITORING PROGRAMMES

Monitoring of individuals is an important aspect of the response to a nuclear reactor emergency. Individual monitoring is the process of making measurements of radiation dose or radioactive contamination for an identified person. In an emergency exposure situation, individual monitoring should continue until all potentially affected peo-

постраждали особи не будуть під контролем або не будуть мати інформацію про свої можливі рівні контамінації та відповідні дози опромінення. Індивідуальний моніторинг, що проводиться під час радіологічної аварії, має такі цілі:

- вибір та визначення пріоритетності осіб для подальших дій (скринінг) щодо них;
- оцінка індивідуальних доз, яка супроводжується, де це необхідно, оцінкою радіологічних ризиків, медичною оцінкою¹ та лікуванням;
- супровід оцінок доз для груп населення, таких як оцінка розподілу доз у конкретному населеному пункті або на території.

Після скринінгу подальші дії можуть включати проведення медичної оцінки, видалення зовнішнього забруднення зі шкіри та одягу (деактивація), застосування декорпорантів для зниження вмісту радіонуклідів у тілі, подальший індивідуальний моніторинг та/або надання інформації про індивідуальне опромінення та можливі наслідки для здоров'я.

Оцінені дози можуть бути або вже отриманими дозами, або дозами, які будуть отримані особою протягом визначеного періоду часу після надходження (тобто, очікувані дози). Для оцінки поглинених доз в органах/тканинах рекомендована тривалість інтегрування складає 30 днів [5]. Детальні вказівки щодо оцінки доз внутрішнього опромінення при вимірюваннях в рамках індивідуального моніторингу наведені у [9–12] та в контексті аварійного моніторингу у таких документах, як [13].

Конкретними цілями індивідуального моніторингу є:

- виявлення осіб, які мають зовнішнє забруднення на рівні, який може призвести до значного впливу на здоров'я, і тому потребують термінової дезактивації та подальшої медичної оцінки;
- виявлення осіб, які мають зовнішнє забруднення на нижчих рівнях, яке, тим не менш, може мати вплив на здоров'я, і для яких все ще виправдана дезактивація, але вона є менш терміною;
- виявлення осіб, які мають зовнішнє забруднення на рівнях, для яких малоімовірний будь-який вплив на здоров'я, або взагалі не мають зовнішнього забруднення;

ple have either been monitored or provided with information on their likely contamination levels and resulting radiation doses. Individual monitoring performed during a radiological emergency has following distinct purposes:

- selecting and prioritizing people for subsequent actions («screening»);
- individual-related dose assessment, followed where necessary by radiological risks assessment, medical assessment,¹ and treatment;
- support of group-related dose assessments, such as estimates of dose distribution in the specific settlement or territory.

After screening, subsequent actions could include medical assessment, removal of external contamination from skin and clothing (decontamination), treatment to reduce the amount of a radionuclide inside the body, further individual monitoring, and/or provision of information on individual exposure and potential health effects.

Assessed doses may be either doses already received or doses that will be received by that individual over a defined period of time after the intake (i.e., a committed dose). For assessments of absorbed doses to organs, the recommended integration period is 30 days [5]. A detailed guidance on the assessment of internal doses from individual monitoring measurements is provided in [9–12] and, in the context of emergency monitoring, in documents such as [13].

The specific objectives of individual monitoring are to:

- identify individuals who are externally contaminated at a level that could result in significant health effects and therefore require urgent decontamination and subsequent medical assessment;
- identify individuals who are externally contaminated at lower levels which might nevertheless have an effect on health and for whom decontamination is still justified but less urgent;
- identify individuals who are externally contaminated at levels that are unlikely to have any effect on health or who are not externally contaminated at all;

¹В контексті реагування на надзвичайні ситуації, медична оцінка – це сукупність медичних процедур, вимірювань в рамках індивідуального моніторингу та оцінок індивідуальних доз, призначених для осіб, потенційно постраждалих від ядерної або радіологічної надзвичайної ситуації, для визначення їх загального стану здоров'я та виявлення будь-яких проблем зі здоров'ям, які потребують медичного спостереження або лікування.

¹Within the context of the emergency response, a medical assessment is a set of medical procedures, individual monitoring measurements, and individual dose assessments, run for individuals potentially affected by a nuclear or radiological emergency to determine their overall medical condition and to identify any health issues that need medical follow-up or treatment.

- виявлення осіб, які мають внутрішню контамінацію на такому рівні, який може призвести до значного впливу на здоров'я, і потребують медичної оцінки;
- встановлення поглинених доз в органах/тканинах для осіб, які відповідають критерію, зазначеному в попередньому пункті;
- виявлення осіб, що потребують медичної допомоги для зменшення рівнів внутрішньої контамінації;
- встановлення пріоритету для осіб для подальших вимірювань або оцінок внутрішньої контамінації;
- надання інформації про оцінки індивідуальних доз опромінення особам, які приймають рішення про впровадження або коригування контрзаходів;
- надання інформації особам (працівникам та населенню) про рівень їх опромінення та пов'язаний з ним ризик для здоров'я.

Індивідуальний моніторинг професійного опромінення повинен застосовуватися для персоналу, у тому числі для аварійних працівників на ядерному об'єкті, поліції, працівників пожежної служби, працівників швидкої медичної допомоги та медичних працівників, військовослужбовців, комунальних працівників та працівників, залучених до відновлювальних робіт. Працівники підпадають під дію лімітів доз опромінення для персоналу, які не застосовуються для населення [2], та для працівників і населення застосовуються різні референтні рівні при надзвичайних ситуаціях [14, 15]. Визначені програми моніторингу, що відповідають плановому опроміненню, повинні бути встановлені для деяких працівників [11], також повинні бути встановлені механізми моніторингу працівників служб невідкладної допомоги у разі виникнення радіологічної надзвичайної ситуації.

Індивідуальні програми моніторингу для населення мають бути створені на державному рівні. Плани індивідуального моніторингу повинні бути встановлені заздалегідь, до будь-якої радіологічної надзвичайної ситуації, та регулярно проходити перевірки в аварійних тренуваннях.

ВЕЛИЧИНИ ДЛЯ ОПИСУ РЕАКЦІЙ ТКАНИНИ

Шкідливі реакції у тканинах не можуть бути адекватно визначені кількісно з використанням величин для захисту, призначених для стохастичних ефектів. Величина шкоди, пов'язаної з реакціями тканин, вимагає скрупульозного документування усіх характеристик і умов опромінення, які викликали і можуть викликати шкідливі реакції тканин. Найбільш підходящими величинами для цієї мети є такі:

- середні поглинені дози в уражених тканинах або органах;

- identify individuals who are internally contaminated at a level that could result in significant health effects and require medical assessment;
- quantify absorbed doses to organs for people who meet the criterion described in the above bullet;
- identify individuals who should be considered for treatment to reduce internal contamination levels;
- prioritize people for later measurements or assessments of internal contamination;
- supply information on individual dose estimates to decision makers for the implementation or correction of countermeasures; and
- provide information to individuals (workers and members of the public) on their level of exposure and related risk to health.

Individual monitoring of occupational exposure should be implemented for the personnel, including emergency workers at a nuclear facility, police and fire-fighting service staff, ambulance staff and paramedics, military service men, municipal workers, and workers engaged in remediation tasks. Workers are subject to occupational dose limits that are not applied for members of the public [2], and different emergency reference levels are applied for workers and members of the public [14, 15]. Established monitoring programmes appropriate for planned exposures should be in place for some workers [11], and arrangements for monitoring emergency services workers in the event of a radiological emergency may be in place.

For members of the public, individual monitoring programmes need to be established at the national level. Plans for individual monitoring should be established in advance of any radiological emergency and tested regularly in emergency exercises.

VALUES FOR DESCRIPTION OF TISSUE REACTIONS

The harmful tissues reactions cannot be adequately quantified with the use of protection quantities designed for stochastic effects. The magnitude of harm, associated with tissues reactions necessitates scrupulous documentation of all characteristics and conditions of exposure, which caused and can cause harmful tissues reactions. The most appropriate quantities for this purpose are following:

- mean absorbed doses in the affected tissues or organs;

- просторовий розподіл поглинених доз в уражених тканинах або органах;
- динаміка у часі потужності поглиненої дози (тривалість опромінення та його режим: гостре, фракціоноване або хронічне може використовуватися як замітник);
- радіонукліди та/або тип/енергія спектру випромінювання;
- внесок випромінювання конкретного типу та енергії до поглиненої дози/потужності поглиненої дози в органі або тканині.

Зважування величин поглиненої дози/потужності дози з коефіцієнтами відносної біологічної ефективності (ВБЕ) слід проводити із застереженнями. Було б важливо обґрунтувати обрані значення коефіцієнтів ВБЕ з урахуванням їх адекватності до:

- специфічних умов обставин опромінення, таких як режим/інтенсивність/тривалість опромінення, діапазони енергії, уражені тканини та органи, їх маси (поверхня – у випадку шкіри);
- характеристики постраждалої особи, такі як вік, стать, стан здоров'я, індивідуальна радіочутливість.

Звітність щодо ВБЕ-зваженої поглиненої дози не повинна перешкоджати правильному обліку оцінених значень фізичних величин, перерахованих вище.

ВИСНОВОК

Індивідуальний моніторинг є ретроспективним за природою, оскільки дані вимірювань відображають опромінення людини, яке вже відбулося. Ретроспективні оцінки дози є взаємодоповнюючими до проспективних оцінок, які базуються або на прогнозованому моделюванні атмосферного переносу або на моніторингу і моделюванні навколишнього середовища. Обидва підходи до оцінок застосовуються для оцінки рівнів опромінення у навколишньому середовищі та, як результат, доз опромінення людини.

Рішення щодо застосування індивідуального моніторингу для оцінки доз, а не покладатися на моделювання атмосферного переносу або на моніторинг та моделювання навколишнього середовища, залежать від ряду факторів. Доповідь 92 МКРО рекомендує застосовувати моніторинг за таких обставин:

- Для допомоги ідентифікації осіб, які потребують медичної оцінки через високі дози опромінення. Лікування може включати терапевтичне лікування у випадку пацієнтів, які є постраждалими на гострий радіаційний синдром, декорпорацію радіонуклідів з метою зменшення високих доз внутрішнього опромінення [16], таку як застосування берлінської лазури у випадку контамінації радіонуклідами цезію [17]

- spatial distribution of the absorbed doses in the affected tissues or organs;
- time-course of the absorbed dose rate (duration of exposure and its mode: acute, fractionated, or chronic can be used as a surrogate);
- radionuclides and/or type/energy spectra of the radiation involved;
- contribution of the radiation of the specific type and energy to the absorbed dose/dose rate in an organ or tissue.

The weighting of values of the absorbed dose/dose rate with the relative biological effectiveness (RBE) coefficients should be done with cautions. It would be important to justify the chosen values of RBE coefficients with the consideration of their adequacy to the:

- specific conditions of an exposure case, such as mode/intensity/duration of exposure, energy ranges, affected tissues and organs, their masses (surface in case of skin);
- characteristics of the affected individual, such as age, sex, health status, individual radiosensitivity.

Reporting of the RBE-weighted absorbed dose should not preclude proper recording of estimated values of physical quantities listed above.

CONCLUSION

Individual monitoring is retrospective in nature because measurement data reflects the human exposure that have already been occurred. Retrospective dose assessments are complementary to prospective assessments that are based on either predictive atmospheric dispersion modelling or environmental monitoring and modelling, both of which are performed to estimate radiation levels in the environment and resulting doses to people.

Decisions on whether to use individual monitoring to assess doses rather than to rely on atmospheric dispersion modelling or environmental monitoring and modelling depend on a number of factors. ICRU Report 92 recommends to consider in the following circumstances:

- To help identify individuals who need medical assessment due to high radiation doses. Treatment could include therapeutic treatment in the case of patients likely to suffer from acute radiation syndrome, decorporation of radionuclides to reduce high internal doses [16] such as the administration of Prussian Blue in the case of radiocesium contamination [17], or stable iodine in the case of continuing exposures to radioiodine

або стабільного йоду у випадку триваючого надходження радіонуклідів йоду. Для ініціювання медичної оцінки та розгляду необхідності медичного лікування були запропоновані рівні дії для дорослих – 200 мЗв [13, 16] або 250 мЗв¹ [18];

➤ Якщо оцінки для ідентифікованих осіб необхідні з інших причин, ніж рішення про медичну оцінку, наприклад для аварійних працівників на місці викиду, осіб, яких залучено до дезактивації, осіб, які перебували у локалізованих місцях з високим вмістом випадіння під час викиду, груп ризику (наприклад, дітей, вагітних жінок, членів сімей, в яких є особи з високими рівнями опромінення);

➤ Для підтвердження або перевірки результатів прогнозного моделювання у навколишньому середовищі. Можуть бути виявлені значні відмінності, як у випадку з дозами щитоподібної залози, отриманими населенням після аварії на Фукусімі [19];

➤ Якщо виникає потреба в індивідуальних оцінках з інших міркувань, ніж радіологічний захист (наприклад, від середовищ та політичних груп, або через занепокоєння громадськості).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ICRU Report 92. Radiation monitoring for protection of the public after major releases of radionuclides to the environment. International Commission on Radiation Units and Measurements. 2018. (in press).
2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. Ann. ICRP. Oxford and New York : Pergamon Press, 2007. Vol. 37(2-4). 332 p.
3. IAEA Safety Glossary: Terminology used in nuclear safety and radiation protection: 2007 Edition / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2007. 227 p.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II. Scientific Annexes C, D and E / UNSCEAR. New York : United Nations. 2011. 313 p.
5. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency: General Safety Requirements GSR Part 7 / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2015. 102 p.
6. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements No. GSR Part 3 / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2014. 436 p.
7. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection: Safety guide RS G-1.8 / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2005. 119 p.

intakes. Action levels for adults of 200 mSv [13, 16] or 250 mSv committed effective dose¹ [18] have been proposed for initiation of medical assessment and consideration of the need for medical treatment;

➤ Where assessments for identified individuals are needed for reasons other than decisions on medical assessment, for example emergency workers at the site of the release, people engaged on decontamination activities, individuals who were at localized sites of high deposition during the release, potentially high-risk groups (e. g., children, pregnant women, members of families with a highly-exposed relative), etc.;

➤ To verify or check the results of predictive environmental modelling. Significant differences can be found as in the case of the thyroid doses received by members of the public after the Fukushima accident [19];

➤ Where demand for individual assessments arises from considerations other than radiological protection (e. g., from media and political groups or because of public concern).

REFERENCES

1. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 92. Radiation monitoring for protection of the public after major releases of radionuclides to the environment. International Commission on Radiation Units and Measurements; 2018. (in press).
2. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. Ann ICRP. Vol. 37(2-4). Oxford and New York: Pergamon Press; 2007. 332 p.
3. International Atomic Energy Agency. IAEA Safety glossary: Terminology used in nuclear safety and radiation protection: 2007 Edition. Vienna: IAEA; 2007. 227 p.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of atomic radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II. Scientific Annexes C, D and E. New York: United Nations; 2011. 313 p.
5. International Atomic Energy Agency. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency: General safety requirements GSR Part 7. Vienna: IAEA; 2015. 102 p.
6. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety stan-

¹НКРЗ рекомендує це значення дози як основу для обчислення значень надходження рівнів медичного втручання (ПМВ) для радіонуклідів, відмінних від ізотопів йоду.

¹NCRP recommends this dose value as a basis for computing Clinical Decision Guide (CDG) intake values for radionuclides other than isotopes of iodine.

8. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring: Safety Reports Series No. 64 / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2010. 232 p.
9. ICRP Publication 78. Individual monitoring for internal exposure of workers. Ann. ICRP. Oxford : Pergamon Press, 1991. Vol. 27(3–4). 161 p.
10. ICRP Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Oxford : Pergamon Press, 2015. Ann. ICRP. Vol. 44 (2). 188 p.
11. Radiation protection – monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material. ISO 20553:2006 / International Organization for Standardization. Geneva, 2006. 22 p.
12. Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – fundamentals and application. ISO 11929:2010 / International Organization for Standardization. Geneva, 2010. 60 p.
13. TMT handbook. Triage, monitoring and treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act / ed. by C. Rojas-Palma, A. Liland, A.N. Jerstad et al. Osteras : Norwegian Radiation Protection Authority, 2009. 556 p.
14. ICRP Publication 111. Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. Oxford : Pergamon Press, 2009. Ann. ICRP. Vol. 39 (3). 69 p.
15. US EPA Nationwide Environmental Radiation Monitoring. US EPA's national radiation monitoring system for air, precipitation and drinking water. URL: <https://www.epa.gov/radnet>.
16. TIARA: treatment initiatives after radiological accidents / F. Menetrier, Ph. Berard, S. Joussineau et al. Radiat. Prot. Dosimetry. 2007. Vol. 127(1–4). P. 444–448.
17. Use of prussian blue (ferric hexacyanoferrate) for decorporation of radiocesium, RCE-17 / Health Protection Agency, Radiation, Chemical and Environmental Hazards. London, 2010. 86 p.
18. Management of persons contaminated with radionuclides: handbook. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report No. 161 I / NCRP. Bethesda, MD, 2008. 286 p.
19. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2013 Report. Volume I. Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami / UNSCEAR. New York: United Nations, 2014. 311 p.
20. Standards, General safety requirements No. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014. 436 p.
21. International Atomic Energy Agency. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection: Safety Guide RS G-1.8. Vienna: IAEA; 2005. 119 p.
22. International Atomic Energy Agency. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring: Safety reports. Series No. 64. Vienna: IAEA; 2010. 232 p.
23. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 78. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. Ann ICRP. Vol. 27(3-4). Oxford: Pergamon Press; 1991. 161 p.
24. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Ann. ICRP. Vol. 44 (2). Oxford: Pergamon Press; 2015. 188 p.
25. International Organization for Standardization. Radiation protection – Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material. ISO 20553:2006. Geneva; 2006. 22 p.
26. International Organization for Standardization. Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application. ISO 11929:2010. Geneva; 2010. 60 p.
27. Rojas-Palma C, Liland A, Jerstad AN, Etherington G, Perez MR, Rahola T, Smith K, editors. TMT handbook. Triage, Monitoring and Treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act. Osteras: Norwegian Radiation Protection Authority, 2009. 556 p.
28. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 111. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. Ann ICRP. Vol. 39 (3). Oxford: Pergamon Press; 2009. 69 p.
29. US EPA Nationwide Environmental Radiation Monitoring. US EPA's national radiation monitoring system for air, precipitation and drinking water. Available from: <https://www.epa.gov/radnet>.
30. Menetrier F, Berard Ph, Joussineau S, Stradling N, Hodgson A, List V, et al. TIARA: treatment initiatives after radiological accidents / Radiat Prot Dosimetry. 2007 ;127(1-4):444-8.
31. Health Protection Agency, Radiation, Chemical and Environmental Hazards. Use of prussian blue (ferric hexacyanoferrate) for decorporation of radiocesium, RCE-17. London; 2010. 86 p.
32. National Council on Radiation Protection and Measurements. Management of persons contaminated with radionuclides: handbook. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report No. 161 I. Bethesda, MD; 2008. 286 p.
33. UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2013 Report. Vol. I. Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations; 2014. 311 p.