

# РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ

## ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ РАО



### RADIATION-HYGIENE AND GEOECOLOGICAL CRITERIA FOR SAFETY EVALUATION OF RADWASTE STORAGE



И.П. КОРЕНКОВ, д.б.н., к.т.н.,  
Т.Н. ЛАЩЕНОВА, д.б.н., к.х.н.,  
Е.И. ВЕСЕЛОВ, к.т.н. (ГУП МосНПО «Радон»),  
Н.К. ШАНДАЛА, д.м.н. (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна)  
I.P. KORENKOV, D-r of Biol. Sc., Cand. of Tech. Sc.,  
T.N. LASCHENOVA, D-r of Biol. Sc., Cand. of Chem. Sc.,  
E.I. VESELOV, Cand. of Tech. Sc. (Radon Moscow),  
N.K. SHANDALA, D-r of Med. Sc. (A.I. Burnazyan  
Federal Centre of Medicine and Biophysics)

Многие хранилища жидких и твердых радиоактивных отходов построены в 60-х годах прошлого века. Конструкция, защитные барьеры и принятая в то время технология консервации таких «исторических» хранилищ РАО не отвечают современным требованиям экологической безопасности. Хранилища нуждаются в проведении комплекса технических мероприятий для повышения их эксплуатационных характеристик. В основу принятия управленческих решений по очередности и объему проводимых работ должна быть положена степень потенциальной опасности хранилищ для окружающей среды и населения. Такое ранжирование может базироваться на комплексной оценке безопасности, рассчитанной по экологическим и гигиеническим критериям.

Many storage facilities for liquid and solid radioactive waste were built back in the 1960s. The engineering designs, containment barriers and conservation technology that was normal back at the time of construction no longer meet the current environmental safety requirements. These storage facilities are in need of a range of technical measures to be undertaken in order to improve their operational characteristics. Any managerial decisions regarding the sequence and extent of such upgrades should be based on the potential hazard that the facilities represent to the environment and public. Such ranking may be determined using the integrated safety evaluation method based on a set of environmental and hygienic criteria.

Все критерии базируются на основных параметрах, которые условно можно разделить на шесть групп, и характеризуют состояние массива РАО, инженерных и природных барьеров, дозы и риски облучения населения. Это позволит проводить экспертизу вероятности аварийных событий и давать прогнозную оценку состояния окружающей среды [1-2]. Основные параметры контроля:

- суммарная и удельная активности ТРО в хранилище;
- оценка состояния массива РАО в хранилищах и инженерных барьеров;
- скорость миграции радионуклидов за пределами хранилищ;
- мощность эффективной дозы  $\gamma$ -излучения на территории промплощадки, на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны наблюдения (ЗН), в зоне наблюдения;
- дозы облучения населения (квоты для внешнего и внутреннего облучения);
- риск возникновения соматико-стохастических эффектов.

А также:

- вероятность аварийных событий;
- прогнозная оценка степени радиационного воздействия на окружающую среду и население в зависимости от разных сценариев развития событий.

All criteria are based upon key parameters that can be conventionally split into six groups and characterise the condition of the mass of radwaste, engineered and natural barriers, and doses and risks of public exposure. This enables probability assessment of accidental events and predictive environmental evaluations [1-2]. Key control parameters are as follow:

- total and specific radioactivity of the SRW in storage;
- status assessment of the mass of radwaste in storage and condition of the engineered barriers;
- rate of outer migration of radionuclides from the storage facility;
- effective dose rate from  $\gamma$ -radiation within the storage site, at the boundaries of sanitary protection zone and observation zone, and within the observation zone;
- exposure doses to the public (quotas for external and internal exposure);
- risk of occurrence of somatic-stochastic effects.

As well as:

- accidental events probability;
- predictive evaluation of the extent of radiation impact upon the environment and public depending on the various event scenarios.

Depending on the level of risk that the facility represents to the environment and public, the criteria are broken down into groups (A,

По степени опасности объекта для окружающей среды и населения все критерии делятся на 5 групп (А, В, С, D, E) и оцениваются по бальной системе. В зависимости от суммы баллов они делятся на пять категорий – от безопасной до чрезвычайно опасной. Классификация приведена в таблице.

### ГРУППА А: РАДИАЦИОННЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МАССИВА ТРО

К таким критериям относятся:

- величина удельной и суммарной активности радионуклидов в массиве ТРО ( $A_1$ );
- наличие и количество урановых и трансураниевых элементов ( $A_2$ );
- концентрация и химическая форма нахождения радионуклидов в массиве ТРО ( $A_3$ ).

Оценку степени потенциальной опасности хранилища ТРО по критерию  $A_1$  и  $A_2$  предлагаем проводить по коэффициенту безопасности  $K_{без}$ . Возможны несколько вариантов расчета  $K_{без}$  в зависимости от наличия информации по конкретному хранилищу.

По первому варианту допустимое содержание радионуклидов в РАО, захораниваемых в приповерхностных ПЗРО, приведено в приложении 1 НП-055-04 и зависит от конкретных характеристик РАО (радионуклидного состава, удельной активности, периода потенциальной опасности, физико-химических свойств). Расчет  $K1_{без}$  проводится по формуле:

$$K1_{без} = \sum \frac{A_i}{P_{Ai}} \quad (1),$$

где  $A_i$  – суммарная активность  $i$ -радионуклида в ТРО, приведенная к одной группе радиотоксичности, в соответствии с классификацией ОСПОРБ-99/2010, Бк;

$P_{Ai}$  – допустимое содержание  $i$ -радионуклида в РАО, изолированных в приповерхностных хранилищах (НП-055-04, приложение 1), Бк/м<sup>3</sup>, Бк/г.

При втором варианте расчета исходят из того, что система категорирования базируется на потенциальной способности объекта быть причиной детерминированных эффектов для здоровья человека и основана на концепции «опасного источника» (если такой источник не находится под должным контролем, это может привести к облучению, достаточному для возникновения тяжелых детерминированных эффектов). Концепция «опасного источника» преобразована в операционные (рабочие) параметры путем вычисления такого количества активности отдельных радионуклидов (D-величины), которое может привести к тяжелым детерминированным эффектам при наиболее типичных сценариях и путях облучения.

Категория опасности хранилища зависит от D-величины в соответствии с требованиями РБ-042-07,  $K2_{без}$  рассчитывается по формуле:

$$K2_{без} = \sum \frac{A_i}{D_n} \quad (2),$$

где  $A_i$  – фактическая активность  $i$ -радионуклида в ТРО, ТБк;

$D_n$  – рекомендованное пороговое значение активности для данного радионуклида (D-величина), ТБк.

По третьему варианту расчета за основу количественной оценки критериев  $A_1$  и  $A_2$  взяты их отношения к соответствующим величинам минимально значимой активности – МЗВА (НРБ-99/2009). Предложенный показатель устанавливает нижнюю границу удельной активности  $i$ -радионуклида, при превышении которой любой материал должен быть отнесен к РАО. Критерии  $A_1$  и  $A_2$  определяют категорию опасности хранилища  $K3_{без}$  выражением:

B, C, D, E), and depending on its potential danger into five categories, ranging from safe to extremely dangerous (see table).

### GROUP A: RADIATION AND CHEMICAL CONTROL OF CONTAINED WASTE

These criteria include:

- total and specific radioactivity of radionuclides in contained waste ( $A_1$ );
- presence and quantity of uranium and transuranic elements ( $A_2$ );
- concentration and chemical form of radionuclides in contained waste ( $A_3$ ).

The extent of potential danger represented by the SRW storage facility is proposed to be evaluated using the safety coefficient  $K_{saf}$ . Several methods are available for calculating the  $K_{saf}$  depending on availability of information about the facility.

In the first method, permissible radionuclide content in the waste disposed of in a near-surface repository is prescribed in Attachment 1 to NP-055-04 and depends on specific characteristics of the radwaste (radionuclide composition, specific radioactivity, duration of time when the waste will remain potentially dangerous, its physical and chemical properties).  $K1_{saf}$  is calculated using the formula 1:

$$K1_{saf} = \sum \frac{A_i}{P_{Ai}} \quad (1),$$

where  $A_i$  is total radioactivity of  $i$ -radionuclide contained in the waste, deduced to a single group of radiation toxicity (OSPORB-99/2010), Bq;

$P_{Ai}$  is permissible content of  $i$ -radionuclide in radwaste, isolated in near-surface repositories (NP-055-04, atch. 1), Bq/m<sup>3</sup>, Bq/g.

In the second calculation method, the premise is that the categorisation system is based on potential capability of the facility to cause deterministic effects upon human health and in its core lies the "dangerous source" concept (if such a source is not placed under due control it can produce heavy enough exposure to cause deterministic effects). The "dangerous source" concept is converted into operational (working) parameters by calculation of such amount of radioactivity produced by individual radionuclides (the so-called D-value) that can cause severe deterministic effects in the most typical scenarios and pathways of exposure.

The danger category of a repository using D-value (RB-042-07), is calculated through the formula 2:

$$K2_{saf} = \sum \frac{A_i}{D_n} \quad (2),$$

where  $A_i$  is actual radioactivity of  $i$ -radionuclide in contained waste, TBq;

$D_n$  is recommended threshold radioactivity value for this radionuclide (D-value), TBq.

In the third calculation method, the basis for quantitative evaluation of the criteria  $A_1$  and  $A_2$  is derived from their relation to the corresponding value of minimum significant radioactivity. The proposed indicator sets the lower boundary for specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide, excess of which means that any material must be classified as radwaste.

Criterion  $A_1$  is determined by the following expression:

$$K3_{saf} = \sum \frac{A_{vi}}{MSRA_i} \quad (3),$$

where  $A_{vi}$  is maximum specific volumetric radioactivity of the  $i$ -radionuclide or transuranic  $i$ -radionuclide in the contaminated area, Bq/kg or Bq/m<sup>3</sup>.

The values of minimum significant radioactivity  $i$  and minimum significant radioactivity  $T_{pi}$  are assumed as prescribed by

$$K3_{\text{без}} = \sum \frac{A_{vi}}{M3UA_i(3)},$$

где  $A_{vi}$  – максимальная объемная удельная активность  $i$ -радионуклида или трансуранового  $i$ -радионуклида в ореоле загрязнения, Бк/кг или Бк/м<sup>3</sup>.

Величины  $M3U_{Ai}$  и  $M3U_{Tri}$  приведены в НРБ-99/2009. Предлагается считать хранилище безопасным, если значение  $K1_{\text{без}}$ ,  $K2_{\text{без}}$  и  $K3_{\text{без}}$  не превышает 1. Во всех остальных случаях риск определяется баллами опасности.

### ГРУППА В: СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ ХРАНИЛИЩА

К защитным барьерам относятся: тип матричного материала для РАО, конструкция сооружения для хранения ТРО, конструкция и материал контейнера. Они характеризуются следующими критериями:

- проницаемость инженерных конструкций объекта ( $B_1$ );
- скорость выщелачивания радионуклидов из матрицы РАО ( $B_2$ );
- обводненность массива РАО ( $B_3$ ).

Критерии  $B_1$  и  $B_2$  оценивают потенциальную возможность развития процессов выщелачивания радионуклидов из матрицы РАО и разрушения материала инженерных конструкций, которые повышают риск миграции радионуклидов. Безопасный уровень по этим показателям определен по результатам многолетних исследований состояния хранилищ РАО и математического моделирования процесса миграции радионуклидов [3]. Безопасность объекта будет обеспечена в том случае, если значение критерия  $B_1$  будет равно стандартной величине проницаемости цементного камня (бетона) –  $n \cdot 10^{-4}$  м/сут и не превышать величину скорости выщелачивания  $i$ -радионуклида  $n \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>2</sup>·сут из матрицы, определяемую по ГОСТ 29114-91 (критерий  $B_2$ ).

Наличие воды в массиве РАО (критерий  $B_3$ ) свидетельствует о деградации барьера и характеризуется изменением уровня грунтовых вод и их удельной активности [5].

### ГРУППА С: МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

К этой группе относятся такие критерии, характеризующие процесс распространения радионуклидов в окружающей среде, как:

- скорость миграции радионуклидов в окружающей среде ( $C_1$ );
- величина объемной удельной активности в грунтовых и поверхностных водах ( $C_2$ );
- величина выхода  $i$ -радионуклида из хранилища на территорию промплощадки, которая характеризуется относительным показателем миграции  $K_{\text{мпр}}$  ( $C_3$ );
- величина выхода  $i$ -радионуклида с территории промплощадки, которая характеризуется относительным коэффициентом миграции  $K_{\text{мс}}$  радионуклидов ( $C_4$ );
- мощности эквивалентных доз  $\gamma$ -излучения (МЭД ГИ) на поверхности в зависимости от категории территории: для территории хранилищ РАО или зоны возможного загрязнения ( $C_5$ ), на границе СЗЗ и ЗН ( $C_6$ ), на территории ЗН ( $C_7$ );
- водонасыщение вмещающих пород ближней зоны ( $C_8$ );
- сорбционные параметры вмещающих пород ближней зоны хранилища ( $C_9$ );
- фильтрационные характеристики вмещающих пород ближней зоны объекта ( $C_{10}$ ).

Безопасный уровень по критериям  $C_1$ - $C_4$  был определен при выполнении исследований по миграции радионуклидов во вме-

NRB-99/2009. It is suggested that the repository can be considered safe if the values of  $A_1$  and  $A_2$  do not exceed unity. In all other cases, the risk is determined by the points of danger.

### GROUP B: STATUS OF ENGINEERED PROTECTIVE BARRIERS IN THE REPOSITORY

Containment barriers in a repository include: the matrix material that encloses the waste, design of the solid waste repository, design and material of the container. These are characterised by the following criteria:

- permeability of engineered structures in the repository ( $B_1$ );
- rate at which radionuclides leach from the waste matrix ( $B_2$ );
- water content in the contained waste ( $B_3$ ).

The criteria  $B_1$  and  $B_2$  evaluate the potential for development of leaching processes removing radionuclides out of the waste matrix and deterioration of the engineered structures material, thus increasing the risk of radionuclides migration. Safe levels for these indicators are determined from the results of many years of research of the repository status and mathematical modelling of the radionuclides migration processes [3-5]. Safety of the repository is ensured in the event that the value of criterion  $B_1$  is equal to the standard permeability value of cement rock (concrete), i.e.  $n \cdot 10^{-4}$  m/day, and of criterion  $B_2$  to the GOST-29114-91 prescribed value  $n \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>·day.

Presence of water in contained waste (criterion  $B_3$ ) is evidence that the barrier has degraded and is characteristic of changes in the level of ground water and their specific radioactivity levels [5].

### GROUP C: RADIONUCLIDE MIGRATION INTO THE ENVIRONMENT

This group includes criteria that characterise the process of radionuclides dissemination in the environment, such as:

- rate of radionuclides migration in the environment ( $C_1$ );
- volumetric specific radioactivity value in ground and surface waters ( $C_2$ );
- relative migration factor  $K_{\text{mfr}}$ , which characterises removal of the  $i$ -radionuclide out of the repository onto the site ( $C_3$ );
- relative migration factor  $K_{\text{mc}}$  of radionuclides from outside the site ( $C_4$ );
- equivalent dose rates from  $\gamma$ -radiation on the surface depending on land category: for the repository site or zone of potential contamination ( $C_5$ ), at the boundary between sanitary protection zone and observation zone ( $C_6$ ), and within observation zone ( $C_7$ );
- water saturation of host rock in the near zone ( $C_8$ );
- sorption parameters of host rock within the near zone of the repository ( $C_9$ );
- filtration characteristics of host rock within the near zone of the repository ( $C_{10}$ ).

Safe levels for the criteria  $C_1$ - $C_4$  was determined from research of radionuclides migration in host rock within the near and far zones, for the criteria  $C_9$  and  $C_{10}$  on the basis of field studies and results of physical and mathematical modelling of radionuclides dissemination in host rock and sorption capacity of various types of rock. Maximum sorption capacity (criterion  $C_9$ ) is characteristic of clayey rocks (loams and clays), where it equals  $n \cdot 10^6$  Bq/kg. Such high sorption ensures maximum containment of the radionuclides migration process into the environment [4]. As maximum rate of radionuclides dissemination into the environment occurs with filtration flows of ground or surface waters, the safe level for the criterion  $C_2$  was determined based on a safe rate of liquid phase seepage through host rock within the near zone

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩА  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ ОПАСНОСТИ  
INTEGRATED SAFETY EVALUATION OF WASTE REPOSITORIES DEPENDING ON VARIOUS CRITERIA**

Категория опасности <i>Hazard category</i>	Группа А <i>Group A criteria</i>		Группа С <i>Group C criteria</i>		Группа D <i>Group D criteria</i>		Группа Е <i>Group E criteria</i>
	$K_{без} / K_{saf}$	A/D	$K_{мхр} / K_{rmf}$	$K_{мс} / K_{MC}$	МЭД ГИ, мкЗв/ч <i>Equivalent exposure dose, μSv/hour</i>	$K_{поч} / K_{j}$ Бк/кг <i>Bq/kg</i>	Эф. доза для населения, мЗв/год <i>Effective exposure dose, mSv/year</i>
Безопасная <i>Safe</i>	$10^{-2} \leq K_{без} < 10^1$	$A/D < 10^{-2}$	$0,1 \leq K_{мхр} < 0,5$	$K_{мс} < 0,1$	$0,3 \leq P < 0,6$	$0,5 \leq K_{поч} < 1$	$0,1 \leq D < 0,3$
Низкая <i>Low</i>	$10^1 \leq K_{без} < 10^4$	$10^{-2} \leq A/D < 1$	$0,5 \leq K_{мхр} < 1$	$0,1 \leq K_{мс} < 0,5$	$0,6 \leq P < 1$	$1 \leq K_{поч} < 5$	$0,3 \leq D < 1$
Опасная <i>Unsafe</i>	$10^4 \leq K_{без} < 10^7$	$1 \leq A/D < 10^3$	$1 \leq K_{мхр} < 3$	$0,5 \leq K_{мс} < 1$	$1 \leq P < 3$	$5 \leq K_{поч} < 10$	$1 \leq D < 5$
Очень опасная <i>Very unsafe</i>	$10^7 \leq K_{без} < 10^{10}$	$10 \leq A/D < 10^3$	$3 \leq K_{мхр} < 5$	$1 \leq K_{мс} < 3$	$3 \leq P < 10$	$10 \leq K_{поч} < 50$	$5 \leq D < 10$
Чрезвычайно опасная <i>Extremely unsafe</i>	$K_{без} \geq 10^{10}$	$A/D \geq 10^3$	$5 \leq K_{мхр} < 10$	$3 \leq K_{мс} < 5$	$P \geq 10$	$K_{поч} \geq 50$	$D \geq 10$

of the repository site and determined by the rate of spreading of the contamination area of a few centimetres a year. Filtration and sorption capacities of natural (geological) barriers coupled with reliability of engineered barriers (provided that they maintain their protective properties for the entire duration of repository life) should prevent the spreading of radionuclides into the environment. The quota for internal exposure from ground or surface water ( $C_2$ ) is controlled by interference level and implemented through a

щающих породах ближней и дальней зон, по критериям  $C_9$  и  $C_{10}$  – на основе натурных исследований и результатов физического и математического моделирования распространения радионуклидов во вмещающих породах, а также сорбционной емкости различных горных пород. Максимальной сорбционной емкостью (критерий  $C_9$ ) характеризуются глинистые породы (глины и суглинки) –  $n \cdot 10^6$  Бк/кг. При таких значениях происходит максимальное сдерживание процесса миграции радионуклидов в окружающей среде [4]. В связи с тем, что максимальная скорость распространения радионуклидов в окружающей среде обусловлена фильтрационным потоком грунтовых или поверхностных вод, безопасный уровень по критерию  $C_1$  определен на основании безопасной скорости фильтрации жидкой фазы во вмещающих породах ближней зоны объекта и определяется скоростью распространения ареола загрязнения в течение года. Фильтрационные и сорбционные свойства естественных (геологических) барьеров и надежные инженерные барьеры (при условии сохранения защитных свойств на весь период эксплуатации) должны препятствовать выходу радионуклидов в окружающую среду. Величина объемной удельной активности в грунтовых и поверхностных водах ( $C_2$ ) контролируется сравнением с уровнем вмешательства для каждого радионуклида, указанным в НРБ-99/2009, и реализуется в виде контрольных уровней для каждой территории в зависимости от намерений ее последующего использования. Эти критерии являются основными для оценки степени воздействия объекта на окружающую среду.

Величина выхода  $i$ -радионуклида из хранилища на территорию промплощадки  $C_3$  характеризуется относительным показателем миграции из хранилища  $K_{мхр}$  и рассчитывается по формуле:

$$K_{мхр} = \sum \frac{A_i}{KY} \quad (4),$$

где  $A_i$  – удельная активность  $i$ -радионуклида в воде наблюдательной скважины в ближней зоне хранилища, Бк/л;

$KY$  – контрольный уровень удельной активности  $i$ -радионуклида в воде, принятый на промплощадке предприятия, Бк/л; при этом должно соблюдаться условие  $KY > UB$  (при отсутствии  $KY$  можно использовать значения  $UB$ ).

Величина выхода  $i$ -радионуклида с территории промплощадки  $C_4$  характеризуется относительным коэффициентом ми-

number of reference levels of radionuclides (NRB-99/2009) for each land territory, depending on its intended use. These criteria from the basis for evaluation of the impact that the repository produces upon the environment.

Relative migration factor  $K_{rmf}$  characterises the value of the  $i$ -radionuclide release from the repository and is calculated using the formula:

$$K_{rmf} = \sum \frac{A_i}{RL} \quad (4),$$

where  $A_i$  is specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in water collected from an observation well located within in the surrounding zone of the repository, Bq/litre;

$RL$  is reference level of specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in water adopted for the site, in Bq/litre; on the premise that the condition "reference level > interference level" is met (when no separate reference level is set, interference level may be used).

Relative radionuclides migration factor from the site  $K_{mc}$  is calculated using the expression:

$$K_{mc} = \sum \frac{A_i}{RL} \quad (5),$$

where  $A_i$  is specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in water of an open body of water on the boundary between the sanitary protection zone and observation zone, deduced to group A or B (at the point of release into a drain system приведенная к одной группе радиотоксичности), Bq/litre;

$RL$  is interference level for the  $i$ -radionuclide in water at the point of release into a drain system, Bq/litre.

**GROUP D: TYPES AND EXTENT OF IMPACT UPON THE PUBLIC AND ENVIRONMENT**

Group D includes the following criteria:

- extent of host rock contamination with radionuclides ( $D_1$ );
- level of host rock and top soil contamination in the near and far zones of the repository with radionuclides ( $D_2$ );
- equivalent dose rate value on the site surface, zone of contamination, sanitary protection zone and observation zone ( $D_3$ ).

The criterion  $D_1$  characterises the scale of host rock contamination with radionuclides. It is determined by the following ratio:

грации радионуклидов с территории промплощадки  $K_{mc}$  и вычисляется так:

$$K_{mc} = \sum \frac{A_i}{УВ} \quad (5),$$

где  $A_i$  – удельная активность  $i$ -радионуклида в воде открытого водоема на границе СЗЗ и ЗН, в точке сброса в систему водоотвода, приведенная к одной группе радиотоксичности, Бк/л;

УВ – уровень вмешательства  $i$ -радионуклида в воде в точке сброса в систему водоотведения, Бк/л.

## ГРУППА D: ВИДЫ И СТЕПЕНЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И НАСЕЛЕНИЕ

Группа D включает следующие критерии:

– масштаб загрязнения радионуклидами вмещающих пород ( $D_1$ );

– уровень загрязнения радионуклидами вмещающих пород и верхнего слоя почвы в ближней и дальней зоне хранилищ ( $D_2$ );

– величина МЭД ГИ на поверхности объекта, территории зоны возможного загрязнения (ЗВЗ), СЗЗ и ЗН ( $D_3$ ).

Критерий  $D_1$  характеризует масштаб загрязнения радионуклидами вмещающих пород и определяется по формуле:

$$D_1 = \frac{V_r}{V_{PAO}} \cdot 100\% \quad (6),$$

где  $V_r$  – объем загрязненного грунта,  $m^3$ ;

$V_{PAO}$  – объем РАО, размещенных в хранилище,  $m^3$ .

Критерий  $D_1$  рассчитывается в процентах и безопасный уровень должен стремиться к нулю.

Критерий  $D_2$  определяется двумя параметрами (и меняется в зависимости от категории территории): удельной активностью  $i$ -радионуклида в загрязненном грунте и значению МЗУА для  $i$ -радионуклида в соответствии с приложением 4 к НРБ-99/2009. Предложенный показатель устанавливает нижнюю границу удельной активности  $i$ -радионуклида, при превышении которой любой материал относится к РАО. Критерий  $D_2$  характеризует степень загрязнения грунтов ближней зоны и показывает потенциальный риск формирования источника вторичного загрязнения окружающей среды.

Критерий  $D_2$  определяет выражение:

$$D_2 = \sum \frac{A_{vi}}{МЗУА_i} \quad (7),$$

где  $A_{vi}$  – удельная активность  $i$ -радионуклида в грунте ореола загрязнения, Бк/кг.

Территория вокруг хранилища считается безопасной, если значение  $D_1$  и  $D_2$  не превышает 1. В отдельных случаях категорирование степеней загрязнения грунтов ближней зоны можно проводить в сравнении с критерием отнесения к очень низкоактивным отходам (ОНАО);  $D_2$  рассчитывается по формуле 8:

$$D_2 = \frac{A_{vi}}{A_{ОНАО}} \quad (8),$$

где  $A_{vi}$  – удельная активность  $i$ -радионуклида в грунте ореола загрязнения, Бк/кг или Бк/ $m^3$ ;

$A_{ОНАО}$  – удельная активность  $i$ -радионуклида в соответствии с критерием отнесения к ОНАО (СП 2.6.6.2572-2010).

При неизвестном радионуклидном составе ОНАО являются промышленные отходы с удельной  $\beta$ -активностью 0,3-100 кБк/кг, или с удельной  $\alpha$ -активностью 0,3-10 кБк/кг, или с содержанием трансурановых радионуклидов 0,3-1,0 кБк/кг. При известном радионуклидном составе отходы относятся к ОНАО, если их суммарная удельная активность больше или равна 0,3 кБк/кг, а верхняя граница активности определяется суммой отношений удельной активности радионуклидов к их МЗУА; сумма не должна превышать 1.

$$D_1 = \frac{V_{con}}{V_{RW}} \cdot 100\% \quad (6),$$

where  $V_{con}$  is contaminated soil volume,  $m^3$ ;

$V_{RW}$  is volume of radwaste contained in the repository,  $m^3$ .

Safe level of criterion  $D_1$  is expressed as percentage and must be as close to zero as possible.

Criterion  $D_2$  is determined by two parameters: specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in contaminated soil and minimum significant radioactivity value for the  $i$ -radionuclide. The proposed indicator sets the lower boundary for specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide, excess of which means that any material must be classified as radwaste. Criterion  $D_2$  characterises the extent of soil contamination within the near zone and potential risk of formation of a secondary contamination source for the environment.

Criterion  $D_2$  is determined through the expression 7:

$$D_2 = \sum \frac{A_{vi}}{MSRA_i} \quad (7),$$

where  $A_{vi}$  is specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in soil within the contamination zone, Bq/kg.

It is suggested that the land around the repository site can be considered safe if the values of  $D_1$  and  $D_2$  do not exceed unity. In certain cases,  $D_2$  can be calculated using the formula 8, categorisation of soil contamination within the near zone is performed using the criterion for classification as very low-level waste (VLLW):

$$D_2 = \frac{A_{vi}}{VLLW} \quad (8),$$

where  $A_{vi}$  is specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in soil contamination area, Bq/kg or Bq/ $m^3$ ;

VLLW is specific radioactivity of the  $i$ -radionuclide in accordance with the criterion for classification as VLLW (SP 2.6.6.2572-2010).

When radionuclide composition of the waste is unknown, VLLW classification is assigned to any industrial waste with specific value of  $\beta$ -radioactivity within 0.3-100 kBq/kg, or with specific values of  $\alpha$ -radioactivity within 0.3-10 kBq/kg, or with transuranic radionuclides content within 0.3-1.0 kBq/kg. When radionuclide composition of the waste is known, VLLW classification is assigned to waste if its total specific radioactivity equals to or exceeds 0.3 kBq/kg, while the upper boundary of radioactivity is determined by the total of ratios of specific radioactivity values of radionuclides to their minimum significant specific radioactivity value: the total must not exceed unity.

For the criterion  $D_3$ , equivalent dose rate from g-radiation on the repository surface, contaminated site territory, at the boundary between the sanitary protection zone and observation zone are determined, which are listed in the table.

## GROUP E: SOCIAL AND PSYCHOLOGICAL IMPACT UPON THE PUBLIC

The criteria in this group may under certain circumstances become decisive for determination of the sequence of repository categorisation by their danger level. These include:

- distance from the repository to the nearest human settlement and sources of water supply ( $E_1$ );
- perception of the repository among the local public ( $E_2$ );
- evaluation of exposure doses to members of the public ( $E_3$ );
- availability of physical protection and restricted access arrangements on the repository site ( $E_4$ ).

The safe level for criterion  $E_1$  is determined as distance in excess of 30 km. This value is determined on the basis of analysis of available literature about radionuclides migration in geological formations and the results of mathematical modelling of radionuclides dissemination.

За безопасный уровень по критерию  $D_3$  принято значение мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД ГИ), равное фоновому показателю для данной территории. По критерию  $D_3$  можно провести регламентацию МЭД ГИ на поверхности хранилищ РАО, территории промплощадки, в ЗВЗ, на границе СЗЗ и ЗН (см. таблицу).

### ГРУППА Е: СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НАСЕЛЕНИЕ

Критерии этой группы при определенных условиях могут играть главную роль при определении очередности категорирования хранилищ по степени опасности. К ним относятся:

- расстояние объекта до населенного пункта и источников водоснабжения ( $E_1$ );
- отношение местных жителей к размещению хранилища РАО на данной территории ( $E_2$ );
- оценка доз облучения населения ( $E_3$ );
- наличие физической защиты и ограничения доступа на территорию объекта ( $E_4$ ).

За безопасный уровень объекта  $E_1$  принято расстояние более 30 км. Эта величина установлена на основе анализа данных литературы о миграции радионуклидов в геологических формациях и результатов математического моделирования распространения радионуклидов.

Критерий  $E_3$  рассматривается по следующему набору референтных сценариев облучения, соответствующих главным путям формирования доз внутреннего и внешнего облучения:

- поступление радионуклидов с питьевой водой;
- поступление радионуклидов с продуктами питания;
- ингаляционное поступление;
- внешнее  $\gamma$ -облучение, дистанционное и контактное  $\beta$ -облучение кожи;
- заглатывание пыли, воды при купании и т.д.

Критерий  $E_4$  имеет качественный характер. В большинстве случаев он может быть определен только двумя показателями:

- физическая защита есть, несанкционированный доступ на территорию закрыт – безопасный уровень;
- физической защиты нет, несанкционированный доступ на территорию возможен – чрезвычайно опасный уровень.

\* \* \*

При окончательной оценке степени потенциальной опасности приповерхностных хранилищ баллы по каждому показателю суммируются, делятся на количество используемых показателей, и делается вывод о степени радиационной опасности.

Все предложенные критерии условно разделены на критические ( $A_1$ - $A_2$ ,  $C_1$ - $C_7$ ,  $D_1$ - $D_3$ ,  $E_1$ - $E_3$ ) и дополнительные ( $A_3$ ,  $B_1$ - $B_3$ ,  $E_4$ ). Критические критерии используются при выполнении основного этапа ранжирования объектов по степени опасности. Дополнительные служат для выделения наиболее опасных объектов, которые по итогам основного этапа набрали одинаковое количество баллов.

Предложенные критерии и алгоритм ранжирования могут быть использованы при оценке степени опасности различных объектов хранения радиоактивных отходов (отвалов, хвостов и шламохранилищ, приповерхностных хранилищ и т.д.). Для корректности сравнения полученных результатов при ранжировании различных объектов должны быть применены одни и те же критерии опасности, при этом не обязательно использовать все показатели.

The criterion  $E_3$  is considered using the following selection of reference exposure scenarios that correspond to key pathways for internal and external exposure:

- radionuclides intake with drinking water;
- radionuclides intake with food;
- inhalation;
- external exposure to  $\gamma$ -radiation, distant and contact  $\beta$ -irradiation of the skin;
- ingestion of dust, water while swimming, etc.

The criterion  $E_4$  is qualitative in its nature. In the majority of cases, it can be determined using only two indicators:

- physical protection is in place, unauthorised access to the repository site is prevented – safe level;
- physical protection is not in place, unauthorised access to the repository site is possible – extremely unsafe level.

\* \* \*

For final evaluation of the extent of potential danger represented by near-surface waste repositories, the points are summed up, divided by the number of indicators used, and conclusion is further drawn regarding the level of radiation hazard.

All proposed criteria are conventionally divided into critical ( $A_1$ - $A_2$ ,  $C_1$ - $C_7$ ,  $D_1$ - $D_3$ ,  $E_1$ - $E_3$ ) and additional ( $A_3$ ,  $B_1$ - $B_3$ ,  $E_4$ ). Critical criteria are used for the main phase of repository ranking by level of hazard. Additional criteria are used to identify the most dangerous sites among those that scored the same number of points at the end of the main phase.

The proposed criteria and ranking algorithm may be used for evaluation of the extent of danger posed by various repositories where radioactive waste is stored (dumps, tails and sludge heaps, near-surface repositories, etc.). In order for comparison of the obtained results to be performed correctly, different sites must be ranked using the same hazard criteria; it is not necessary to use all of the indicators.

#### Литература / References:

1. Коренков И.П., Лащеннова Т.Н. Классификация степени потенциальной опасности приповерхностных хранилищ РАО / Тезисы докладов 6-го Международного симпозиума: Экология человека и медико-биологическая безопасность населения, Греция, Салоники, 24 октября – 3 ноября 2010. – С. 65-70.
2. Коренков И.П., Лащеннова Т.Н., Веселов Е.Н., Илюхина Н.С. Критерии оценки степени потенциальной опасности приповерхностных хранилищ РАО / Всероссийская научно-практическая конференция: Ядерная, радиационная безопасность и нераспространение (ЯРБН-2010): Тез. докл. – Новоуральск, 1-3 декабря 2010. – С. 54-57.
3. Мартыанов В.В., Коренков И.П. Радиационно-гигиенические подходы к решению экологической безопасности хранилищ РАО // Медицина труда и промышленная экология. – 2011. - №2. - С.
4. Веселов Е.И. Экологическая оценка состояния защитных барьеров хранилищ при долговременной локализации радиоактивных отходов // Медицина труда и промышленная экология. – 2009. – №3. – С. 4-6.
5. Веселов Е.И. Исследование формирования геохимических аномалий во вмещающих породах ближней зоны хранилищ радиоактивных отходов (РАО) // АНРИ. – 2011. – №1. – С. 42-48.
6. ГОСТ 29114-91. Отходы радиоактивные. Метод измерения химической устойчивости отвержденных радиоактивных отходов посредством длительного выщелачивания.
7. НП 055-04. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности – Москва, 2004.
8. СанПиН 2.6.1. 2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Госстандарт, М., 2009 – 100 с.
9. СП 2.6.1.2612-2010. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). – М.: Минздрав России, 2000.
10. РБ-042-07. Методика категоризации закрытых радионуклидных источников по потенциальной радиационной опасности. – Москва, 2007.
11. СП 2.6.6.2572-2010. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды.