



## Прогнозиране на разпространението на радионуклиди в геоложката среда на хранилището за радиоактивни отпадъци „Нови хан“

Майя Матеева<sup>1</sup>, Димитър Антонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика, БАН, 1784 София;  
E-mail: mmateeva@inrne.bas.bg

<sup>2</sup>Геологически Институт, БАН, 1113 София, E-mail: dimia@geology.bas.bg

M. Mateeva, D. Antonov. 2004. *Prognosis of the radionuclide migration in the geological media of the Near Surface Repository for Radioactive Waste — Novi Han.* — *Rev. Bulg. Geol. Society*, 65, 1-3, 47-54.

**Abstract.** The paper presents an approach for analyzing and modelling of the “geosphere” as one of the main components included in the safety assessment analyses of the Near Surface Repository for Radioactive Waste — Novi Han disposal system. To clarify and facilitate development of the conceptual model for “geosphere” the interaction matrix is constructed. In keeping with the features of the “geosphere”, identified during analysis appropriate mathematical models for radionuclide migration through the both zones — unsaturated and saturated, are selected and adapted into using a computer code AMBER. Results for radionuclide release from all disposal units and for peak values of radionuclide concentrations in the nearest well, located at 280 m from the repository, are presented. It is estimated that maximum concentration values of studied radionuclides are in times less than that regulated in the National Regulation for Radiation Protection. Therefore, the local geological medium is an appropriate barrier against radionuclide migration.

**Key words:** geosphere, safety assessment, repository, radioactive waste, radionuclide migration.

### Въведение

Геоложката среда играе значима роля за безопасната експлоатация на повърхностните хранилища за радиоактивни отпадъци (РАО). Тя е естествена бариера срещу миграцията на радионуклиди извън хранилището и е от изключително значение в периода след разрушаване на инженерните бариери. В зависимост от особеностите и характеристиките на геоложката среда, наричана в оценките по безопасност „геосфера“, е възможно забавяне или ускоряване на транспорта на радионуклидите. От способността на геоложката среда да осигури надеждна изолация чрез минимизиране на преноса на замърсители към водоизточниците зависи и опазването на чистотата на екосистемите и радиационната защита на населението. Според документи на Международната агенция за атомна енергия (МААЕ) една от основните задачи в оценките за безопасността на повърхностни хранилища за РАО е да се моделира и прогнозира поведението на радионуклидите при нормално развитие на геоложката среда, а в следексплоатационните оценки и по отношение на алтернативни развития, съответстващи на специфичните дадености за пло-

щадката и района (IAEA, 1999a; 1999b, 2000a, 2000b).

Постоянното хранилище за радиоактивни отпадъци (ПХРАО) „Нови хан“ е единственото за сега повърхностно съоръжение за погребване на РАО в България. То е построено през 1956 г. по съветски типов проект „РАДОН“ и е влязло в експлоатация през 1964 г., като местоположението му е избрано след проведени геоложки проучвания на шест потенциални площадки и в съответствие с първоначалното изискване за близко разположение до София. В изградените хранилищни единици за твърди, биологични, течни и отработени източници са погребани отпадъци, получавани от индустрията (без АЕЦ „Козлодуй“), медицината, селското стопанство и научните изследвания. Известни са характеристиките на хранилищните единици и радионуклидния инвентар на погребаните РАО (Матеева, 2001; Матеева, Козак, 2001). С цел изясняване на условията на земната среда през 1991 и 2002 г. са проведени геоложки проучвания на площадката, в резултат на които е събрана детайлна информация, необходима за провеждането на оценките по безопасност (Евстатиев и др., 1992, 1993; Evstatiev et al., 1994; Evstatiev, Kozhukharov, 2000; Кожухаров и др., 2002; Гълъбов и др., 2003).

## Основни данни за геоложката среда и хидрогеоложките характеристики на площадката на хранилище „Нови хан“

Най-важните геоложки особености, имащи отношение към оценката по безопасност, са:

— сложен геоложки и тектонски строеж — блоково-разломен тип;

— наличие на пукнатини с характерна закономерност и неактивни разломи;

— еднороден по състав скален масив — филитизирани алевролити и аргилити с палеозойска възраст;

— изветрителната кора на филитизираните алевролити, достигаща 10–11 m, представлява непосредствена земна основа за хранилището.

На базата на анализ на климатичните и хидроложки данни за района е установен среден модул на водния отток — 5,4 l/s km<sup>2</sup>.

При обща приходна част на баланса от валежите — 650 mm, и годишна евапотранспирация — 445 mm, е определен общият средногодишен (повърхностен и подземен) отток — 205 mm.

Проучени са подземните води (порови и пукнатинни), като са представени данни от геохимичните и радиохимичните им характеристики.

Таблица 1  
Коефициенти на разпределение  $K_d$  [m<sup>3</sup>/kg] за двете зони на геоложката среда — ненаситена и наситена

Table 1  
Distribution coefficients  $K_d$  [m<sup>3</sup>/kg] for both unsaturated and saturated zones in geosphere

| Елемент | $K_d$ – ненаситена зона [m <sup>3</sup> /kg] | $K_d$ – наситена зона [m <sup>3</sup> /kg] |
|---------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| H       | 0                                            | 0                                          |
| C       | 0.0034 <sup>(1)</sup>                        | 0.003 <sup>(1)</sup>                       |
| Co      | 0.092 <sup>(1)</sup>                         | 0.107 <sup>(1)</sup>                       |
| Ni      | 0.092 <sup>(1)</sup>                         | 0.107 <sup>(1)</sup>                       |
| Sr      | 0.154 <sup>(1)</sup>                         | 0.148 <sup>(1)</sup>                       |
| Cs      | 0.595 <sup>(1)</sup>                         | 0.456 <sup>(1)</sup>                       |
| Pb      | 0.3 <sup>(2)</sup>                           | 0.5 <sup>(2)</sup>                         |
| Po      | 0.15 <sup>(2)</sup>                          | 0.5 <sup>(2)</sup>                         |
| Ra      | 0.5 <sup>(2)</sup>                           | 0.4 <sup>(2)</sup>                         |
| Ac      | 0.34 <sup>(2)</sup>                          | 3.0 <sup>(2)</sup>                         |
| Th      | 3.0 <sup>(2)</sup>                           | 3.0 <sup>(2)</sup>                         |
| Pa      | 0.34 <sup>(2)</sup>                          | 1.0 <sup>(2)</sup>                         |
| U       | 0.0068 <sup>(2)</sup>                        | 1.0 <sup>(2)</sup>                         |
| Np      | 0.34 <sup>(2)</sup>                          | 3.0 <sup>(2)</sup>                         |
| Pu      | 0.34 <sup>(2)</sup>                          | 3.0 <sup>(2)</sup>                         |
| Am      | 0.34 <sup>(2)</sup>                          | 3.0 <sup>(2)</sup>                         |

(1) Кожухаров и др., 2002; (2) IAEA, 2001b

На базата на разработена хидропиезометрична карта са определени посоката на тяхното движение, характеристиките на водоносния хоризонт и точката на разтоварването му. Ясно са идентифицирани две зони от хидрогеоложка гледна точка — ненаситена (7–10 m) и наситена. Определени са средногодишната инфилтрация за площадката — 29,3 mm, общият подземен отток — 0,7 l/s, напорният градиент — 0,095, и средната проводимост на пласта — 0,3 m<sup>2</sup>/d (Гълъбов и др., 2003).

Чрез динамични и статични лабораторни експерименти са определени коефициентите на разпределение  $K_d$  за <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr. Резултатите от тях, както и стойностите за  $K_d$  на елементите, за които няма експериментално получени данни, но са използвани в пресмятанията, са представени в таблица 1.

За идентифицирането на потенциалните транспортни пътеки по отношение на замърсителите през „геосферата“ се разглеждат особеностите на потока на подземните води и възможните влияния и взаимодействия в ненаситената и наситената зона. Частта на „геосферата“ в системата от процеси (СП) е променлива поради факта, че тя е междинно звено при дисперсията на замърсителите от „близкото“ към „далечното поле“. Освен това тя е повлияна силно от външните особености, процеси и явления (ОПЯ), които по дефиниция не се включват в СП.

## Матрица на взаимодействията за „геосферата“ в системата от процеси за хранилищната система

За визуализиране и по-добро разбиране на процеса по отсяване и класификация на особеностите, процесите и явленията (ОПЯ) за „геосферата“ и за създаване на концептуален модел на „геосферата“ на хранилищната система на ПХРАО „Нови хан“ е приложен един от най-съвременните методи, препоръчан от МААЕ (IAEA, 2001a) — разработване на матрица на взаимодействията (МВ) (фиг. 1).

Елементите, разположени по диагонала, са основните компоненти в разглежданата система и се наричат управляващи диагонални елементи (УДЕ). Взаимодействията между основните компоненти се определят като извъндиагонални елементи (ИДЕ) и се обозначават по посока на часовниковата стрелка.

Водата — определяна като УДЕ, е част от процесите, които предвиждат транспорта на радионуклидите в геосферата с водния поток. Основната движеща сила на този вид транспорт са хидравличните и хидрогеоложките процеси и явления.

Микробиотата е свързана в този случай с ОПЯ, които обуславят биологични или биохимични процеси, потенциално въздействащи върху „геосферата“. В този контекст, микробиотата може да послужи като транспортен механизъм за радионуклидите извън „близкото поле“ (фиг. 1).

|   | A           | B             | C     | D               | E                 | F        |
|---|-------------|---------------|-------|-----------------|-------------------|----------|
| 1 | БЛИЗКО-ПОЛЕ | (1,B)         | (1,C) | (1,D)           | (1,E)             | (1,F)    |
| 2 | (2,A)       | МИКРО-БИОТИКА | (2,C) | (2,D)           | (2,E)             | (2,F)    |
| 3 | (3,A)       | (3,B)         | ВОДА  | (3,D)           | (3,E)             | (3,F)    |
| 4 | (4,A)       | (4,B)         | (4,C) | НЕНАСИТЕНА ЗОНА | (4,E)             | (4,F)    |
| 5 | (5,A)       | (5,B)         | (5,C) | (5,D)           | НАСИТЕНА ГЕОСФЕРА | (5,F)    |
| 6 | (6,A)       | (6,B)         | (6,C) | (6,D)           | (6,E)             | БИОСФЕРА |

Фиг. 1. Матрица на взаимодействията за компонентите на ниво II на геосферата на СП на хранилище за радиоактивни отпадъци „Нови хан“

Fig. 1. Interaction matrix for components of Level II of the geosphere in the System of Processes of the repository for radioactive waste "Novi Han"

Таблица 2

Описание на процесите и условията за дефиниране на извъндиагоналните елементи в матрицата на взаимодействията в системата от процесите на геосферата на хранилище за радиоактивни отпадъци „Нови хан“

Table 2

Description of processes and conditions for defining of the off-diagonal elements in the interaction matrix in the System of Processes for repository for radioactive waste "Novi Han"

| Номер на елемента | Процеси и условия                               | Коментари                                                                                                                                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1,C)             | хидравлични/хидрогеоложки                       | представяват прехода от „близкото поле“ към „геосферата“                                                                                          |
| (3,D)             | хидравлични/хидрогеоложки<br>химични/геохимични | поток на подземните води (ненаситен), преференциален поток (ненаситен), ненаситени транспортни процеси<br>химично утаяване, химично превръщане    |
| (3,E)             | химични/геохимични                              | химично утаяване, химично превръщане                                                                                                              |
| (4,E)             | хидравлични/хидрогеоложки<br>химични/геохимични | поток на подземните води (ненаситен), преференциален поток (ненаситен),<br>ненаситени транспортни процеси<br>химично утаяване, химично превръщане |
| (5,F)             | хидравлични/хидрогеоложки<br>химични/геохимични | поток на подземните води (наситен), преференциален поток (наситен), наситени транспортни процеси<br>химично утаяване, химично превръщане          |
| (6,E)             | човешко поведение                               | например водочерпене от сондажен кладенец                                                                                                         |
| (6,D)             | интрузия на животни<br>биологични/биохимични    | например действията по разравяне от къртици<br>например кореново поглъщане                                                                        |
| (4,F)             | хидравлични/хидрогеоложки                       | поток на подземните води (ненаситен), преференциален поток (ненаситен), изпарение                                                                 |
| (3,B)             | биологични/биохимични                           | биологична активност                                                                                                                              |
| (2,C)             | биологични/биохимични                           | биологична активност                                                                                                                              |
| (2,D)             | биологични/биохимични                           | влияние на микробиотата върху свойствата на ненаситената „геосфера“                                                                               |
| (2,E)             | биологични/биохимични                           | влияние на микробиотата върху свойствата на наситената „геосфера“                                                                                 |

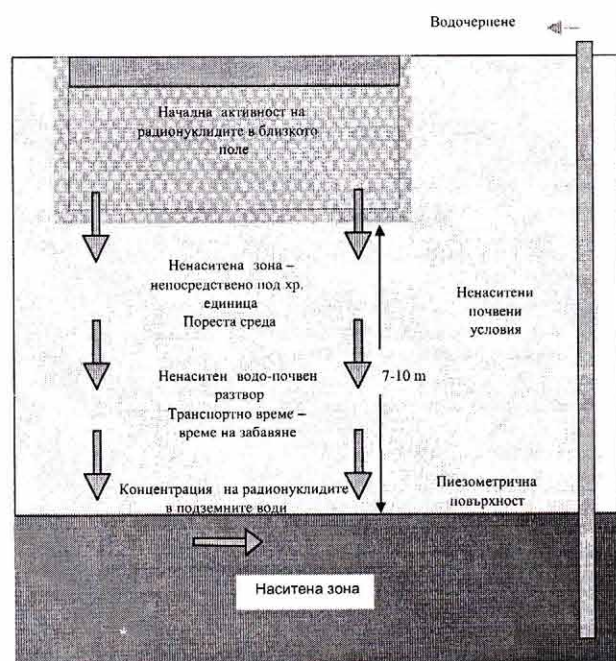
„Геосферата“ може да се раздели на две зони — ненаситена и наситена. Потокът на подземните води и свързания с това радионуклиден транспорт през тези зони се описва чрез моделиране на транспорта в пореста и напукана среда, ненапукана среда или друга геоложка структура. Ненаситената и наситената зона и техните особености се отнасят към ОПЯ, които дефинират предпочитаните пътеки на движение на подземните води.

„Геосферата“ е свързващото звено между „близкото поле“ и „биосферата“ (фиг. 1). Следователно трябва да се очаква, че важни процеси протичат между „близкото поле“, компонентите на „геосферата“ и с „биосферата“. Поради тази причина „близкото поле“ и „биосферата“ са включени като УДЕ в МВ. Основната транспортна връзка между „близкото поле“ и „геосферата“ е чрез водния поток, в който се включва и транспорта на микробиотата под формата на колоидни разтвори.

За първата итерация по идентифицирането на ИДЕ в МВ за геосферата на СП за ПХРАО „Нови хан“ са разгледани само процесите, които влияят върху баланса на масата (табл. 2).

### Концептуален модел за „геосферата“ за референтната система (РС) на ПХРАО „Нови хан“

Приета е следната схематизация на концептуалния модел на „геосферата“ (фиг. 2) за РС (систе-



Фиг. 2. Концептуален модел за „геосферата“ на Референтната система на хранилище за радиоактивни отпадъци „Нови хан“ в оценките по безопасност

Fig. 2. Conceptual model of „geosphere“ – Reference System of repository for radioactive waste in Novi Han, included in safety assessments

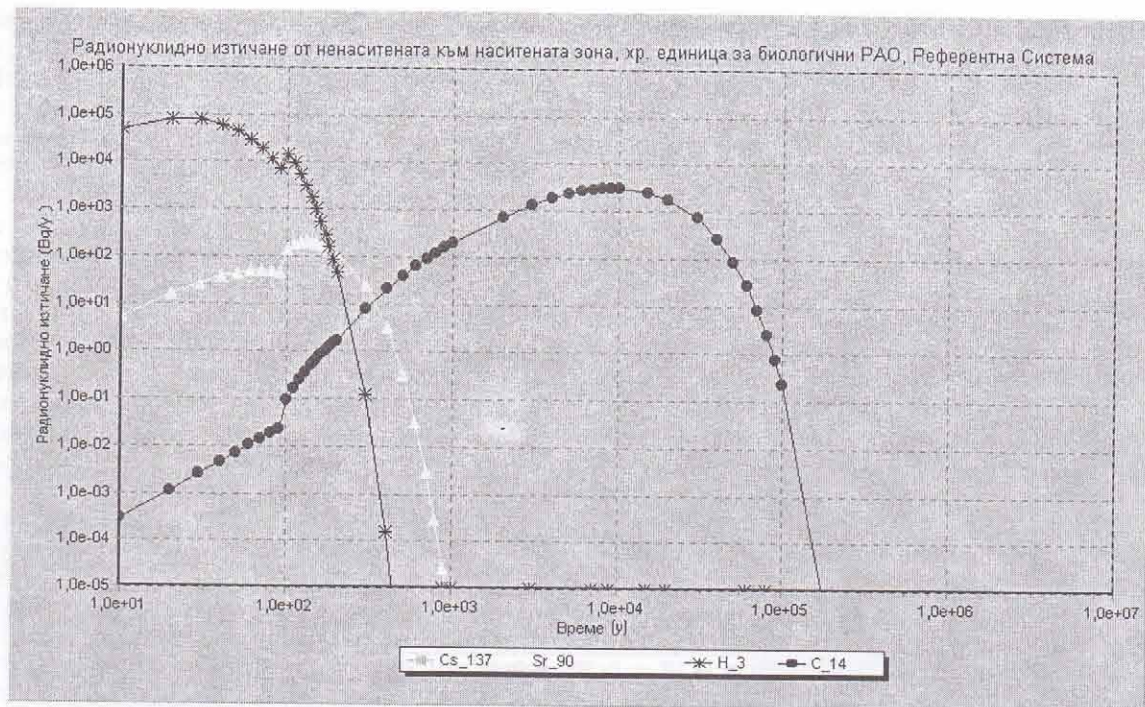
ма, предполагаща единствено измиване на радионуклиди от отпадъците и просмукване навън от съответната хранилищна единица към подземните води). Режимът на водния поток в ненаситената зона е вертикален по посока на движение на инфилтриращата се вода през пореста среда. Предполагано е, че цялата ненаситена зона се състои от един слой — филити, без да се отчита наличието на други прослойки. Физическият транспорт на радионуклидите през „геосферата“ не се разглежда, а вместо това се моделира т.янар. реактивно транспортно време през ненаситена почвена колона, което представлява времето на забавяне на активността за разпадане. Това е един опростен, но консервативен подход, което е необходимо условие за такъв род анализи и оценки. Транспортът, вследствие на дисперсия и дифузия, е игнориран, което води единствено до редуциране на пиковите стойности на активността. Този модел е утвърден в международната практика и е прилаган в оценките по безопасност на ПХРАО „Нови хан“ (Матеева, Козак, 2001; Матеева, 2003; IAEA, 2001b; IAEA 2001b; Van Blerk et al., 2001).

Прието е, че основно радионуклидите ще мигрират през ненаситената зона, докато достигнат наситената, където се смесват и разреждат с потока на подземните води. При хидрогеоложките изследвания е установено, че извор „Кръстеви кладенци“, разположен на 280 m от хранилището, се захранва от водоносния хоризонт. От това може да се направи допускане, че само част от активността може да бъде измерена при извора, защото са налице интензивни процеси на смесване и разреждане. За по-консервативен подход в разглежданата РС това допускане не се взема предвид. Естествено, че това от физична гледна точка не е възможно, но е въведено в тази оценка поради изключително малкия дебит на горе упоменатия извор.

### Моделиране на процесите на пренос на радионуклиди

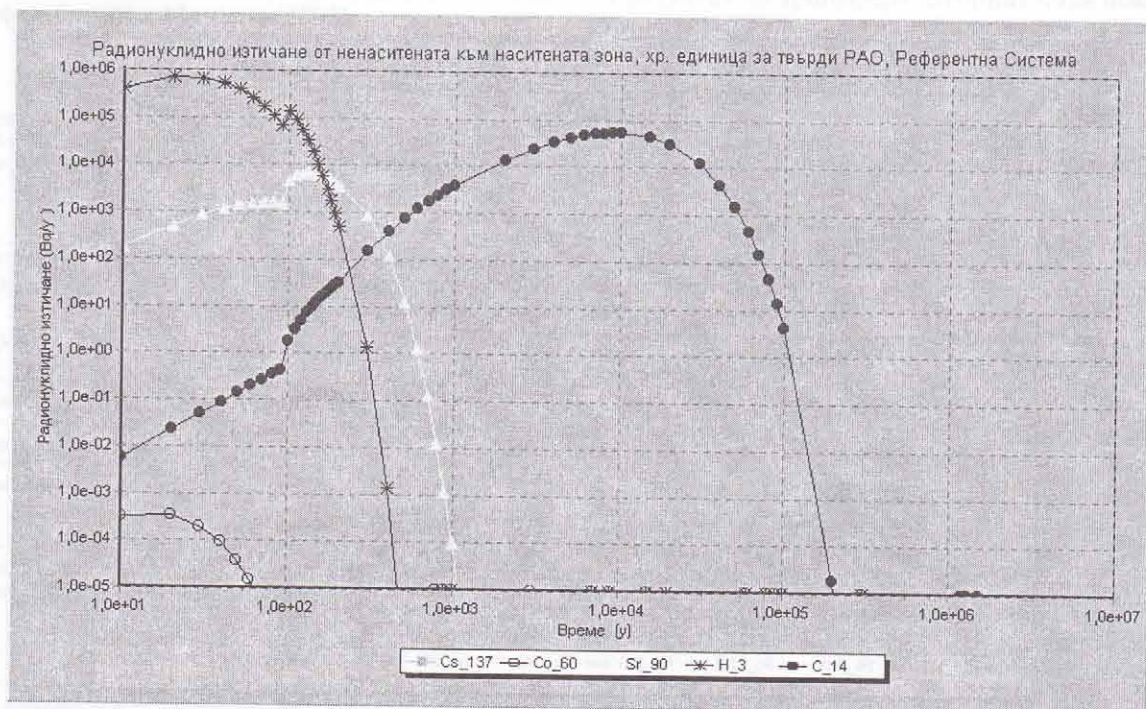
Представеният концептуален модел за анализ и оценка на процесите на транспорта на радионуклиди през „геосферата“ се базира на опростени математически модели. Ключовият фактор тук е редуцирането на пространствените измерения на проблема. При условията на хранилищната система в Нови хан е приложен математически модел за едноразмерен вертикален поток и транспорт, описан в Матеева (2001). Направено е и предположение, че порестата среда е хомогенна за цялата транспортна пътека на потока през ненаситената зона.

Ненаситената зона е оценена като първична естествена бариера за радионуклидния транспорт през „геосферата“, без да се отчита запаса по отношение на смесването, от процеса на разреждане и транспортните свойства на наситената зона. По такъв начин ненаситената зона е тре-



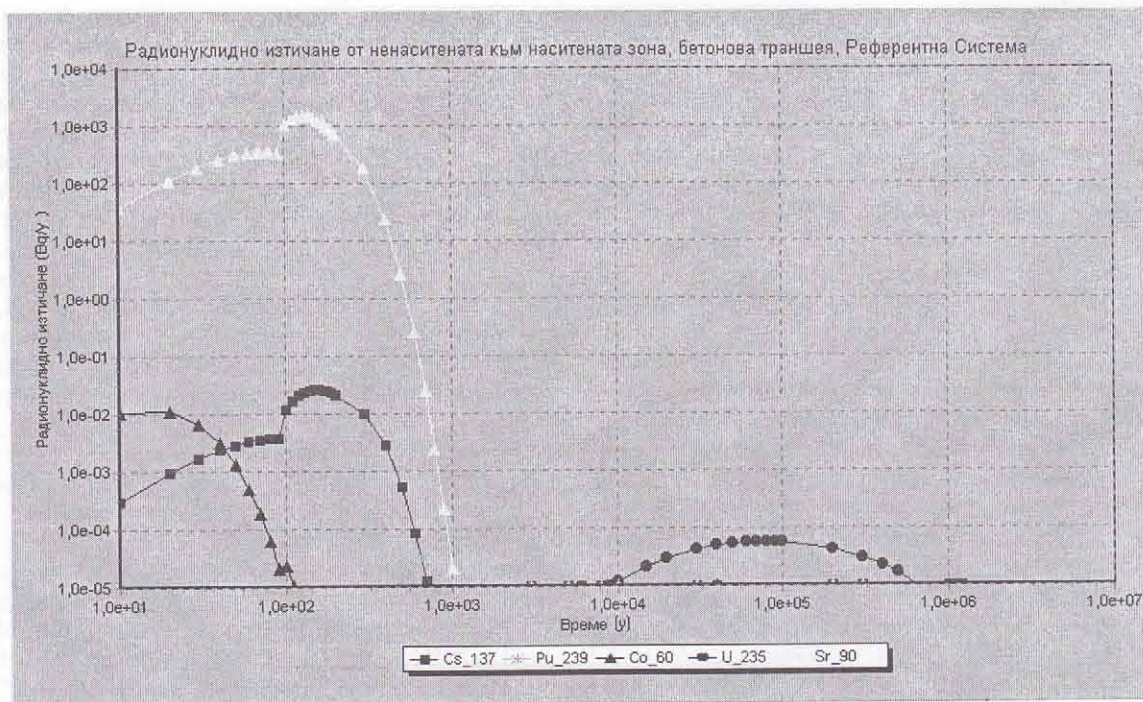
Фиг. 3. Радионуклидно изтичане от ненаситената към наситената зона — хранилищна единица за биологични РАО, Референтна система

Fig. 3. Radionuclide release from unsaturated to the saturated zone, disposal unit for biological waste, Reference System



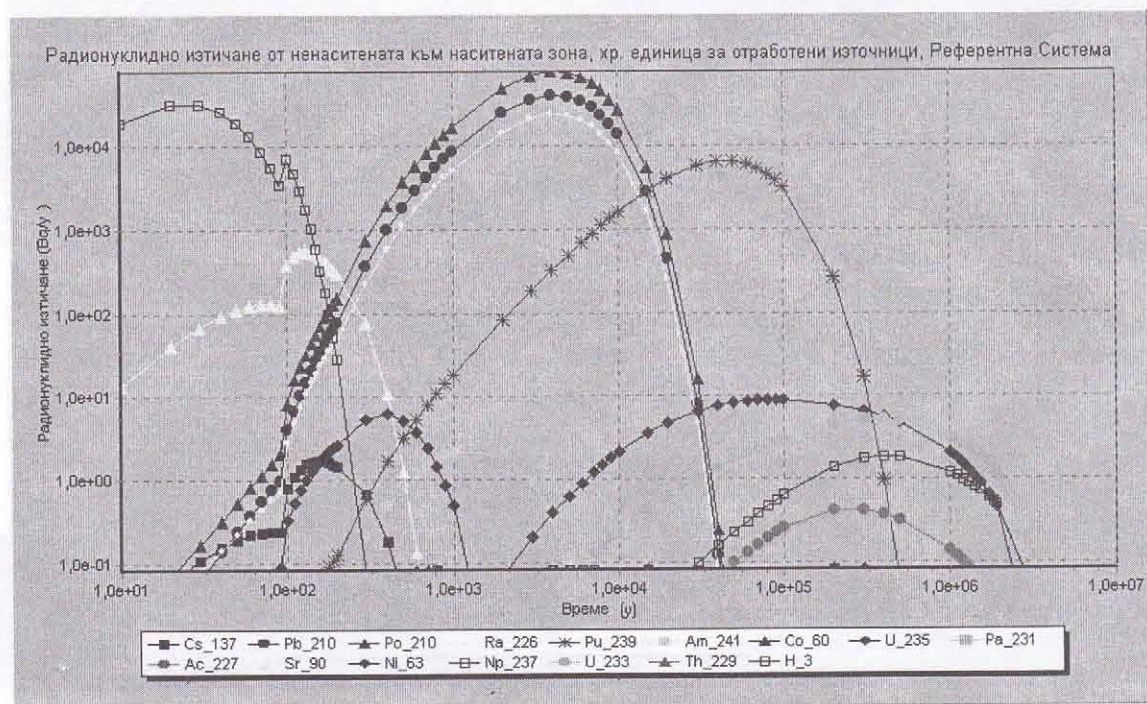
Фиг. 4. Радионуклидно изтичане от ненаситената към наситената зона, хранилищна единица за твърди РАО, Референтна система

Fig. 4. Radionuclide release from unsaturated to the saturated zone, disposal unit for solid radioactive waste, Reference System



Фиг. 5. Радионуклидно изтичане от ненаситената към наситената зона, бетонова траншея за твърди РАО, Референтна система

Fig. 5. Radionuclide release from unsaturated to the saturated zone, concrete trench for solid radioactive waste, Reference System



Фиг. 6. Радионуклидно изтичане от ненаситената към наситената зона, хранилищна единица за отработени източници, Референтна система

Fig. 6. Radionuclide Release from unsaturated to the saturated zone, disposal unit for spent sealed sources, Reference System

тирана като реактивен поток с постоянна инфилтрация/захранване на водоносния хоризонт.

Миграцията на радионуклидите от хранилищните единици към ненаситената зона се осъществява чрез инфилтрацията на повърхностни води главно от валежите. Радионуклидният транспорт в ненаситената зона е моделиран чрез времето на забавяне (времеви буфер, използван от функцията на разпадането). Това време на забавяне е всъщност времето, необходимо на радионуклида да премине вертикално през зоната. От направените геоложки проучвания на площадката е установено, че геоложката среда се състои от силно изветрели филити, за които са получени следните данни, използвани в оценката (Гълъбов и др., 2003):

- дебелина на ненаситената зона — 7–10 m;
- хидравлична проводимост — 0,041 m/d;
- обемната плътност на филитите — 2,2–2,3 g/cm<sup>3</sup>;

- влагосъдържание — 0,3 [—]
- коефициентите на разпределение  $K_d$ , получени от проведените експериментални изследвания и от литературни данни са представени в табл. 1.

Резултатите, получени от пресмятанията за радионуклидното изтичане от ненаситената към наситената зона по отношение на РС за отделните хранилищни единици, показват, че намаляването на активността в резултат на транспорта през ненаситената зона е много по-голямо за радионуклиди с голяма сорбируемост като <sup>134</sup>Cs и <sup>60</sup>Co и много по-малко за силно подвижните <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C (фиг. 3 — 6) и Матеева (2003).

Радионуклидният транспорт в наситената зона (водоносният хоризонт) е представен в математическия модел чрез серия от десет еднородни клетки, като се моделират процесите на адвекция, дисперсия и дифузия. Използваният тук модел е приложен при оценките на транспорта на радионуклидите в системата на подземните води (Kozak, 1999; IAEA, 2001b). Установено е изключително съответствие с аналитичните решения.

Направено е допускане, че няма напречна и надлъжна дисперсия, т.е. струята не се разпръсква, тъй като се движи предимно надолу. Предполага се, че вертикалната дисперсия е достатъчна, за да създаде еднородна концентрация, вертикално във водоносния хоризонт до точката на водочерпенето.

Математическият модел е въведен в компютърния код AMBER като мрежа от отделни клетки с използване на следното уравнение за определяне на радионуклида  $n$  в клетка  $i$  —  $A_i^n$  (mol) (Brice, 1996):

$$\frac{dA_i^n}{dt} = - \left[ \lambda_r^n + \sum_j \lambda_{ij} \right] A_i^n + \lambda_r^{n+1} A_i^{n+1} + \sum_j \lambda_{ji} A_j^n,$$

където:  $\lambda_{ij}$  е величината, характеризираща обмяна между клетка  $i$  и клетка  $j$ ;

$\lambda_r^n$  е постоянната на радиоактивното разпадане на радионуклид  $n$  и  $\lambda_r^{n+1}$  на радионуклид  $n+1$ .

Първият член от уравнението представя намаляването на активността от клетка  $i$  до клетка  $j$  в резултат на трансфера. Вторият член показва възникването на дъщерните продукти на разпа-

Таблица 3

Сравнение на получените от пресмятанията максимални стойности за концентрацията на радионуклиди в извора с допустимите обемни активности за питейна вода в Наредбата за основни норми за радиационна защита — ОНРЗ 2000

Table 3

Comparison of the results obtained from calculations of the Reference System about the maximum values of the radionuclide concentrations in well water with values regulated in the National Regulation for Radiation Protection (ONRP 2000) for drinking water

| Хранилищна единица   | Концентрация „Кръстеви кладенци“ [Bq/m <sup>3</sup> ]                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Концентрация ОНРЗ 2000 – питейна вода [Bq/m <sup>3</sup> ]                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| биологични РАО       | <sup>3</sup> H – 1.8E-02; <sup>14</sup> C – 3.12E+00                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <sup>3</sup> H – 2.0E+07; <sup>14</sup> C – 7.8E+05                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| твърди РАО           | <sup>3</sup> H – 1.6E-01; <sup>14</sup> C – 5.45E+01                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <sup>3</sup> H – 2.0E+07; <sup>14</sup> C – 7.8E+05                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| бетонна траншея      | <sup>227</sup> Ac – 7.80E-06; <sup>231</sup> Pa – 7.85E-06;<br><sup>235</sup> U – 7.97E-06; <sup>239</sup> Pu – 7.19E-11                                                                                                                                                                                                                                   | <sup>227</sup> Ac – 3.8E+01; <sup>231</sup> Pa – 9.6E+01;<br><sup>235</sup> U – 3.6E+03; <sup>239</sup> Pu – 3.0E+02                                                                                                                                                                                                              |
| отработени източници | <sup>3</sup> H – 8.0E-03; <sup>210</sup> Pb – <E-15; <sup>210</sup> Po – <E-15;<br><sup>226</sup> Ra – <E-15; <sup>227</sup> Ac – 1.70E+00; <sup>229</sup> Th – 3.7E-01;<br><sup>231</sup> Pa – 1.72E+00; <sup>233</sup> U – 3.7E-01; <sup>235</sup> U – 1.78E+00;<br><sup>237</sup> Np – 1.8E-01; <sup>239</sup> Pu – 1.57E-05                            | <sup>3</sup> H – 2.0E+07; <sup>210</sup> Pb – 1.5E+02; <sup>210</sup> Po – 7.8E+01;<br><sup>226</sup> Ra – 2.7E+02; <sup>227</sup> Ac – 3.8E+01; <sup>229</sup> Th – 1.1E+02;<br><sup>231</sup> Pa – 9.6E+01; <sup>233</sup> U – 1.5E+02; <sup>235</sup> U – 3.6E+03;<br><sup>237</sup> Np – 6.3E+02; <sup>239</sup> Pu – 3.0E+02 |
| сумарно за ПХРАО     | <sup>3</sup> H – 1.86E-01; <sup>14</sup> C – 5.76E+01; <sup>210</sup> Pb – <E-15;<br><sup>210</sup> Po – <E-15; <sup>226</sup> Ra – <E-15; <sup>227</sup> Ac – 1.70E+00<br><sup>229</sup> Th – 3.7E-01; <sup>231</sup> Pa – 1.72E+00; <sup>233</sup> U – 3.7E-01<br><sup>235</sup> U – 1.78E+00; <sup>237</sup> Np – 1.8E-01; <sup>239</sup> Pu – 1.57E-05 | < от нормите за питейна вода в ОНРЗ 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

дането на радионуклида в клетка i. Последният член изразява трансфера на активността в разглежданата клетка от другите клетки.

Основните транспортни процеси, които се моделират, са адвекция, дисперсия и дифузия. Отчитат се процесите на сорбция за разглежданите геоложки структури и радионуклиди. Математическият модел и разработеният за пресмятанията модел в AMBER е описан от Матеева и Козак (2001).

Анализът на резултатите на максималните стойности на обемната концентрация на радионуклиди в разглеждания извор „Кръстеви кладенци“, получени от пресмятанията за разпространението на замърсителите от съществуващите хранилищни единици през наситената зона към „биосферата“, показва много по-ниски стойности (до 17 пъти) от допустимите обемни активности в питейна вода, регламентирани в Наредбата за основни норми за радиационна защита (ОНРЗ) 2000 (табл. 3).

Инженерните бариери на повърхностно хранилище за РАО трябва да изпълняват функцията си за време от 300 до 1000 години. В случай на компрометиране на инженерната защита през този период безопасната експлоатация на хранилището трябва да бъде осигурена от геоложката среда. Получените стойности за обемната концентрация за всеки от изследваните радионуклиди показват, че при така описания концептуален модел (Референтна система) и в случай на

евентуален „пробив“ на хранилищните единици наличието на радионуклиди (включително дългоживущи) от района на площадката на хранилището в точката на разтоварване на водоносния хоризонт (извор „Кръстеви кладенци“) не представлява опасност за околната среда. Приведени са резултати за всяка хранилищна единица и сумарно за цялото хранилище ПХРАО „Нови хан“ (табл. 3).

## Заклучение

Прогнозата за вероятното поведение и миграция на радионуклидите от ПХРАО „Нови хан“ през „геосферата“ към „биосферата“ показва, че стойностите за концентрацията на радионуклидите в точката на разтоварване на водоносния хоризонт (извора „Кръстеви кладенци“) са много по-малки от допустимите, регламентирани в ОНРЗ 2000. Това показва, че геоложката среда е добра природна бариера за хранилището и е в състояние да забави и минимизира преноса на радионуклидите към „биосферата“, а оттам и до човека. Необходимо е да се отбележи, че по отношение на ПХРАО „Нови хан“ това е от изключително значение поради факта, че са погребани РАО-съдържащи дългоживущи радионуклиди ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), за които инженерните бариери не могат да осигурят задържането им в дълговременна скъла.

## Литература

- Гълъбов, М., Ст. Ковачев, В. Мавродиев. 2003. Изследвания върху миграционната способност на някои радионуклиди в подземните води. — Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“, 46, кн. 1 — геол., 231-234.
- Евстатиев, Д., П. Петров, Р. Ангелова, Д. Карастанев. 1993. Геоложка и екогеоложка характеристика на хранилището за радиоактивни отпадъци в Лозенската планина. — Сп. Бълг. геол. д-во, 54, 3, 109-120.
- Матеева, М. 2001. Предварителна оценка по безопасност на постоянно хранилище за радиоактивни отпадъци — Нови хан. С., изд. Термит, 176 с.
- Матеева, М., М. Козак. 2001. Оценка по безопасност на постоянно хранилище за радиоактивни отпадъци — Нови хан. С., изд. Термит, 180 с.
- Brice, A. 1996. AMBER 3.1 Reference Guide.
- Evstatiev, D., D. Kozhukharov. 2000. Geological setting of the Novi Han Radioactive Waste Storage Site. — In: *Upgrading of Novi Han Radioactive Waste Repository*. International Workshop, 27-30 November, 2000, Borovets, Bulgaria.
- Evstatiev, D., P. Petrov, R. Angelova, D. Karastanev. 1994. Geoenvironmental assessment of Radioactive Waste Repository. — In: *Proc. 7th Intern. IAEA Congress*, 1994, Rotterdam, Balkema, 2403-2410.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1999a. *Near Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements*, Safety Standards Series No WS-R-1, Vienna, 29 p.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1999b. *Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste*, Safety Guide. Safety Standards Series No WS-G-1.1, Vienna, 31 p.

## Непубликувани материали и фондови източници:

- Евстатиев, Д., П. Петров, Р. Ангелова, Д. Карастанев. 1992. *Инженерногеоложки и хидрогеоложки условия на хранилището за радиоактивни отпадъци в Лозенската планина (Нови хан)*. Отчетен доклад по договор № ПХРАО-2001-10, Фонд ГИ-БАН.
- Кожухаров, Д. и др. 2002. *Геоложко, хидрогеоложко и инженерногеоложко проучване на площадката на ПХРАО — Нови хан*. Отчетен доклад по договор № ПХРАО-2001-10, Фонд ГИ-БАН.
- Матеева, М. 2003. *Следексплоатационна оценка по безопасност на ПХРАО — Нови хан*. Отчет ПХРАО-ОБ-05, Фонд ИИЯЕ-БАН.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2000a. *“Radon” Type Facility Safety Case*. Working Document ISAM/SCWG/WD02, ISAM “Radon” Type Safety Case Working Group, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2000b. *Upgrading Safety of Near Surface Waste Disposal Facilities*. TC Project RER/9/057, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2001a. *Model Formulation, Implementation and Data for Safety Assessment of Near Surface Disposal Facilities*. IAEA Working Document, ISAM/MDWG/WD01, Version 0.4, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2001b. *Vault Safety Case*. IAEA Working Material, ISAM/SCWG/WD01, Version 1.3, Vienna.
- Kozak, M. 1999. *Preliminary Safety Assessment of Nuclear Surface Repository for Radioactive Waste in Moldova*. IAEA Report.
- Van Blerk, J., J. Vivier, I. Steyn. 2001. *Post-Closure Safety Assessment of Vaalputs for the Disposal of Koeberg LILW*. GEA-1476/NWS-RPT-01/001.

(Постъпила на 26.05.2003 г., приета за печат на 13.10.2004 г.)