

ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВЪЗМОЖНАТА МИГРАЦИЯ НА РАДИОНУКЛИДИ ПРЕЗ ЛЪСОВИЯ КОМПЛЕКС В РАЙОНА НА АЕЦ "КОЗЛОДУЙ"

Николай Т. Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; nts@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Посредством математически миграционни модели е прогнозирана възможната миграция на радионуклиди през лъсовия комплекс в района на АЕЦ "Козлодуй". Симулирани са условията за движението на изотопите ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni , и ^{241}Am в неводонаситената зона (зоната на аерация). Използвана е схемата на конвективно-дифузионен пренос на вещество с отчитане на съпътстващите процеси сорбция, дисперсия, радиоактивен разпад и смесване. На основата на получените количествени прогнозни решения е направено хидрогеоекологично заключение относно пригодността на лъсовия комплекс за изграждане на хранилище за радиоактивни отпадъци.

PROGNOSTICATION OF MASS-TRANSPORT OF RADIONUCLIDES IN THE LOESS COMPLEX IN THE REGION OF NPS "KOZLODUI"

Nikolay T. Stoyanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; nts@mgu.bg

ABSTRACT. Mathematical models are developed in order to prognosticate the mass-transport of radionuclides in the loess complex in the region of NPS "Kozlodui". The conditions for mass transport of the isotopes of ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni , and ^{241}Am in the unsaturated zone (zone of aeration) are simulated. The applied scheme of convective and diffusive mass transport takes into account the concomitant processes of sorption, dispersion, radioactive decay, and mixing. The obtained quantitative prognostication solutions served as a base for the elaborated hydrogeological conclusion about the suitability of the loess complex for building a new disposal facility for storage of radioactive waste.

Въведение

През последните няколко десетилетия голям брой организации и авторски колективи са провеждали и до момента изпълняват многобройни и различни по вид изследвания за изясняване на геоложките, инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия в района на АЕЦ "Козлодуй" (Гълъбов и др. 1992, 2003; Евстатиев и др. 2004; Карастанев и др. 2007а, 2007б; и др.). Анализът на събраната до момента информация показва, че установеният в горната част на геоложкия разрез лъсов комплекс е с доста голяма дебелина, слаба пропускливост и сравнително добра задържаща способност. Наред с тези констатации за отсъствие на благоприятни условия за пренос на вещество през зоната на аерация, липсват достатъчно доказателства за неговата естествена защита.

Основна задача на настоящата разработка е да се направи по-прецизна оценка на задържащата способност на лъсовия комплекс по отношение на различни радионуклиди. За целта са съставени числови двумерни (2D) модели, с които е симулирано поведението на изотопите ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni , и ^{241}Am . На тази база е направена и прогноза за възможната им миграция в геоложката основа на отредената в близост до централата площадка за временно хранилище на радиоактивни отпадъци (ХРАО). При разработването на числовите модели са използвани всички налични данни от предишни

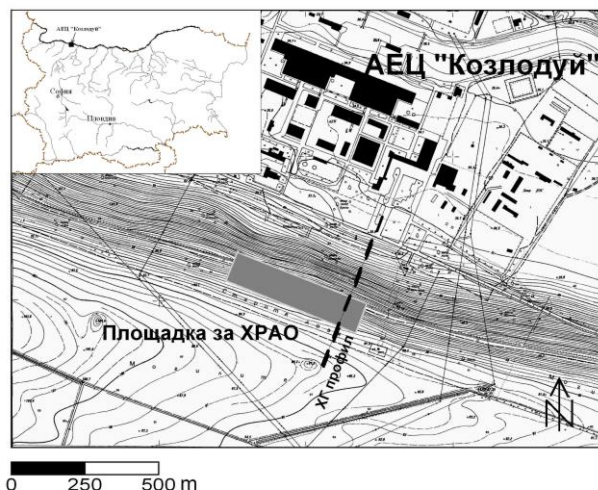
геоложки, хидрогеоложки и миграционни изследвания в района на АЕЦ Козлодуй.

Резултатите от проведените моделни изследвания позволяват да се даде по-категорично хидрогеоекологично заключение относно пригодността на лъсовия комплекс за изграждане на хранилище за радиоактивни отпадъци.

Хидрогеоложки условия

Основен обект на изследване е лъсовият комплекс в района на АЕЦ Козлодуй. Точното местоположение на обекта е представено на фиг. 1.

Геоложният строеж в района на площадката за ХРАО е относително прост. По данни от проведените от Геологическия институт на БАН детайлни проучвания (Карастанев и др. 2007а, 2007б; и др.) в разреза се разграничават два основни геоложки комплекса: кватернерен и плиоценски. Кватернерният комплекс се състои от лъсови материали (лъс и лъсовидни глини) и стари алувиални тераси (глини, пясъци и чакъли с глинесто-песъчлив запълнител). Плиоценският комплекс е представен от наслагите на Брусарската свита (прахови глини с прослойки от фини пясъци).



Фиг. 1. Местоположение на обекта

Таблица 1

Физични и хидродинамични характеристики на слоевете

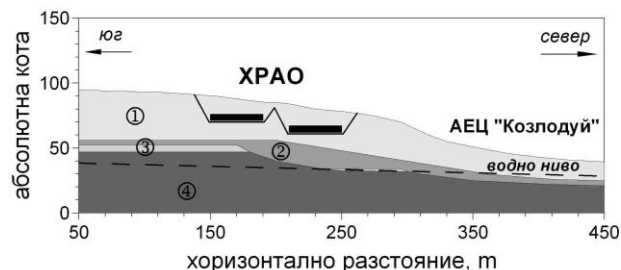
Слой №	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4
Дебелина от- до- , m	10 - 35	4 - 16	1 - 5	> 40
Обемна плътност, g/cm ³	1.50	1.65	2.10	2.00
Коефициент на филтрация, m/d	1.10	0.25	3.50	0.005

Таблица 2

Миграционни характеристики на слоевете

Радионуклид	Коеф. на разпадане γ , d ⁻¹	Коефициент на разпределение K_d , cm ³ /g			
		Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4
⁶⁰ Co	3.60x10 ⁻⁴	180	420	212	223
⁹⁰ Sr	6.64x10 ⁻⁵	138	315	53	148
¹³⁷ Cs	6.29x10 ⁻⁵	298	825	346	424
⁶³ Ni	1.90x10 ⁻⁵	350	650	400	650
²⁴¹ Am	4.39x10 ⁻⁶	5000	10000	10000	30000

Геометрията и пространствените граници на така детерминирани слоеве са илюстрирани на съставения хидрогеоложки профил (вж. фиг. 2). В табл. 1 са представени данни за тяхната дебелина, обемна плътност и пропускливост (коефициент на филтрация), а в табл. 2 са дадени осреднени стойности за миграционните им характеристики по отношение на различни радионуклиди – ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁶³Ni и ²⁴¹Am.



УСЛОВНИ ОЗНАЧЕНИЯ

- ① - Лъос
- ② - Лъосовидна глина
- ③ - Песъчлива глина и глинест пясък
- ④ - Глина и прахова глина с пясъчни прослойки
- - Стоманобетонни хранилищни камери
- - Ниво на подземните води

Фиг. 2. Хидрогеоложки разрез в района на площадката за ХРАО

Въз основа на прецизен анализ и интерпретация на събраната архивна информация в обхвата на площадката и прилежащите ѝ територии се отделят четири нискорангови единици: слой 1 – лъос (Q_p^{2-3}); слой 2 – лъосовидна глина (Q_p^{2-3}); слой 3 – песъчлива глина и глинест пясък (Q_p^{2-3}); слой 4 – прахови глини с пясъчни прослойки (N_2). Техните пространствени граници, хидродинамични и миграционни характеристики са определени по данни на Гълъбов и др. (1992; 2003), Евстатиев и др. (2004) и Карастанев и др. (2007а; 2007б).

В масива е формиран подземен поток с генерално направление от юг на север. Във високите части на склона кватернерният комплекс е практически неводоносен. Водното ниво е разположено в плиоценските глини на дълбочина около 45-50 m под терена или на 30-35 m под дъното на бъдещото ХРАО. На север водното ниво постепенно става по-плитко и преминава в долната част на лъосовия комплекс. Напорният градиент е сравнително висок – около 0.028. Подземният поток от масива се дренира на север в еднолъосовата незаливна тераса, върху която е разположена централата.

Основното подхранване на подземните води е от инфилтрация на падналите валежи. При конкретните условия около 10-11% от средната сума на годишния валеж или приблизително 60 mm/a се инфилтрира в дълбочина.

Методика на изследването

Теоретични бележки за преноса на вещество в неводонаситена среда

В неводонаситената зона, респ. в т. нар. зона на аерация преносът на вещество се реализира посредством процесите на дифузия и конвекция. Дифузионният пренос има място независимо от наличието на вертикален поток (инфилтрация) през тази зона. Конвективният пренос, обаче, предполага наличие на инфилтрация на вода от

повърхността към нивото на подземните води, с която се пренасят и различни замърсители. В конкретния случай, миграцията на радионуклиди се разглежда по общия модел на един дифузионно-конвективен пренос.

Влагопренасяне (инфилтрацията) в неводонаситената зона се описва от сложни нелинейни диференциални уравнения (Richards, 1931; Philip, 1958; Haverkamp et al., 1977; и др.), изискващи числено решаване. Най-често основното уравнение се записва във вида:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[k^* (\theta) \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

където: θ - обемна влажност (водното съдържание), $k^*(\theta)$ - коефициент на влагопроводност, $h(\theta)$ - всмукващ потенциал, z - дълбочина, t - време.

Комбинирането на уравнение (1) с миграционните уравнения прави задачата изключително сложна. При нейното решаване в практиката най-често се използват сравнително прости аналитични методи. Тези методи обикновено разглеждат частните случаи, при които е налице само дифузионен пренос, или конвективен пренос без дисперсия. За изготвянето на по-точни прогнозни решения правилният и ефективен подход изисква използването на софтуерни продукти, които разглеждат едновременно и двете форми на масопренасяне (конвективна и дифузионна), като се отчитат и основните взаимодействия на мигриращите компоненти с геоложката среда. Този подход именно е приложен тук, като е използван един от съвременните програмни продукти за прогнозиране разпространението на "замърсители" в зоната на аерация.

Математическите модели на условията за движение на радионуклиди в неводонаситената зона включват решаване на две задачи: филтрационна и миграционна. Филтрационната задача засяга преноса на вода през ненаситената среда, а миграционната - преноса на вещество. За решаването на първата задача е важно добро познаване на физичните и филтрационни свойства на средата (обемна плътност ρ , естествена влажност θ , коефициент на филтрация k), както и на зависимостта между коефициента на влагопроводност и влажността: $k^* = f(\theta)$ и на зависимостта между всмукващия потенциал и влажността: $\psi = f(\theta)$. Втората задача изисква познаване на основните миграционни параметри коефициент на разпределение K_d , коефициент на хидродисперсия D и коефициент на разпадане λ .

Инструменти на математическото моделиране

Математическото моделиране е изпълнено с помощта на компютърната програма VS2DI (Variably Saturated 2D Interface). Тя е разработена от Геоложката служба на САЩ (USGS) - Healy, 1990; Hsieh et al., 2000; Lappala et al., 1987; и др.

Алгоритъмът на програмата използва числов модел по крайни разлики за съвместно решаване на уравненията на влагопренасянето и масопреноса. Зависимостите $k^* = f(\theta)$ и $\psi = f(\theta)$ се моделират с функциите предложени от van

Genuchten (1980), Brooks and Corey (1964) и Haverkamp et al. (1977). Процесите за описване на масопреноса включват конвективния пренос, дисперсията (дифузия и механична дисперсия), обратното елиминирание (адсорбция) и необратимото елиминирание (радиоактивен разпад).

Математически модели за прогнозиране на миграцията на радионуклиди

Концептуален модел

При математическото моделиране на миграцията на радионуклиди през зоната на аерация са приети следните по-важни предпоставки:

- Радионуклидите започват да навлизат под дъното на ХРАО 100 години след неговото изграждане. Тогава консервативният модел предполага, че бетоновите и други защитни съоръжения вече не могат да изпълняват своите функции.
- Постъпването на радионуклиди с експоненциално намаляваща активност в подповърхностното пространство е непрекъснато през целия експлоатационен период на ХРАО.
- Инфилтрационното подхранване е постоянно по цялата площ на площадката и е в размер на 60 mm/a = 0.000164 m/d.
- Прогнозният период е с продължителност 30000 г.
- Хидрогеоложките единици (слоеве) в разреза са хомогенни и се характеризират с постоянни физични, хидродинамични и миграционни параметри.
- Миграцията на радионуклиди се реализира по конвективно-дифузионната схема, с отчитане на сорбцията, дисперсията и радиоактивния разпад.
- Резултатите от прогнозните изчисления се дават като относителна активност, т.е. отношението на текущата активност на дадения радионуклид в произволен момент и произволна точка от зоната на аерация спрямо "входната" активност.

Композиране на математическия модел

При композирането на математическия модел са използвани програмния модул VS2DI и основните положения, представени в концептуалния модел. Моделът е двумерен. С него е симулирано поведението на радионуклидите ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni и ^{241}Am .

Моделната област обхваща разреза в дълбочина до кота 25 m (фиг. 3). Установените в тази част на разреза четири нискорангови хидрогеоложки единици са симулирани с четири моделни зони. Всяка моделна зона е зададена в граници и със свойства, отговарящи на реалните обекти и характеризиращи поведението на изброените по-горе радионуклиди (вж. табл. 1 и табл. 2).

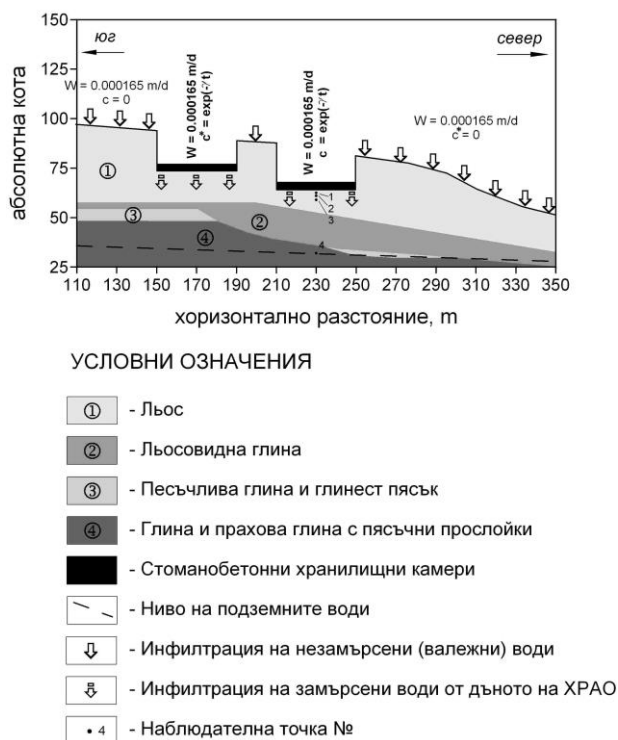
Границата между неводонаситената и водонаситената зона (нивото на подземните води) е дадена с пунктирна линия (фиг. 3).

Инфилтрационното подхранване от валежите е зададено като постоянна величина по цялата моделна площ със скорост на инфилтрация $W = 0.000164$ m/d. Валежните

води, постъпващи извън границите на хранилището, са чисти и за целия период на симулация е прието, че концентрация на радионуклиди в тях е $c = 0$. Прието е още, че относителната концентрация на радионуклиди c^* в постъпващите под дъното на депото течни емисии намалява експоненциално. За всеки стрес период тя се определя от зависимостта:

$$c^* = c / c_0 = \exp(-\gamma t) \quad (2)$$

където: c е концентрация в произволен момент и в произволна точка, c_0 е входната концентрация, γ – коефициент на елиминиране на изследвания радионуклид, t – времето. Началната входна относителна концентрация (при $t = 0$) е $c_0^* = 1$, т.е. относителните концентрации в пласта са в части от единицата.



Фиг. 3. Моделна област, моделни зони и гранични условия

При дискретизацията на моделната област е използвана равномерна ортогонална мрежа с размери на клетките 2.5×1.0 m. Прогнозният период е 30000 години.

Прогнозни решения

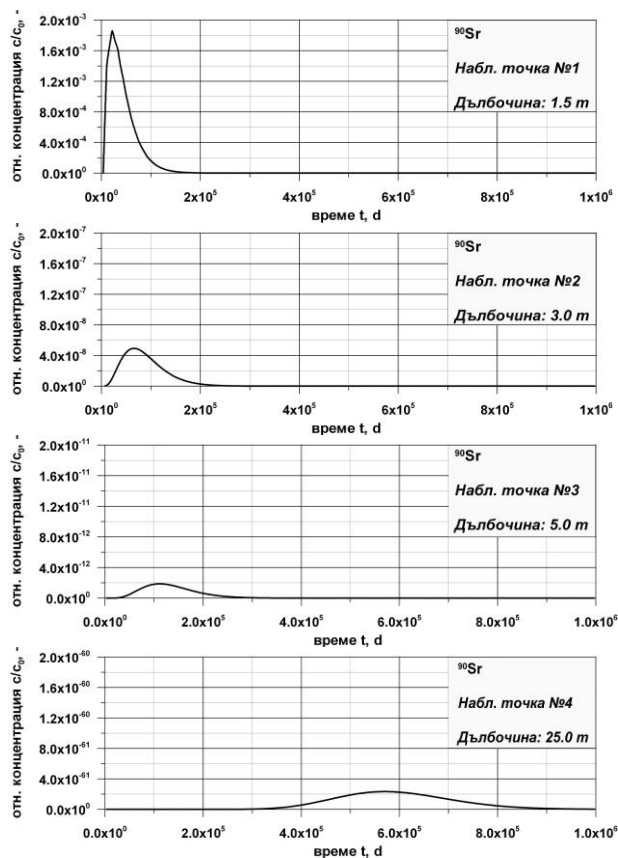
С разработения математически модел е направена прогноза за относителните концентрации на ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni и ^{241}Am в четири наблюдателни точки на дълбочина 1.5 m, 3.0 m, 5.0 m и 25.0 m под дъното на ХРАО (вж. фиг. 3).

Получените прогнозни решения са илюстрирани на фиг. 4-8, а в табл. 3 са представени изчислените максимални относителни активности в четирите наблюдателни точки под дъното на ХРАО и времената, за които те са достигнати.

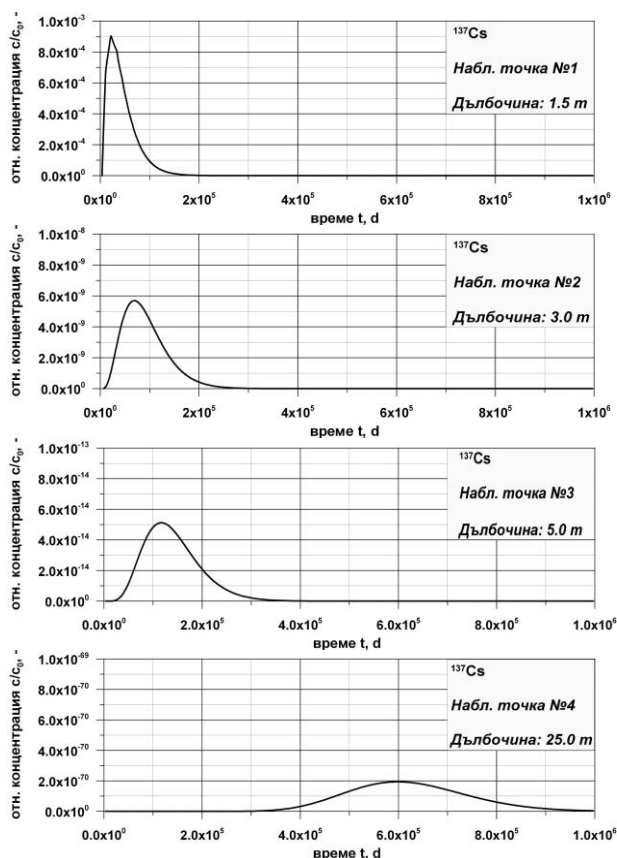
Таблица 3

Резултати от моделните изследвания

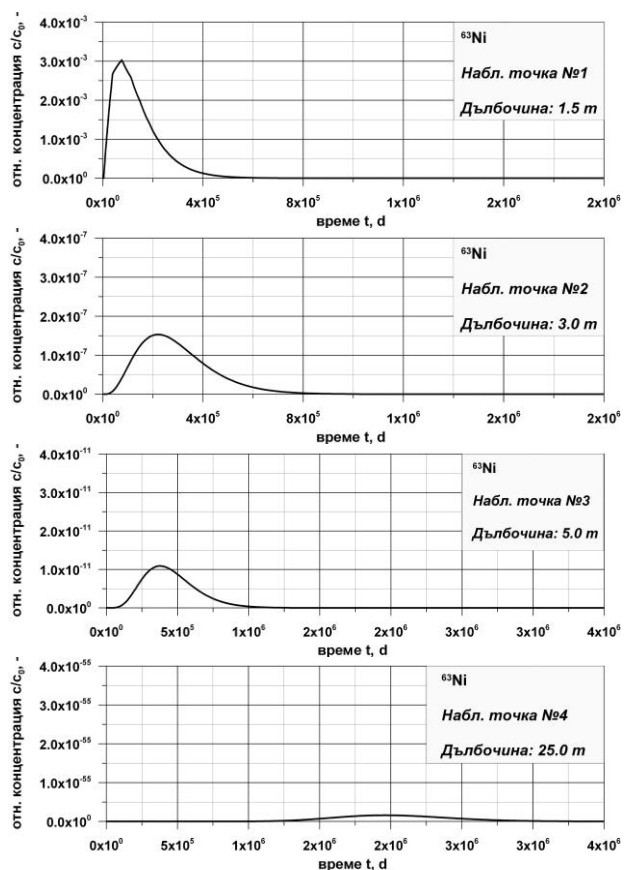
Радионуклид	Набл. точка №	Дълбочина, m	Максимална относителна концентрация	
			Време, години	Относителна концентрация
^{90}Sr	1	1.5	50	1.86×10^{-3}
	2	3.0	170	4.94×10^{-8}
	3	5.0	300	1.90×10^{-12}
	4	25.0	1610	3.00×10^{-61}
^{137}Cs	1	1.5	50	9.11×10^{-4}
	2	3.0	190	5.80×10^{-9}
	3	5.0	320	5.13×10^{-14}
	4	25.0	1630	1.94×10^{-70}
^{60}Co	1	1.5	11	3.10×10^{-4}
	2	3.0	33	1.65×10^{-10}
	3	5.0	68	1.11×10^{-16}
	4	25.0	1744	1.35×10^{-68}
^{63}Ni	1	1.5	200	3.00×10^{-3}
	2	3.0	600	1.53×10^{-7}
	3	5.0	1020	1.09×10^{-11}
	4	25.0	5360	1.60×10^{-56}
^{241}Am	1	1.5	850	9.09×10^{-4}
	2	3.0	2580	4.22×10^{-9}
	3	5.0	4450	2.77×10^{-14}
	4	25.0	23170	5.89×10^{-70}



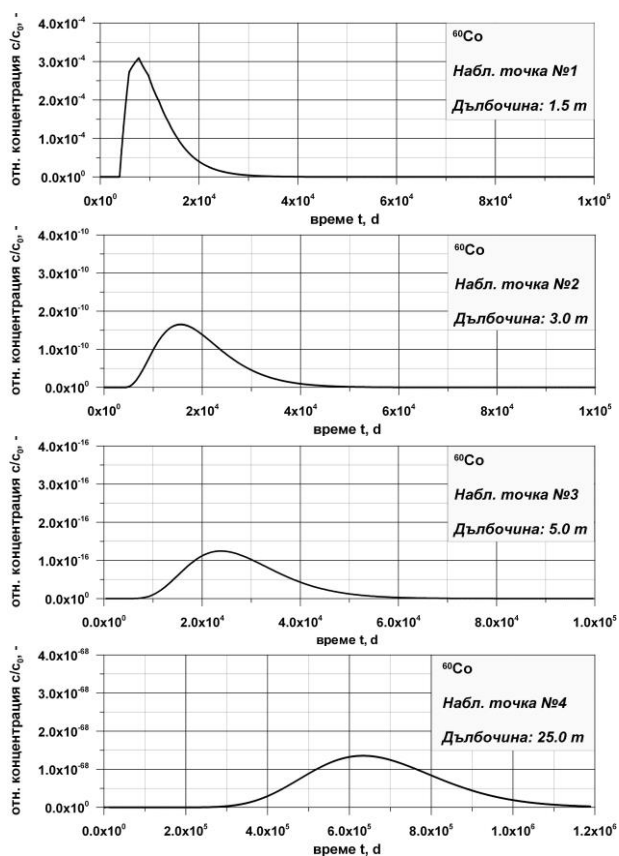
Фиг. 4. Прогнозни решения за миграцията на ^{90}Sr



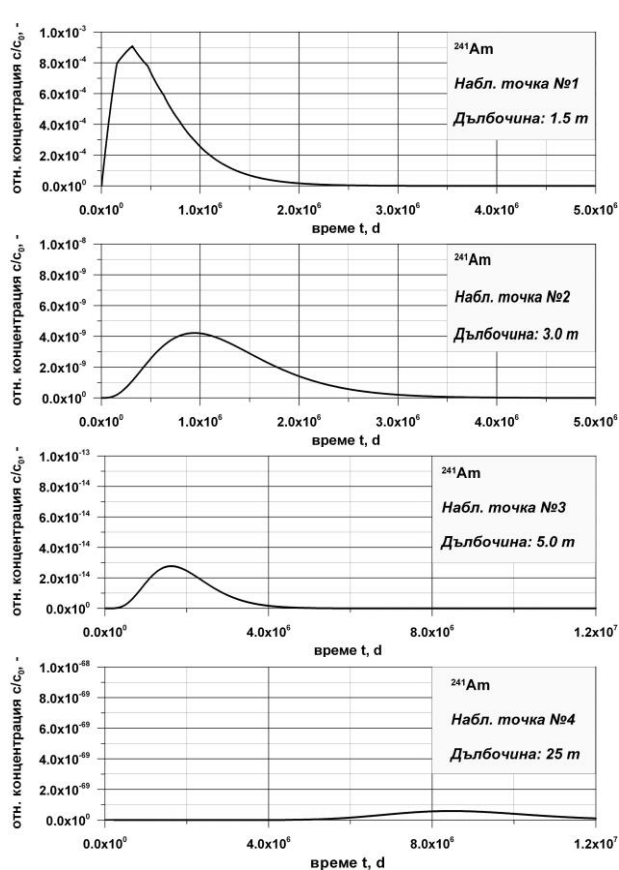
Фиг. 5. Прогнозни решения за миграцията на ^{137}Cs



Фиг. 7. Прогнозни решения за миграцията на ^{63}Ni



Фиг. 6. Прогнозни решения за миграцията на ^{60}Co



Фиг. 8. Прогнозни решения за миграцията на ^{241}Am

Заклучение

Получените с математическия модел прогнозни решения показват, че всички изследвани радионуклиди (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{63}Ni и ^{241}Am) имат много ограничени възможности за разпространение в неводонаситения льосов комплекс. Те ще намаляват своята активност до практически нищожни равнища в резултат на комплексното действие главно на процесите на естествен разпад и на сорбция (задържане) в земната основа. Относителната им активност на дълбочина 25 m, т.е. малко над нивото на подземните води, ще е изключително ниска – между 10^{-56} и 10^{-70} .

Льосовият комплекс в района на АЕЦ “Козлодуй” притежава много висока задържаща способност и представлява надеждна бариера, ограничаваща разпространението на радионуклиди в подповърхностното пространство.

Литература

- Гълъбов, М. и др. 1992. *Изясняване на дисперсионните характеристики на почвената и водната среда в района на площадката на АЕЦ “Козлодуй” с цел анализиране на възможните пътища за миграция на радионуклиди от АЕЦ в почвата и атмосферата*. Доклад на “Акватер”.
- Гълъбов, М. и др. 2003. *Хидрогеоложки и миграционни изследвания на площадката за хранилище на НСРАО от АЕЦ Козлодуй в местността “Маричин валог”*. Доклад на “Акватер”.
- Евстатиев, Д. и др. 2004. *Проучвателни работи във връзка с “Реконструкция на хранилище за РАО в могилен за твърди РАО”*. Доклад на ГИ БАН.
- Карастанев, Д. и др. 2007а. *Опитно-методични изследвания с цел верифициране на методи и методики за проучване и доказване приемливостта на площадки за изграждане на хранилище за НСРАО*. Доклад на ГИ БАН.

- Карастанев, Д. и др. 2007б. *Характеризиране на площадка №4*. Доклад на ГИ БАН.
- Пашковский, И. С. 1973. *Методы определения инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации*. М., Изд. МГУ.
- Brooks, R. H., A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. – In: *Fort Collins, Colorado State University Hydrology Paper 3*, 27 p.
- Haverkamp, R., M. Vaudin, J. Tovina, P. J. Wierenga, G. Vachaud. 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. – *Soil Science Society of America Proceedings*, 41, 285-294.
- Healy, R. W. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the u.s. geological survey's computer program VS2D. In: *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 90-4025, Denver, Colorado*, 125 p.
- Hsieh, P. A., W. Wingle, R. W. Healy. 2000. *VS2DI – A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99-4130, Lakewood, Co.
- Lappala, E. G., R. W. Healy, E. P. Weeks. 1987. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. – In: *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 83-4099, Denver, Colorado*, 184 p.
- Philip, J. R. 1958. Theory of infiltration. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 83, 5-6, 1957; 84, 2-3-4.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. – *Physics*, 1.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – *Soil Science Society of America Proceedings*, 44, 5, 892-898.

Препоръчана за публикуване от
Катедра “Хидрогеология и инженерна геология”, ГПФ