

МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА РИСКА ОТ ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ГЕОЛОЖКАТА ОСНОВА И ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ ОТ ПРОЕКТИРАНОТО НАЦИОНАЛНО ХРАНИЛИЩЕ ЗА РАДИОАКТИВНИ ОТПАДЪЦИ КРАЙ АЕЦ "КОЗЛОДУЙ"

Николай Т. Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Детерминирани са пространствените граници и количествените характеристики на основните компоненти от потенциалната среда за миграция на замърсителите в района на проектираното национално хранилище за радиоактивни отпадъци край АЕЦ "Козлодуй". Дефинирани са представителните за изследването „ключови“ радионуклиди от състава на подлежащите за депониране отпадъци. Разработен е числов 2D модел за прогнозиране на възможната миграция през инженерните бариери и зоната на аерация. Посредством различни варианти на модела е направена дългосрочна прогноза за поведението на изотопите ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{94}Nb , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{129}I и ^{14}C , като са определени границите и степента на замърсяване на геологката основа, транзитното време и активността на съответния изотоп при евентуалното му достигане до нивото на подземните води. Съставен е и числов 3D модел, с който е прогнозирано пространственото разпространение на мигриралите във водонаситената зона радионуклиди, времето за достигане и активностите им в най-близкия повърхностен приемник на замърсители. В числовите модели е използвана схемата на конвективно-дифузионен пренос на вещества с отчитане на съществуващите процеси сорбция, дисперсия, радиоактивен разпад и смесване.

MODEL STUDIES ESTIMATING THE RISK OF A POSSIBLE POLLUTION IN THE GEOLOGICAL BASIS AND GROUNDWATER CAUSED BY THE DESIGNED NATIONAL DISPOSAL FACILITY FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE IN THE AREA OF NPS "KOZLODUI"

Nikolay T. Stoyanov

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

ABSTRACT. The spatial boundaries and the quantitative characteristics of the basic components of the potential pollutant transport media are determined for the area of the designed national disposal facility for storage of radioactive waste near NPS "Kozlodui". From the radionuclides that will be disposed are defined those that are regarded as key factor in the performed study. A numerical 2D model is developed in order to prognosticate a possible migration through the engineered barriers and the unsaturated zone. Applying different variants of the model, a long-term prognosis for the behavior of the isotopes of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{94}Nb , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{129}I , and ^{14}C is performed. The boundaries and the degree of pollution of the geological basis are determined, as well as the transit time and the activity of each peculiar in the case it eventually reaches the groundwater level. A numerical 3D model is also developed and is applied for prognostication of the spatial distribution of the migrated into the water-saturated zone radionuclides, their arrival time and activity in the closest surface recipient of pollutants. In the numerical models is applied the scheme of convection-diffusion mass transport, taking into consideration the concomitant processes of sorption, dispersion, radioactive decay, and mixing.

Въведение

Бъдещото на ядрената енергетика у нас е все по-тясно свързано с проблема за безопасното съхранение на отпадъчните продукти. През последните две десетилетия в тази посока са работили много организации и фирми. Основните изследвания са насочени към намирането на подходяща площадка за изграждане на Национално хранилище за радиоактивни отпадъци (НХРАО). Резултатите от тези проучвания показват, че природните дадености в района на АЕЦ "Козлодуй" са доста благоприятни за такъв тип обекти (Гъльбов и др., 1992, 2003; Каракстанев и др., 2007; Стоянов, 2009; Стойнев и др., 2009; и други).

Главна цел на моделните изследвания е да се направи количествена оценка на възможностите за миграция на радионуклиди от проектираното НХРАО през инженерните бариери и геологката основа и да се оцени риска от замърсяване на подпочвеното пространство, подземните води и близкоразположените реки и канали.

Моделите са разработени след анализ на резултатите от досегашните изследвания в района (геологки, сондажни, хидрогеологки, инженерногеологки, геофизични и др.), извършени от ГИ на БАН, МГУ "Св. Иван Рилски", други фирми и предприятия. Използвани са технологични схеми от идеенния проект за хранилище за ниско- и средно активни радиоактивни отпадъци (FAR, Europeaid/122568/D/SV/BG, 2008).

Обща информация за изследвания обект

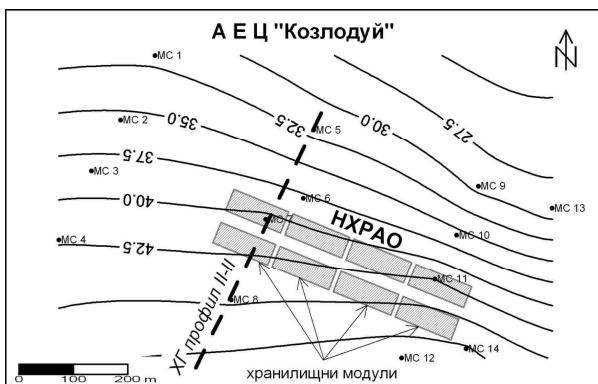
Площадката с потенциал за изграждане на ХРАО се намира в непосредствена близост до АЕЦ "Козлодуй", на стръмен склон между старото и новото шосе от с. Хърлец за гр. Козлодуй. Тя е в охраняваната зона на Централата.



Фиг. 1. Местоположение на площадката

Концептуална схема на ХРАО. Инженерни бариери

Предвижда се хранилището да бъде "траншеен" тип с 8 хранилищни модула, чието разположение е представено на фиг. 2. Техническите параметри и технологията за неговото изграждане са подробно описани в проекта на Worley Parsons и Risk Engineering Ltd (2008).



Фиг. 2. Хидродинамична карта в района на хранилищните модули



Фиг. 3. Вертикален разрез на хранилищните модули

Траншейният тип хранилища реализират идеята за дълбоко ешелонирана многобариерна защита, включваща следните инженерни бариери:

- първа бариера – стоманобетонен контейнер (СтБК) и циментовата матрица, в която е включен РАО;

- втора бариера – стени на хранилищните секции и запълващия материал около СтБК;
- трета бариера – външна циментопочвена обшивка и многослойна защитна покривка (насип);
- четвърта бариера – подложен бетон и стоманобетонен фундамент на хранилищните камери;
- пета бариера – циментовопочвена възглавница.

Допълнителна бариера е дренажната система под хранилищните камери. Важно ограничение за миграцията в дълбочина е и т.нар. естествена бариера, включваща геологичните формации, в които е фундирано хранилището.

Ключови радионуклиди

В математическите модели е невъзможно и не е нужно да бъдат обхванати всички радионуклиди от общия състав на кондиционираните радиоактивни отпадъци на АЕЦ. В настоящето изследване са избрани осем "ключови" изотопа (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{94}Nb , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{129}I и ^{14}C), които дават цялостна представа за възможното разпространение на погребаните проектирани хранилище радионуклиди в подповърхностното пространство и подземните води. Основанията за техния избор са следните:

- ^{137}Cs и ^{90}Sr са основните съставки на отпадъка, които по традиция "задължително" присъстват в прогнозите.
- ^{129}I и ^{14}C са между най-подвижните радионуклиди поради дългия им живот и твърде слабата им сорбируемост (задържане) в геологичната среда.
- ^{241}Am , ^{94}Nb и ^{239}Pu са също дългоживеещи, но се отличават със силна сорбируемост в почвите, така че те предполагат едно продължително, но много бавно разпространение в подповърхностното пространство.
- ^{94}Nb заема междинно положение от гледна точка на дълговечност и сорбируемост в природните материали. Той, както ^{137}Cs и ^{90}Sr , представя "средното поведение" на изотопите от хранилището.

Компоненти на миграционното поле

Изследванията обхващат основните компоненти (части) на миграционното поле, респ. на пространството, в което е възможно да мигрират радионуклидите от хранилището:

- инженерните защитни бариери при хранилището;
- ненаселената зона от дъното на хранилището до нивото на подземните води (зоната на аерация);
- водоносната зона (водоносния пласт).

Характеристика на миграционното поле

Схематизация и характеристики на естественото поле

В план естественото поле обхваща района до най-близкия потенциален приемник на замърсители – Главния дренажен канал, маркиращ северната граница на АЕЦ. Геологият строеж включва два основни комплекса:

- кватернерен комплекс, състоящ се от лъсови материали (лъс и лъсовидни глини), стари алувиални тераси (глини, пясъци и чакъли) и първа незаливна тераса на р. Дунав (чакъли и пясъци);
- неогенски комплекс, представен в горната си част от наслагите на Брусарската свита (основно глини и прахови глини с пясъчни прослойки), а в долната – от седименти на Арчарската свита (основно пясъци).

В двета комплекса се отделят седем нискорангови хидрогеоложки единици (слоя): пет в кватернерния и два в неогенския комплекс. Отгоре надолу слоевете се

разполагат в следния ред: 1. Прахов лъос; 2. Погребана почва и лъсовидна глина; 3. Песъчлива глина с чакъл от алувиалните тераси; 4. Чакълеста глина от старите тераси; 5. Чакъл с песъчлив запълнител от първата тераса на р. Дунав; 6. Прахова глина с песъчливи прослойки – Бруска свита; 7. Дребен пясък – Арчарска свита. Допълнително слой 6 е поделен на три подслоя – 6.а Песъчлива глина; 6.б Пясък; и 6.в Прахова глина. Пространствените граници, средната дебелина h_{cp} , обемната плътност ρ , коефициентът на филтрация k и коефициентът на разпределение K_d на всеки слой са определени по данни от специализираните изследвания в района (Гъльбов и др., 1992; Каастанев и др., 2007; Стойнев и др., 2009; и др.). Надлъжната дисперсивност a_L и коефициента на дифузия D_m са приети по литературни данни за подобен тип среда (Adams, Gelhar, 1992; Gelhar et al., 1992; и др.). В табл. 1 са представени данни за h_{cp} , ρ , k , a_L и D_m за всеки слой, а в табл. 2 – стойностите на коефициента на разпределение K_d на слоевете спрямо всеки от "ключовите" радионуклиди.

Таблица 1. Хидрогеоложки характеристики на слоевете

Слой №	h_{cp} , м	ρ , g/cm^3	k , m/d	a_L , м	D_m , m^2/d
1	10-35	1450	0.7	0.005	1.5×10^{-4}
2	4-16	1540	0.02	0.002	1.5×10^{-4}
3	1-5	1750	0.25	0.003	1.2×10^{-4}
4	1-3	1850	5.0	0.025	1.0×10^{-4}
5	6-9	2050	20.0	0.03	1.0×10^{-4}
6.а		1700	0.1	0.02	2.0×10^{-4}
6.б	> 40	1730	3.0	0.05	1.0×10^{-4}
6.в		1700	0.001	0.01	2.5×10^{-4}
7	1-8	1730	3.0	0.05	1.0×10^{-4}

Таблица 2. Коефициент на разпределение K_d^* , m^3/kg

Изотоп	Слой №						
	1	2	3	4	5	6	7
^{137}Cs	0.20	0.25	0.23	0.14	-	0.40	0.10
^{90}Sr	0.07	0.12	0.14	0.075	-	0.20	0.04
^{63}Ni	0.30	0.65	0.65	0.40	-	0.65	0.30
^{241}Am	10.0	20.0	20.0	20.0	-	30.0	8.0
^{129}I	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001
^{14}C	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.005	0.001
^{94}Nb	0.16	0.55	0.55	0.16	-	0.55	0.16
^{239}Pu	0.11	0.21	0.16	0.15	-	0.56	0.10

Забележка: За слой 5 са представени данни само за ^{129}I и ^{14}C , тъй като те единствено преминават в този слой.

Подземните води в района на площадката са на дълбочина 30-45 м. Зоната на аерация заема голяма част от кватернерния комплекс (без чакълите в първата тераса) и част на неогенския комплекс. Предвид проектната дълбочина на фундирани, дебелина на зоната на аерация под ХРАО е над 20 м. Водонаситената зона включва неогенския комплекс и част от кватернера. Генералната посока на формирания в района на площадката подземен поток е от юг на север, а градиентът е 0.025 (фиг. 2).

Схематизация и характеристики на защитните бариери
Детайлната оценка на защитната роля на всяка инженерна бариера е трудна и нерядко водеща до неоправдано рисковани прогнози задача. В случая е възприет един по-консервативен подход за схематизиране на бариерите:

- Защитната роля на първите три бариери се отчита интегрално с редукция на началната активност на съответния изотоп. Тя е изчислена с отчитане на

адсорбиращия ефект на циментовата матрица, запълнителя около СтБК и циментопочвената обивка.

- В моделите четвъртата и петата бариера се включват като пластове с реални размери и със съответните филтрационни и миграционни характеристики. Стоманобетонният фундамент е зададен като пласт с дебелина 1 м, а циментопочвената основа като лежащ под него пласт с дебелина 4 м. След периода на "институционален надзор" (300 г.), с оглед на досегашния чужд опит се приема, че инженерните бариери деградират и техните характеристики са съизмерими с тези на въместващата геологичка среда (в случая лъсовово-глинестия комплекс).

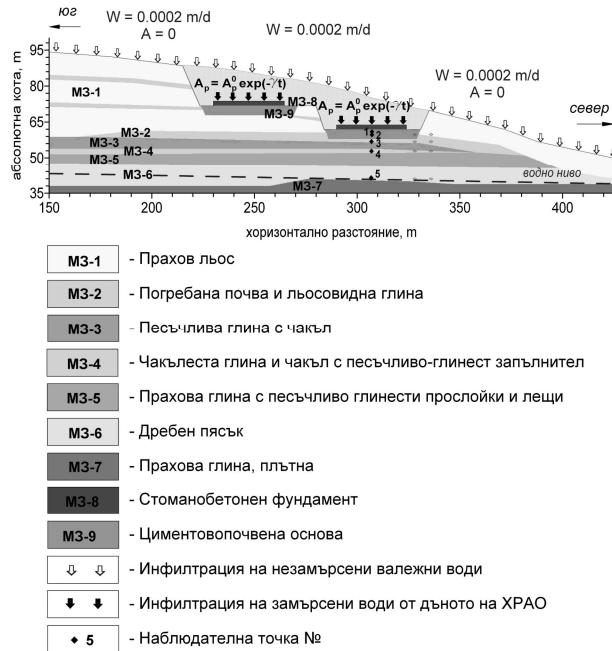
Методика на моделните изследвания

При моделните изследвания е приет следния най-общ методически подход:

- Миграцията на радионуклиди през зоната на аерация и инженерните бариери се симулира с числов 2D модел, а разпространението им в подземните води – с числов 3D модел. Двумерните решения се ползват като входни данни за 3D модела.
- В числовите модели миграционните процеси се реализират по схемата на конвективния масопренос, съпроводен от сорбция (обратимо елиминиране), радиоактивен разпад, хидродисперсия и разреждане.
- Геологкийят строеж се пресъздава с характеристиките на всяка литоложка разновидност: геометрични (релеф на границите, h_{cp}), физични (ρ , n), филтрационни (k) и миграционни (K_d , a_L и D_m). В зоната на аерация се задават специфичните за нея параметри: влажност θ , влагопроводност K^* и всмукващ потенциал ψ .
- Инфильтрационният поток под хранилищните модули и извън техните граници е 71 mm/a. Определен е по корелационна зависимост, отчитаща климатичните, почвените и техногенните условия (Bredencamp, 1990).
- Моделираните процеси се развиват след изтичане на периода на "институционален надзор" (300 г.), когато се предполага, че инженерните бариери ще деградират и тяхната водопропускливост и сорбционни свойства ще са съизмерими с тези на лъсовия комплекс.
- В табл. 3 са представени използваните като входни данни характеристики на изследваните радионуклиди: очакваната обща активност в хранилището А, начална активност на източника A_0 , коефициент на разпределение K_d и фактор на забавяне R за използванятия в инженерните бариери бетон.
- Зададената в модела начална активност интегрално отчита защитната роля на първите три инженерни бариери. Дадените в табл. 3 стойности на K_d са приети след обобщаване на голям брой лабораторни анализи на сорбционната способност на бетона (Mallants et al., 2001; Каастанев и др., 2007; Seit et al., 2009; и др.). Стойностите на R се изчисляват при плътност на бетона в източника $\rho_d = 2200 kg/m^3$ и при условие, че активната порестост на бетона е равна на общата му порестост ($n_0 = n = 0.16$), което е по-консервативния подход.
- Радиоактивният разпад в хранилищните клетки се отчита като по тяхното дълно се симулира непрекъснат приток на радионуклиди с експоненциално намаляваща активност.

Таблица 3. Основни параметри на ключовите радионуклиди

изотоп	A, Bq	γ, d^{-1}	$K_d, \text{m}^3/\text{kg}$	R	$A_{p0}, \text{Bq}/\text{m}^3$
^{137}Cs	1.4×10^{14}	6.3×10^{-5}	3.0×10^{-3}	42	1.5×10^8
^{90}Sr	3.4×10^{11}	6.6×10^{-5}	1.8×10^{-3}	26	6.0×10^5
^{63}Ni	4.4×10^{12}	1.9×10^{-5}	1.2×10^{-1}	1692	1.2×10^5
^{241}Am	1.3×10^{10}	4.4×10^{-6}	6.4×10^0	88001	6.7×10^0
^{94}Nb	3.3×10^9	9.5×10^{-8}	3.5×10^{-2}	482	3.1×10^2
^{239}Pu	8.7×10^9	7.9×10^{-8}	4.3×10^0	59126	6.7×10^0
^{129}I	8.6×10^7	1.2×10^{-10}	6.4×10^{-2}	881	4.4×10^0
^{14}C	2.7×10^{12}	3.3×10^{-7}	10×10^0	137501	8.9×10^2



Фиг. 4. Математически 2D модел. Геометрия на моделните пластове и гранични условия

Модел на миграцията на радионуклиди през инженерните бариери и зоната на аерация

Композиране на двумерния (2D) модел

Основните положения и входни параметри при композирането на модела са:

- Моделът е съставен с програмния пакет за моделиране на среда с променлива водонаситеност VS2DTI (Lappala et al., 1987; Hsieh et al., 2000; и др.).
- С модела са симулирани условията за миграция на радионуклиди в хидрогеоложки разрез по профил II-II. Разрезът включва седем слоя (1, 2, 3, 4, 6.a, 6.b и 6.v) и две защитни бариери (стоманобетонен фундамент и циментово-почвена основа). Те са включени в модела с девет моделни зони. Моделни зони M3-1, M3-2, M3-3, M3-4, M3-5, M3-6 и M3-7 пресъздават слоеве 1, 2, 3, 4, 6.a, 6.b и 6.v, а M3-8 и M3-9 са моделирани стоманобетоновия фундамент и циментово-почвена основа.
- Всяка моделна зона е зададена в границите и с параметрите, отговарящи на реалните обекти и характеризиращи поведението на изброените по-горе радионуклиди. Характеристиките на първите седем моделни зони са дадени в табл. 2 и табл. 3. Моделни зони M3-8 и M3-9 са зададени с характеристиките на вместващите ги M3-1 и M3-2 (льосовия комплекс).

- Зависимостите $\psi = f(\theta)$ и $k^* = f(\theta)$ са моделирани с интегрираните в програмния пакет VS2DTI функции на van Genuchten, като зададените стойностите на техните параметри (RMC, α и β) корелират със съответния тип геологична среда.

- Инфильтрационният поток през хранилището и извън него е зададен с постоянна скорост $W = 2 \times 10^{-4} \text{ m/d}$.

С композирания 2D модел са съставени осем негови варианта, с които е прогнозирано поведението на всеки "ключов" радионуклид. В различните варианти е зададена активността на съответния изотоп в преминаващия под хранилищните камери инфильтрационен поток. Приетата в началото на моделната симулация стойност е равна на началната активност в източника A_{p0} . Прието е още, че активността A_p в постъпващите под дъното на ХРАО течни емисии намалява експоненциално във времето t . За всеки стрес период тя се определя от зависимостта:

$$A = A_{p0} \exp(-yt) \quad (1)$$

Резултати

В математическия 2D модел са избрани 5 наблюдателни точки от масива (фиг.4). Те са разположени на дълбочина 1, 2, 5, 10 и 21 м под дъното на хранилището (последната от тях е непосредствено над нивото на подземните води). Получените прогнозни решения за максималните активности A_{max} в наблюдалните точки и времената t_{max} , за които те са достигнати, са представени в табл. 4.

Изводи

Въз основа на получените резултати от 2D модела могат да се направят следните по-важни обобщения и изводи:

- Голяма част от "ключовите" изотопи (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni и ^{241}Am) в резултат на естествен разпад и сорбция намаляват своята активност до практически ниво нищожни стойности. На практика интензивно замърсената с тях зона се ограничава до дълбочина 3-4 м под дъното на хранилището, т.е. в обхвата на деградиралите бариери. Максималната активност до нивото на подземните води за ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{63}Ni е между 10^{-40} и 10^{-49} Bq/m^3 , а за ^{241}Am е 10^{-69} Bq/m^3 (табл. 5). На практика, в ненаситената зона тези изотопи се задържат и разпадат напълно, т.е. тяхното последващо разпространение не представлява интерес, а още по-малко някаква опасност.
- Малко по-различно е поведението на много бавно разпадащи се изотопи ^{94}Nb и ^{239}Pu . Замърсената с тях зона, макар и след един твърде дълъг период, обхваща пространството до дълбочина 5-6 м. Максималните активности в тази зона се достигат след десетки хиляди години. На по-голяма дълбочина през целия прогнозен период (100000 г.) активностите остават ниски без да достигат своя максимум. В края на прогнозния период активностите до нивото на подземните води ще са изключително ниски – от 10^{-9} до 10^{-12} Bq/m^3 , което прави прогнозните изчисления за разпространението на ^{94}Nb и ^{239}Pu във водонаситената зона напълно безпредметни.
- По-особени случаи са изотопите ^{129}I и ^{14}C . Първият е изключително стабилен (период на полуразпад 15.7 млн години), но в същото време почти не се задържа от филтрационната среда, което е една твърде неблагоприятна комбинация. Другият, независимо от по-ниския период на полуразпад, е също практически несорбируем. Максималните им активности на границата

между наситената и ненаситената зона, които се очаква да настъпят след 1410 г. за ^{129}I и след 6010 г. за ^{14}C , са почти същите като в хранилището. Поради това, само за тези два изотопа е направена по-долу прогноза за миграцията им в подземните води.

Таблица 4. Резултати от математическия 2D модел

точка №	d*, m	^{137}Cs		^{90}Sr		^{63}Ni	
		t _{max} , a	A _{max} , Bq/m ³	t _{max} , a	A _{max} , Bq/m ³	t _{max} , a	A _{max} , Bq/m ³
1	1	590	1×10^2	270	2×10^2	350	5×10^0
2	2	850	4×10^{-1}	430	2×10^0	540	4×10^{-2}
3	5	1020	2×10^{-8}	570	1×10^{-6}	890	1×10^{-8}
4	9	1210	2×10^{-18}	780	1×10^{-15}	1590	3×10^{-18}
5-свн	21	1940	9×10^{-47}	1430	2×10^{-40}	4110	9×10^{-45}
		^{241}Am		^{14}C		^{129}I	
1	1	1630	3×10^{-6}	3350	474	50	4.41
2	2	2590	3×10^{-9}	3680	460	110	4.41
3	5	5340	2×10^{-18}	4440	424	300	4.41
4	9	9140	2×10^{-32}	5110	391	560	4.41
5-свн	21	20130	3×10^{-69}	6010	289	1410	4.37
		^{94}Nb		^{239}Pu			
1	1	13980	1.6×10^2	29070	1.7×10^0		
2	2	24270	1.1×10^2	53530	8.0×10^1		
3	5	62950	2.8×10^1	100000	0.2×10^1		
4	9	100000	1.1×10^{-2}	100000	3.3×10^{-2}		
5-свн	21	100000	1.6×10^{-12}	100000	1.1×10^{-9}		

Забележка: *Дълбочините са мерени от дъното на хранилищния модул

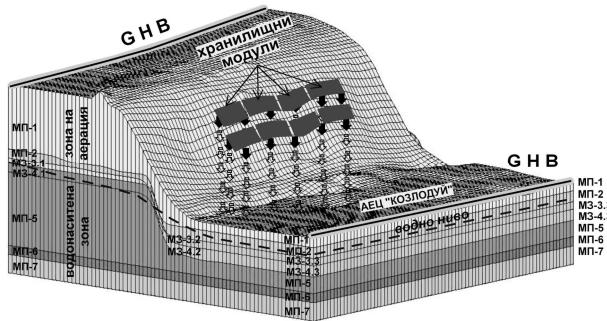
Модел на миграцията на радионуклиди във водоносната зона (водоносния пласт)

Прогнозата за възможна миграция на радионуклиди в подземните води е направена чрез 3D симулация на условията за пренос на вещества. Разработени са два основни модела – филтрационен и миграционен. С тях е прогнозирана миграцията на дълго живеещите и практически несорбируемите ^{129}I и ^{14}C .

Композиране на филтрационния 3D модел

Накратко, използваните техники и входни данни при композирането на филтрационния модел са:

- Разработен е с програма Modflow (Harbaugh et al., 2000).
- Моделът включва седем моделни пласта (МП) и шест моделни зони (МЗ) (вж. фиг. 5). С тях е пресъздаден геоложкият строеж като МП-1 моделира слой 1; МП-2 – слой 2; МП-5 – интегрално подслой 6.a и 6.b; МП-6 – подслой 6.v; МП-7 – слой 7 ; МЗ-3.1 – слой 4; МЗ-3.2 и МЗ-4.2 – части от слой 2; МЗ-3.3 и МЗ-4.3 – слой 5; а МЗ-4.1 – подслой 6.a.
- Релефът и хипсометричните нива на ограничительните повърхнини на моделните пластове и зони са съобразени с морфологичните особености на терена и пространствените форми на слоевете (фиг. 5).
- Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по южната и северната граница по схемата GHB така, че градиентът в обхвата на хранилището е около 0.025, а на север от него намалява до 0.005.
- Инфильтрационното подхранване е зададено по цялата площ на модела с постоянна скорост $W = 2 \times 10^{-4} \text{ m/d}$.
- Моделът е калибриран спрямо измерените по време на хидрогеоложкото проучване на площадката водни нива, resp. по съставената хидродинамична карта (фиг. 2).



Фиг. 5. Математически 3D модел. Геометрия на моделните пластове и гранични условия

Композиране на миграционния 3D модел

Миграционният модел представлява 3D симулация на условията за движението на изотопи във водоносната зона. Подходът при неговото създаване е следният:

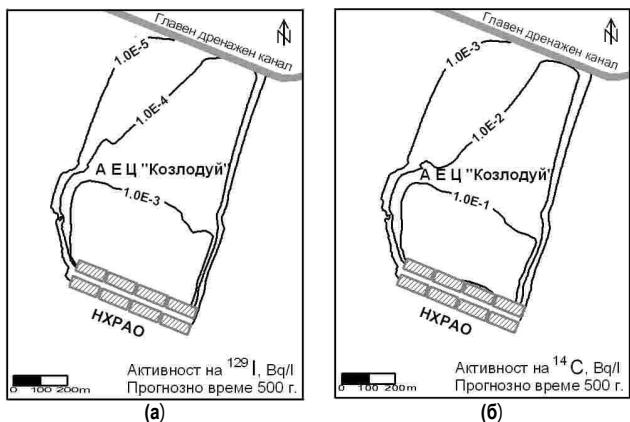
- Разработен е с програма MT3D-MS (Zheng and Bennett, 1995; и др.), като е използвана направената по-горе пространствена дискретизация.
- Полученото с филтрационния модел разпределение на градиентите, скоростите и потоците в моделната област е конвективната матрица, върху която е построен миграционния модел.
- Миграционните характеристики (D_m , α_L , K_d и ρ) на моделните пластове и зони са зададени със стойностите, посочени в табл. 1 и табл. 2;
- Замърсенияте с ^{129}I и ^{14}C течни емисии преминават с постоянна скорост $W_p = 2 \times 10^{-4} \text{ m/d}$ през цялата площ на проекциите на хранилищните модули върху границата между ненаситената и водоносната зона. С оглед направените с 2D модела прогнози, тези проекции се задават като площен източник с постоянна входна активност 4.37 Bq/m^3 на ^{129}I и $2.89 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ на ^{14}C .

Резултати

Направената с 3D модела прогноза за възможната миграция на ^{129}I и ^{14}C в подземните води е илюстрирана с две карти на техните активности за време 500 г. след навлизането им във водоносната зона (фиг. 6). Този момент се предшества от един дълъг период от няколко хиляди години, през който ^{129}I и ^{14}C преминават през зоната на аерация (плюс приетите начални 300 г. на "институционален контрол"). Следователно двете карти съответстват на ситуацията съответно на около 2000 г. и 6600 г. след изграждането на хранилището.

За прогнозния период миграцията в дълбочина се ограничава в пределите на Брусарската свита. На север (фиг. 6) двата изотопа се разпространяват и в незаливната тераса на р. Дунав, като в края на прогнозната симулация активностите им в първия приемник (Главния дренажен канал) достигат до стойности:

- активност на ^{129}I в – A_{max} = $7.41 \times 10^{-4} \text{ Bq/l}$;
- активност на ^{14}C – A_{max} = $2.81 \times 10^{-2} \text{ Bq/l}$.



Фиг. 6. Карты на активностите на ^{129}I и ^{14}C във подземните води

Заключение

Всички изследвани ключови радионуклиди (с изключение на ^{129}I и ^{14}C) се задържат практически изцяло още в защитните бариери на хранилищата и в зоната на аерация. Същите достигат до нивото на подземните води след продължително време от 1000-2000 г. (за ^{134}Cs и ^{90}Sr) до над 100000 г. (за ^{239}Pu и ^{94}Nb), като максималната активност на различните радионуклиди при нивото на подземните води е от 10^{-10} (^{94}Nb) до 10^{-75} (^{241}Am) Bq/m^3 . Тези стойности са в десетки порядъци по-ниски от "Границата на средногодишната обемна активност в питейните води" (ГСГОАпв) за съответния радионуклид (посочени в таблица 7 от Наредбата за основните норми за радиационна защита, ДВ, бр. 78 от 20.08.2004 г.), т.е. може да се смятат наистина за нищожни.

Изотопите ^{129}I и ^{14}C са сравнително слабосорбирали и относително дългоживущи и поради това могат да достигнат до подземните води и да се пренасят чрез тях. Това обстоятелство, обаче, не крие никаква реална опасност, тъй като активностите, с които те постъпват в подземните води са много ниски. По-конкретно: ^{14}C има около 800 пъти по-ниска активност от ГСГОАпв, а ^{129}I – около 220 пъти по-ниска от ГСГОАпв.

Въз основа на резултатите от моделните изследвания може да се направи заключението, че площадката е подходяща за изграждане на ХРАО от гледна точка на възможното разпространение на радионуклиди. На практика няма никаква опасност от радиоактивно замърсяване на съществуващи повърхностни водоеми и водотоци, както и на подземни водоизточници в района.

Литература

- Гъльбов, М. М. и др. 1992. Изясняване на дисперсионните характеристики на почвената и водната среда в района на АЕЦ "Козлодуй" с цел анализиране на възможните пътища за миграция на радионуклиди от АЕЦ в почвата и атмосферата. Доклад на "Акватер".
- Гъльбов М. М. и др. 2003. Хидрогеоложки и миграционни изследвания на площадката за хранилище на НСРАО от АЕЦ Козлодуй. Доклад на "Акватер".
- Карастанев, Д. и др. 2007. Извършване на инженерно-геологически, хидрогеоложки и геофизични проучвания. Доклад на ГИ БАН по дог. 206025/19.09.2006.
- Наредба за основните норми за радиационна защита. 2004. – ДВ, бр. 73, 20.08.2004 г.
- Идеен проект за Национално хранилище за ниско- и средно активни краткоживеещи РАО. 2008. Доклад "Worley Parsons" & "Риск инженеринг", ФАР проект №Europeaid/122568/D/SV/BG.
- Стойнев, С. Б. и др. 2009. Потвърждаване на площадка за изграждане на НСРАО. Доклад на "МГУ-Инженеринг".
- Стоянов, Н. 2009. Прогнозиране на възможната миграция на радионуклиди през лъсовия комплекс в района на АЕЦ "Козлодуй" дебит. – Год. МГУ "Св. Иван Рилски", 52, Св. I, Геол. геоф., 159-164.
- Adams, E. E., L. W. Gelhar. 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. – *Water Resour. Res.*, 28, 12, 3293-3307.
- Bredencamp, D. 1990. Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. – In: *International Contributions in Hydrogeology*, 8, "Groundwater recharge".
- Bredenkamp, D. B. 1990. Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. – In: *Groundwater Recharge, IAH Memoir 8*, 247-256.
- Gelhar, L., C. Welty, K. Rehfeldt. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. – *Water Resour. Res.*, 28, 7, 1955-1974.
- Harbaugh, A., E. Banta, M. Hill, M. McDonald. 2000. Modflow-2000, The USGS modular groundwater model – user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. – *Open-File Report 00-92, USGS, VA*, 130 p.
- Hsieh, P., W. Wingle, R. Healy. 2000. VS2DI – A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media. – *USGS, Water-resources investigations report 99-4130, Lakewood*, 16.
- Lappala, E., R. Healy, E. Weeks. 1987. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. – *USGS, Water-Resources Investigations Report 83-4099, Colorado*, 184 p.
- Mallants, D., G. Volckaert, S. Labat. 2001. Parameter values used in the performance assessment of the disposal of low level radioactive waste at the nuclear zone Mol-Dessel. Volume 1-2. SCK-CEN - R-3521.
- Seit, R. R., K. G. Brown, G. A. Taylor, D. W. Esh. 2009. Overview of performance assessments and modeling of cementitious barriers. – In: *Overview of the U.S. Department of Energy and Nuclear Regulatory Commission Performance Assessment Approaches. Cementitious Barriers Partnership*, CBP-TR-2009-001, II-1-83.
- Zheng, C., G. Bennett. 1995. *Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice*. Van Nostrand Reinhold, New York, 433 p.
- Zheng, C., P. Wang. 1998. MT3DMS – A modular 3D multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. *Documentation and user's guide*. Dep. of Geology and Mathematics, University of Alabama, 239 p.