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-геоложки 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 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶³Ni, ⁹⁴Nb, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ¹²⁹I и ¹⁴C, като са определени границите и степента на замърсяване на геоложката 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 вещество с отчитане на съпътстващите 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 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶³Ni, ⁹⁴Nb, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ¹²⁹I, and ¹⁴C 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 радиоактивни хранилише за отпадъци (HXPAO). Резултатите от тези проучвания показват, че природните дадености в района на АЕЦ "Козлодуй" са доста благоприятни за такъв тип обекти (Гълъбов и др., 1992, 2003; Карастанев 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 геоложката 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 (геоложки, сондажни, хидрогеоложки, инженерногеоложки, геофизични и др.), извършени от ГИ на БАН, МГУ "Св. Иван Рилски", други фирми и предприятия. Използвани са технологични схеми от идейния 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 НХРАО 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 обвивка 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 геоложките 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 (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶³Ni, ⁹⁴Nb, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ¹²⁹I и ¹⁴C), които дават цялостна представа за възможното разпространение на погребаните проектираното хранилище радионуклиди в подповърхностното пространство и подземните води. Основанията за техния избор са следните:

- ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr са основните съставки на отпадъка, които по традиция "задължително" присъстват в прогнозите.
- ¹²⁹ и ¹⁴С са между най-подвижните радионуклиди поради дългия им живот и твърде слабата им сорбируемост (задържане) в геоложката среда.
- ²⁴¹Am, ⁹⁴Nb и ²³⁹Pu са също дългоживеещи, но се отличават със силна сорбируемост в почвите, така че те предполагат едно продължително, но много бавно разпространение в подповърхностното пространство.
- ⁹⁴Nb заема междинно положение от гледна точка на дълговечност и сорбируемост в природните материали. Той, както ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, 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;
- ненаситената зона от дъното на хранилището до нивото на подземните води (зоната на аерация);
- водонаситената 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. Геоложкият строеж включва два основни комплекса:

- кватернерен комплекс, състоящ се от льосови материали (льос и льосовидни 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 двата 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 льос; 2. Погребана почва и льосовидна 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 – Брусарска свита; 7. Дребен пясък – Арчарска свита. Допълнително слой 6 е поделен на три подслоя – 6.а Песъчлива глина; 6.6 Пясък; и 6.в Прахова глина. Пространствените граници, средната дебелина h_{ср}, обемната плътност о, коефициентът на филтрация k и коефициентът на разпределение К_d на всеки слой са определени по данни от специализираните изследвания в района (Гълъбов и др., 1992; Карастанев и др., 2007; Стойнев и др., 2009; и др.). Надлъжната дисперсивност αL и коефициента на дифузия D_м 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 hcp, p, k, α_L и D_M за всеки слой, а в табл. 2 – стойностите на коефициента на разпределение К_d на слоевете спрямо всеки от "ключовите" радионуклиди.

Таблица 1. Хидрогеоложки характеристики на слоевете

Слой №	h _{cp} , m	ρ, g/cm³	k, m/d	α∟, m	D _M , m²/d
1	10-35	1450	0.7	0.005	1.5x10 ⁻⁴
2	4-16	1540	0.02	0.002	1.5x10 ⁻⁴
3	1-5	1750	0.25	0.003	1.2x10 ⁻⁴
4	1-3	1850	5.0	0.025	1.0x10 ⁻⁴
5	6-9	2050	20.0	0.03	1.0x10 ⁻⁴
6.a		1700	0.1	0.02	2.0x10 ⁻⁴
6.б	> 40	1730	3.0	0.05	1.0x10 ⁻⁴
6.в		1700	0.001	0.01	2.5x10-4
7	1-8	1730	3.0	0.05	1.0x10 ⁻⁴

Таблица 2. Коефициент на разпределение K_d*, m3/kg

Изотоп	Слой №								
1301011	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	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		

<u>Забележка:</u> За слой 5 са представени данни само за ¹²⁹ и ¹⁴С, тъй като те единствено преминават в този слой.

Подземните води в района на площадката са на дълбочина 30-45 m. Зоната на аерация заема голяма част от кватернерния комплекс (без чакълите в първата тераса) и част на неогенския комплекс. Предвид проектната дълбочина на фундиране, дебелина на зоната на аерация под ХРАО е над 20 m. 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 поконсервативен 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 обвивка.

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 m, а циментовопочвената основа като лежащ под него пласт с дебелина 4 m. 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 вместващата геоложката среда (в случая льосово-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.
- Геоложкият строеж се пресъздава с характеристиките на всяка литоложка разновидност: геометрични (релеф на границите, h_{cp}), физични (ρ, n), филтрационни (k) и миграционни (K_d, α_L и D_M). В зоната на аерация се задават специфичните за нея параметри: влажност θ, влагопроводност k* и всмукващ потенциал ψ.
- Инфилтрационният поток под хранилищните модули и извън техните граници е 71 mm/а. 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 льосовия комплекс.
- В табл. 3 са представени използваните като входни данни характеристики на изследваните радионуклиди: очакваната обща активност в хранилището А, начална активност на източника Ар₀, коефициент на елиминиране ү, коефициент на разпределение К_d и фактор на забавяне R за използвания 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; Карастанев и др., 2007; Seit et al., 2009; и др.). Стойностите на R се изчисляват при плътност на бетона в източника ρ_d = 2200 kg/m³ и при условие, че активната порестост на бетона е равна на обща му порестост (n₀ = n = 0.16), което е по-консервативния подход.
- Радиоактивният разпад в хранилищните клетки се отчита като по тяхното дъно се симулира непрекъснат приток на радионуклиди с експоненциално намаляваща активност.

Таблица 3. Основни параметри на ключовите радионуклиди

, ,					
ИЗО- ТОП	A, Bq	γ, d-1	K _d , m³/kg	R	A _{p0} , Bq/m³
¹³⁷ Cs	1.4x10 ¹⁴	6.3x10 ⁻⁵	3.0x10 ⁻³	42	1.5x10 ⁸
⁹⁰ Sr	3.4x10 ¹¹	6.6x10 ⁻⁵	1.8x10 ⁻³	26	6.0x10 ⁵
⁶³ Ni	4.4x10 ¹²	1.9x10⁻⁵	1.2x10 ⁻¹	1692	1.2x10 ⁵
²⁴¹ Am	1.3x10 ¹⁰	4.4x10 ⁻⁶	6.4x10 ⁰	88001	6.7x10 ⁰
⁹⁴ Nb	3.3x10 ⁹	9.5x10 ⁻⁸	3.5x10 ⁻²	482	3.1x10 ²
²³⁹ Pu	8.7x10 ⁹	7.9x10 ⁻⁸	4.3x10 ⁰	59126	6.7x10 ⁰
129	8.6x10 ⁷	1.2x10 ⁻¹⁰	6.4x10 ⁻²	881	4.4x10 ⁰
¹⁴ C	2.7x10 ¹²	3.3x10 ⁻⁷	10x10 ⁰	137501	8.9x10 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 хидрогеоложкия разрез по профил II-II. Разрезът включва седем слоя (1, 2, 3, 4, 6.а, 6.б и 6.в) и две защитни бариери (стоманобетонен фундамент и циментово-почвена основа). Те са включени в модела с девет моделни зони. Моделни зони МЗ-1, МЗ-2, МЗ-3, МЗ-4, МЗ-5, МЗ-6 и МЗ-7 пресъздават слоеве 1, 2, 3, 4, 6.а, 6.б и 6.в, а МЗ-8 и МЗ-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 МЗ-8 и МЗ-9 са зададени с характеристиките на вместващите ги МЗ-1 и МЗ-2 (льосовия комплекс).

- Зависимостите ψ= f(θ) и k*= f(θ) 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 геоложка среда.
- Инфилтрационният поток през хранилището и извън него е зададен с постоянна скорост W = 2x10⁻⁴ 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 инфилтрационен поток. Приетата в началото на моделната симулация стойност е равна на началната активност в източника А_{р0}. Прието е още, че активността А_р в постъпващите под дъното на ХРАО течни емисии намалява експоненциално във времето t. За всеки стрес период тя се определя от зависимостта:

$$A = A_{\rho 0} \exp\left(-\gamma t\right) \tag{1}$$

Резултати

В математическия 2D модел са избрани 5 наблюдателни точки от масива (фиг.4). Те са разположени на дълбочини 1, 2, 5, 10 и 21 m под дъното на хранилището (последната от тях е непосредствено над нивото на подземните води). Получените прогнозни решения за максималните активности А_{тах} в наблюдателните точки и времената t_{тах}, 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 (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶³Ni и ²⁴¹Am) в резултат на естествен разпад и сорбция намаляват своята активност до практически нищожни стойности. На практика интензивно замърсената с тях зона се ограничава до дълбочина 3-4 m под дъното на хранилището, т.е. в обхвата на деградиралите бариери. Максималната активност до нивото на подземните води за ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁶³Ni е между 10-⁴⁰ и 10-⁴⁹ Bq/m³, а за ²⁴¹Am е 10-⁶⁹ Bq/m³ (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 разпадащите се изотопи ⁹⁴Nb и ²³⁹Pu. Замърсената с тях зона, макар и след един твърде дълъг период, обхваща пространството до дълбочина 5-6 m. 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/m³, което прави прогнозните изчисления за разпространението на ⁹⁴Nb и ²³⁹Pu във водонаситената зона напълно безпредметни.
- По-особени случаи са изотопите ¹²⁹ и ¹⁴С. 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 и след 6010 г. за ¹⁴С, 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	4. Рез	ултати	от математически	7 2D	модел
-----------	--------	--------	------------------	------	-------

TOUKO d*		¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr		⁶³ Ni			
104Ka	u,	+ 0	A _{max} ,	t _{max} ,	A _{max} ,	tn	nax,	A _{max} ,	
IN≌		lmax, a	Bq/m ³	а	Bq/m ³		а	Bq/m ³	
1	1	590	1x10 ²	270	2x10 ²	3	50	5x10º	
2	2	850	4x10-1	430	2x10 ^o	5	40	4x10-2	
3	5	1020	2x10-8	570	1x10-6	8	90	1x10 ⁻⁸	
4	9	1210	2x10 ⁻¹⁸	780	1x10 ⁻¹⁵	15	590	3x10 ⁻¹⁸	
5-свн	21	1940	9x10-47	1430	2x10-40	41	110	9x10 ⁻⁴⁵	
		²⁴¹ Am		¹⁴ C		129			
1	1	1630	1630 3x10-6		474	Ę	50	4.41	
2	2	2590	3x10 ⁻⁹	3680	460	1	10	4.41	
3	5	5340	2x10 ⁻¹⁸	4440	424	3	00	4.41	
4	9	9140	2x10-32	5110	391	5	60	4.41	
5-свн	21	20130	3x10 ⁻⁶⁹	6010	289	14	110	4.37	
точка	d*,			²³⁹ Pu					
Nº	m	t _{max} , a	A _{max} , Bq/m ³		t _{max} , a	t _{max} , a		A _{max} , Bq/m ³	
1	1	13980	1.6	x10 ²)2 29070		1.7x10		
2	2	24270	1.1	x10 ² 53530		8.0x10 ¹		8.0x101	
3	5	62950	2.8	x101	100000		0.2x101		
4	9	100000	1.1)	<10 ⁻²	100000		3.3x10 ⁻²		
5-свн	21	100000	1.6x	10 ⁻¹²	100000		1.1x10 ⁻⁹		

Забележка: *Дълбочините са мерени от дъното на хранилищния модул

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

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

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.а и 6.6; МП-6 – подслой 6.в; 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.а.
- Релефът и хипсометричните нива на ограничителните 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.
- Инфилтрационното подхранване е зададено по цялата площ на модела с постоянна скорост W = 2x10⁻⁴ m/d.
- Моделът е калибриран спрямо измерените по време на хидрогеоложкото проучване на площадката водни нива, респ. 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 водонаситената 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;
- Замърсените с ¹²⁹ и ¹⁴С течни емисии преминават с постоянна скорост W_p = 2x10⁻⁴ m/d през цялата площ на проекциите на хранилищните модули върху границата между ненаситената и водонаситената зона. С оглед направените с 2D модела прогнози, тези проекции се задават като площен източник с постоянна входна активност 4.37 Bq/m³ на ¹²⁹ и 2.89x10² Bq/m³ на ¹⁴С.

Резултати

Направената с 3D модела прогноза за възможната миграция на ¹²⁹I и ¹⁴C в подземните води е илюстрирана с две карти на техните активности за време 500 г. след навлизането им във водонаситената зона (фиг. 6). Този момент се предшества от един дълъг период от няколко хиляди години, през който ¹²⁹I и ¹⁴C 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 в Amax = 7.41x10-4 Bq/l;
- активност на ¹⁴С Amax = 2.81x10-2 Bq/l.



Фиг. 6. Карти на активностите на ¹²⁹ и ¹⁴С във подземните води

Заключение

Всички изследвани ключови радионуклиди (с изключение на ¹²⁹ и ¹⁴C) 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 ¹³⁴Cs и ⁹⁰Sr) до над 100000 г. (за ²³⁹Pu и ⁹⁴Nb), като максималната активност на различните радионуклиди при нивото на подземните води е от 10⁻¹⁰ (⁹⁴Nb) до 10⁻⁷⁵ (²⁴¹Am) Bq/m³. 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 ¹²⁹I и ¹⁴C са сравнително слабосорбируеми 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: ¹⁴C има около 800 пъти по-ниска активност от ГСГОАпв, а ¹²⁹I – 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

- Гълъбов, 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".
- Гълъбов 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 инженерногеоложки, 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 НХРАО. Доклад на "МГУ-Инженеринг".
- Стоянов, Н. 2009. Прогнозиране на възможната миграция на радио нуклиди през льосовия 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 rainfallrechargerelationship. – 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 Prarctice. 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.