

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОЦЕНКА НА ЗАЩИТНИЯ ЕФЕКТ ОТ ГЛИНЕСТИЯ ИЗОЛАЦИОНЕН ЕКРАН И ЗАДЪРЖАЩАТА СПОСОБНОСТ НА ГЕОЛОЖКАТА ОСНОВА НА ДЕПА ЗА БИТОВИ ОТПАДЪЦИ

Николай Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Посредством математически двумерни (2D) и тримерни (3D) хидрогеоложки модели е направена количествена прогноза за възможното замърсяване на подповърхностното пространство с течни емисии от новото депо за битови отпадъци на гр. Самоков. При разработването им са използвани компютърните програми VS2DTI, Modflow и MT3D-MS. Чрез 2D моделите са симулирани условията за преминаване на сметищни води през инженерните бариери и зоната на аерация, а с 3D моделите са симулирани условията за разпространение на замърсители във водонаситената зона. В различни моделни варианти е изследвано поведението на бързо подвижните замърсители, по примера на хлоридния йон (Cl⁻). На базата на прогнозните решения, са оценени защитният ефект от проектирания глинест изолационен пласт по дъното на сметищното тяло, задържашката способност (естествената защита) на геоложката основа, потенциалният риск от замърсяване на подземните води и възможностите за увеличаване на защитните функции на глинест изолационен пласт. Представените резултати илюстрират ефективността на използвания подход за оценка и оптимизиране на подобни проекти.

MATHEMATICAL MODELLING STUDIES FOR ASSESSING THE PROTECTIVE EFFECT OF THE ISOLATING CLAY LAYER AND THE RETENTION CAPACITY OF THE GEOLOGICAL BASIS OF LANDFILLS

Nikolay Stoyanov

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

ABSTRACT. Mathematical two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) hydrological models are applied in order to obtain a quantitative forecast for a possible pollution of the sub-surface space by liquid emissions from the new landfill near the town of Samokov. The models are developed by using the computer programs VS2DTI, Modflow and MT3D-MS. The 2D models are applied for simulating the conditions under which the landfill leakage is passing through the engineering barriers and the zone of aeration, and by the 3D models are simulated the conditions for the spread of pollutants in the water-saturated zone. Various model variants are developed in order to study the behavior of fast moving pollutants on the example of the chloride ion (Cl⁻). The obtained prognostication solutions are used for evaluating the protective effect of the isolating clay layer designed to be spread along the bottom of the landfill body, the holding capability (the natural protection) of the geological basis, the potential risk of groundwater contamination, and the possibilities for increasing the protective functions of the isolating clay layer. The presented results illustrate the effectiveness of the applied approach for evaluation and optimization of such projects.

Въведение

Първите по-задълбочени изследвания на естествената защитеност и възможното замърсяване на подземните води и почвите от депа за битови отпадъци (ДБО) у нас датират от началото на 90-те години на ХХ век. Изследванията са свързани главно с производствена дейност или с проучване на чуждия опит при изготвяне на нормативни документи, регламентиращи изграждането и експлоатацията на подобни обекти. Основни теми в научните публикации са изучаване на конкретни обекти, разработване на критерии за идентификация и оценка на процесите на замърсяване на води и почви; съставяне на математически модели за прогнозиране миграцията на различни конвенционални замърсители във водоносните хоризонти и др. (Гълъбов и др., 1999; Стоянов, 2003 и много други).

Обект на изследване е един слабо застъпен проблем, свързан с количествена оценка на възможната миграция

на замърсители през долния изолационен екран от глини на ДБО. Оценката е направена с математически двумерни (2D) и тримерни (3D) модели, симулиращи условията за миграция на замърсители през инженерните бариери, зоната на аерация и във водонаситената зона под новото депо на гр. Самоков. Моделите са разработени с компютърните програми VS2DTI, Modflow и MT3D-MS (Healy, 1990; McDonald, Harbaugh, 1988; Zheng, Wang, 1998; и др.). Използвани са и непубликувани резултати от изследвания за изграждане на ново ДБО на гр. Самоков (Стоянов, 2012; Стоянов, 2014 и др.).

Хидрогеоложки двумерни (2D) модели

Използваните в 2D моделите работни хипотези са представени в таблица 1. С първите два модела (M2D-1 и M2D-2) се оценява естествената защита на геоложката среда, с третия модел (M2D-3) се изследва защитната роля на зададения по проект противифилтрационен пласт

от глина, а с четвъртия модел (M2D-4) се доказва необходимостта от допълнителна инженерна бариера.

Таблица 1.

Работни хипотези за хидрогеоложките 2D модели

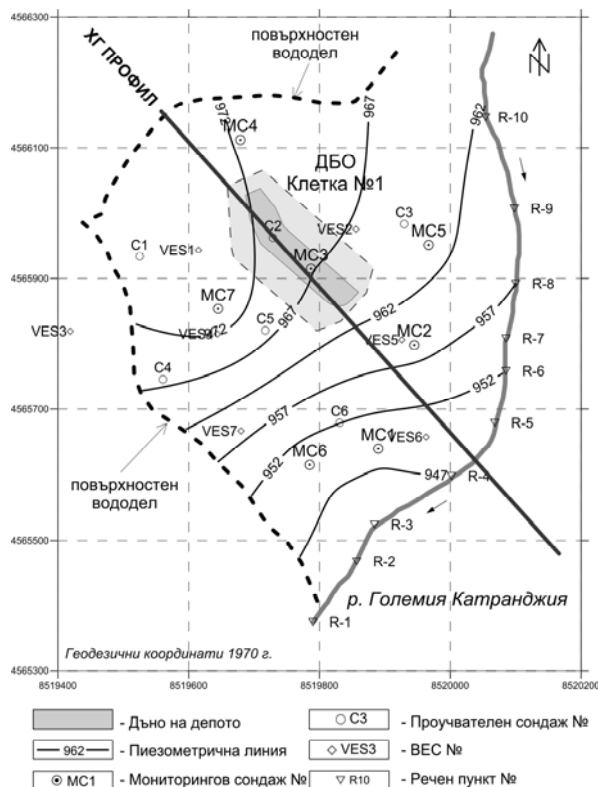
Модел	Работна хипотеза					
	Инженерна бариера	Миграционни процеси				
		Конвективен пренос	Сорбция	Молекулярна дифузия	Механична дисперсия	Смесване
M2D-1	Няма	да	не	не	не	да
M2D-2	Няма	да	да	да	да	да
M2D-3	Пласт от глина 0.5 m	да	да	да	да	да
M2D-4	Пласт от глина 0.5 m Пласт бентомат 2.5 cm	да	да	да	да	да

Концептуална схема

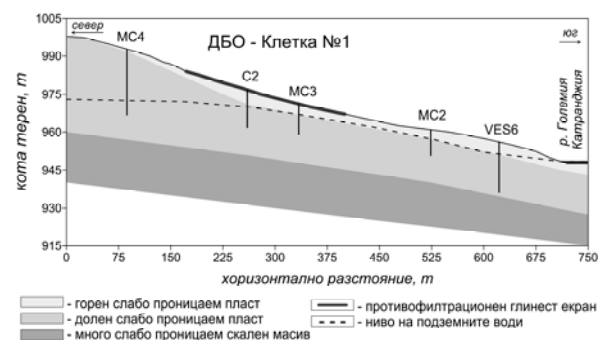
Моделите са съставени при следните изходни позиции:

- **Моделна област.** Обхваща хидрогеоложкия разрез в района на новото депо на гр.Самоков (фиг. 1, 2).
- **Хидрогеоложки единици.** В моделната област на всички двумерни модели присъстват, установените в подповърхностното пространство, хидрогеоложки единици: горен слабо проницаем пласт (кватернерна глина), долен слабо проницаем пласт (грусирала зона) и много слабо проницаем скален масив (здрав интрузивен комплекс) (фиг. 2). В моделите, отчитащи ролята на част от инженерните бариери, зададеният в проекта под дъното на сметищното тяло изолационен пласт от глина и покриващият го допълнителен пласт бентомат, макар и изкуствени формации, се разглеждат като ниско рангови хидрогеоложки единици със съответните филтрационни и миграционни характеристики. Проектната дебелина на глинения пласт е 0,5 m, а дебелината на бентомата е 2,5 cm.
- **Хидрогеоложки параметри (табл. 2).** Коефициентът на филтрация k и физичните характеристики (плътност ρ , порестост n и др.) на горния и долния слабо проницаем пласт са дефинирани по данни от проведеното детайлно проучване (Стоянов, 2012). Според проектната документация и фабричните сертификати стойностите за k на инженерните бариери са: глинен екран - $k = 10^{-9}$ m/s, бентомат - $k = 10^{-11}$ m/s. Опитът показва, че при изграждане на противифилтрационните екрани поради по-специфични характеристики на използваните материали или при неспазване на технологията на уплътняване е възможно реалните стойности на k да са с 1-2 порядъка по-високи. Ето защо, използваните в моделите стойности с голям инженерен запас са завишени. Миграционните характеристики (коефициент на разпределение K_D , надлъжна дисперсивност α_L , коефициент на дифузия D_M) на хидрогеоложките единици и инженерните бариери са изчислени чрез корелационни преходи с цитираните в специализираната литература данни за изграждащите ги литоложки разновидности (Nealy, 1990; Spitz, Moreno, 1996; Гълъбов и др., 1999; Стоянов, 2003, 2014 и др.).
- **Инфилтрационно подхранване от валежите.** За района е установено, че в подповърхностното пространство постъпват 11,5% от валежите (Стоянов, 2012). При тези условия за скоростта на инфилтрация W извън депото

се приема, че $W = 1.33 \times 10^{-4}$ m/d. Съдържанието на Cl^- в атмосферните води е нищожно малко, т.е. $c_{Cl^-} = 0$ mg/l.



Фиг. 1. Местоположение на обекта. Хидродинамична карта.



Фиг. 2. Хидрогеоложки профил.

Таблица 2.

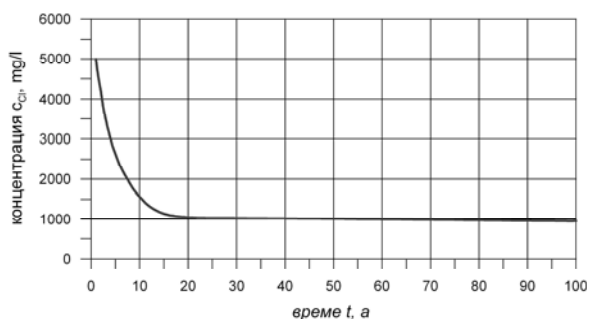
Физични, филтрационни и миграционни характеристики на хидрогеоложките единици и инженерни бариери

ρ , mg/m ³	k , m/d	K_D , m ³ /mg	α_L , m	D_M , m ² /d
Горен слабо проницаем пласт				
1.64E+09	1.00E-01	2.74E-10	2.5E00	2.0E-04
Долен слабо проницаем пласт				
1.60E+09	5.00E-02	1.69E-10	1.2E00	3.0E-04
Много слабо проницаем скален масив				
2.35E+09	1.00E-03	2.12E-11	5.0E-01	1.5E-04
Противифилтрационен пласт от глина				
1.70E+09	1.00E-05	5.29E-10	5.0E-02	1.0E-04
Противифилтрационен пласт бентомат				
1.75E+09	1.00E-07	1.79E-09	1.0E-03	1.0E-04

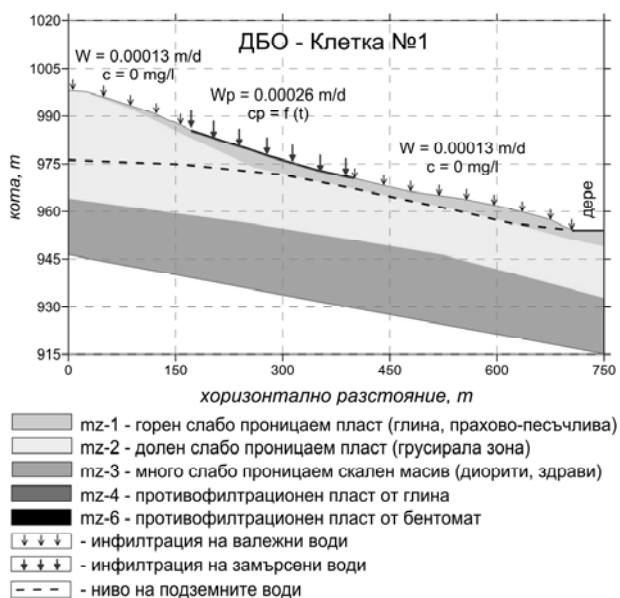
- **Повърхностен източник на замърсяване.** В четирите модела е изследвано поведението на бързо подвижните

замърсители по примера на Cl⁻. Основните мотиви те да бъдат ползвани като маркери при прогнозните изчисления са: (1) поради своята консервативност Cl⁻ са изключително подвижни и очертават максималния обхват на възможното замърсяване; (2) концентрацията на Cl⁻ в сметищните води е висока.

- **Режим на постъпване на замърсителите.** Скоростта на инфилтрация на сметищните води W_p е определена на базата на голям брой варианти с вариране на нейните стойности при равни други условия. Установено е, че моделът е устойчив при W_p не по висока от 2.6×10^{-4} m/d. По данни за състава на отделения от ДБО инфилтрат е установено, че концентрацията на Cl⁻ в сметищните води c_{Cl} е намаляваща функция от вида представен на фигура 3 (Стоянов 2003, 2014 и др.). Графиката показва, че след след 15-тата година концентрацията е постоянна величина, равна на $c_{Cl} = 1000$ mg/l.
- В съставените модели се предполага, че с посочените стойности на W_p и функционалната зависимост за c_{Cl} , сметищните води ще постъпват по цялата площ под дъното на депото в продължение на 100 години.



Фиг. 3. Изменение на c_{Cl} в сметищните води за период от 100 години.



Фиг. 4. Моделни зони и гранични условия в 2D моделите.

Композиране на математическите 2D модели

Математическите модели са композирани с програма VS2DTI. Детерминирани хидрогеоложки единици в модел M2D-1 и модел M2D-2 са симулирани с три моделни зони (mz-1, mz-2 и mz-3), в модел M2D-3 – с четири зони (mz-1, mz-2, mz-3 и mz-4) и в модел M2D-4 – с пет зони (mz-1, mz-2, mz-3, mz-4 и mz-5) (фиг. 3). Зададените в тези

зони характеристики са посочени в таблица 2. Връзката между всмукващия потенциал Ψ , съдържанието на влага ω и коефициента на влагопроводност k' е моделирана с функцията на van Genuchten. В случая, параметрите на функцията (RMC, α и β) са приети по литературни данни за подобен тип геоложка среда. Взаимодействието между течната и твърдата фаза се симулира с линейната изотерма на Henry. По горната граница на четирите модела са зададени следните гранични условия: (1) по цялата площ под дъното на депото постъпват замърсени води със скорост на инфилтрация $W_p = 2.6 \times 10^{-4}$ m/d и входна концентрация на хлоридните йони $c_{Cl} = f(t)$; (2) извън границите на депото се инфилтрират чисти валежни води със скорост $W = 1.33 \times 10^{-4}$ m/d и концентрация на хлоридните йони $c_{Cl} = 0$ mg/l. При дискретизацията на моделната област е използвана ортогонална мрежа с размери на клетките 1.0×0.5 m. Времето за симулация е разделено на 100 стрес периода, всеки с дължина 1 г.

Анализ на резултатите от моделните решения

Сравнителният анализ на представените решения (фиг. 5), дава основание да се направят следните обобщения и изводи относно процесите на замърсяване, естествената защита и самопречистваща способност на геоложката основа и защитния ефект на глинения екран и бентомата:

- Количеството на постъпващите в дълбочина течни емисии е функция на проницаемостта на геоложката основа и на наличието и параметрите на инженерните бариери. Предварителните оценки показват, че скоростта на инфилтрация на сметищните води W_p не надхвърля 2.6×10^{-4} m/d, което се дължи на слабата водопроницаемост на установените в геоложкия разрез глинести разновидности.
- Направените с M2D-1 прогнозни симулации показват, че: (1) Постъпилите под дъното на депото замърсители ще мигрират в дълбочина с висока скорост, съизмерима с тази на инфилтрационния поток. За 1-2 г. замърсяването ще премине кватернерната глинеща покривка и ще навлезе във водонаситените части на грусиралата зона. (2) В следващите 10-12 г. замърсителите ще мигрират до здравия много слабопроницаем интрузивен фундамент. Впоследствие ще се придвижват латерално, следвайки релефа на скалната подложка и посоката на подземния поток – на югоизток към дере Големия Катранджия. (3) В края на компютърната симулация (100 г.) замърсителите ще започнат да се дренират в дерето. Замърсената зона ще обхване разреза до дълбочина 20 m в участъка между депото и дерето, като преобладаващите концентрации на Cl⁻ ще са високи – около и над 500 mg/l.
- Получените с M2D-2 решения показват аналогични на прогнозираните с M2D-1 тенденции. В случая, обаче, при изчисленията се отчитат и задържащите характеристики на геоложката среда. В резултат на това миграционните процеси се развиват по-бавно, а обхватът и степента на замърсяване на подповърхностното пространство в края на прогнозния период са по-ограничени. Прогнозните решения показват, че геоложката среда не обезпечава достатъчна естествена защита. Без наличие на нито една инженерна бариера замърсената зона след 100 г. ще обхване една немалка част от подповърхностното пространство, достигаща в разрез до скалния фундамент и заемаща в план ивица с ширина 220 m в посока на дерето, без да го достига (фиг.5,6).

- Резултатите от M2D-3 показват, че проектираният пласт от уплътнена глина с дебелина 0.5 m рязко ще намали инфилтрирането на сметищни води под дъното на депото (фиг.5,в). За 100 г. обхващат на замърсяване ще е много ограничен, а максималната концентрация на Cl⁻ в замърсената зона ще е под 180 mg/l.
- Направените с M2D-4 изчисления убедително доказват, че добавянето на бентомат над противофилтрационния глинест пласт, рязко ще повиши защитата срещу инфилтрациите се в подповърхностното пространство течни емисии (фиг.5,г). След 100 г. замърсяването ще засегне най-горната част на геоложкия разрез до дълбочина 5-6 m, като максималната концентрация на Cl⁻ в замърсената зона няма да надхвърля 30 mg/l.
- След направения анализ е важно да се отбележи, че моделираните с M2D-1 и M2D-2 негативни сценарии е невъзможно на практика да се случат, предвид съществуващите законови и нормативни изисквания. Същевременно, разработените с M2D-3 и M2D-4 сценарии убедително доказват, че пластът от уплътнена глина и допълнителният пласт бентомат осигуряват много добра защита срещу инфилтрирането на сметищни води под дъното на депото.

Хидрогеоложки тримерни (3D) модели

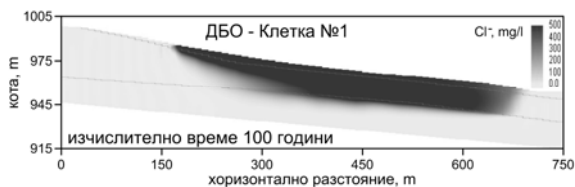
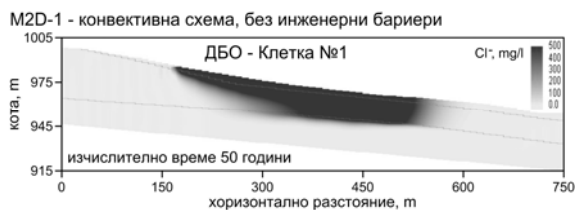
Прогнозата за максимално възможния пространствен обхват и степента на замърсяване на подземните води в района на депото е направена посредством математическа 3D симулация на условията за пренос на вещество във водонаситената зона в рамките на очертавания на водосбор. За целта са разработени един филтрационен и два миграционни модела (FM3D, MM3D-1 и MM3D-2). С FM3D е пресъздадена структурата на подземния поток, на която са базирани миграционните модели. MM3D-1 е компютърна симулация на разпространението на Cl⁻ в подземните води при условие, че на дъното на депото е изграден глинест пласт с дебелина 0,5 m, а MM3D-2 симулира миграцията на замърсители във водонаситената зона при условие, че над глинестия пласт е положен и бентомат.

Концептуален модел

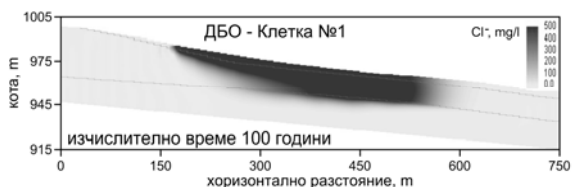
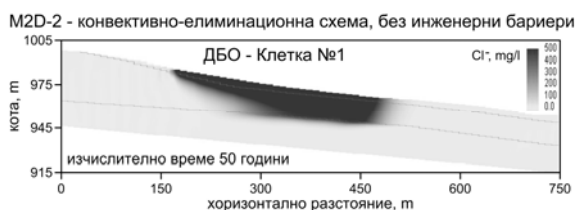
Математическите 3D модели са разработени при следните изходни условия:

- *Моделна област.* В план обхваща територията на повърхностния водосбор, а в разрез включва хидрогеоложките единици до дълбочина 30-40 m.
- *Хидрогеоложки единици* – (1) горен слабо проницаем пласт; (2) долен слабо проницаем пласт, в който са установени зони с различна водопроницаемост. Много слабо проницаемият скален комплекс се разглежда като условен водоупор.
- *Хидрогеоложки параметри.* Изчислителните стойности на параметрите на хидрогеоложките единици са дадени в таблица 2 и фигура 6.б.
- *Структура на подземния поток.* Илюстрирана е с пиезометричната карта, представена на фигура 1.
- *Гранични условия.* Инфилтрационното подхранване от валежите се реализира по цялата площ на модела с постоянна скорост. Дерето Големия Кантарджия е основният фактор, контролиращ структурата на

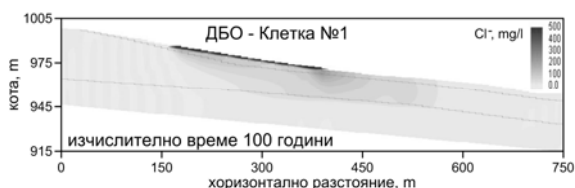
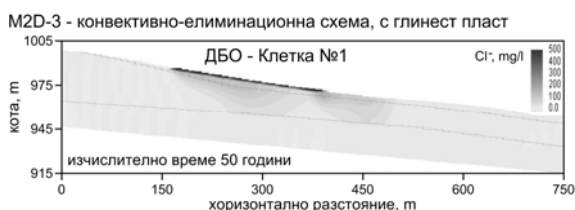
филтрационното поле и изцяло дренира формирования в рамките на водосбора подземен поток.



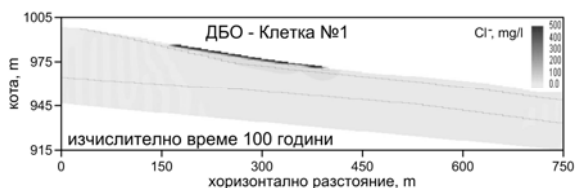
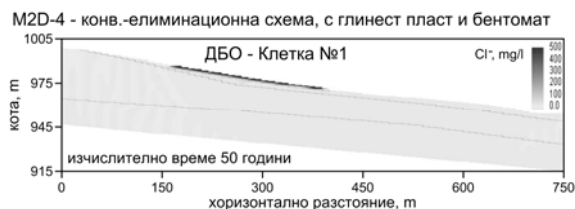
5.а.



5.б.



5.в.)



5.г.

Фиг. 5. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите, получени с четирите 2D модела.

- **Източник на замърсяване.** Замърсителите в подземните води навлизат с инфилтрационния поток по цялата площ на равнината проекция на дъното на депото върху „водното огледало“, маркиращо границата между зоната на аерация и водонаситената зона. Скоростта на замърсения поток е постоянна, а концентрацията на Cl^- в него е равна на установените с M2D-3 и M2D-4 нейни максимуми над нивото на подземните води.

Композиране на модел FM3D

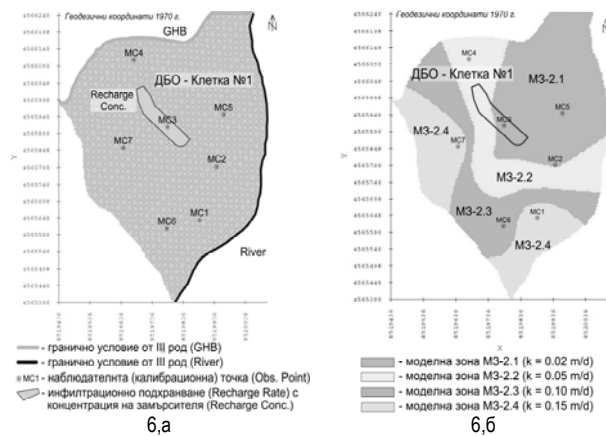
Основните положения при неговото композиране са.

- Съставен е с програмния пакет Modflow.
- Моделът включва два моделни пласта – МП-1 и МП-2, с които са моделирани горният и долният слабо проницаеми пластове. В МП-2 са детерминирани 4 моделни зони – МЗ-2.1, МЗ-2.2, МЗ-2.3 и МЗ-2.4, симулиращи четирите зони с различна водопроницаемост в долния слабо проницаем пласт (фиг. 6,б).
- Релефът на долницата и горницата на моделните пластове и зони следва морфологията на терена и пространствените форми на гидрогеоложките единици.
- Зададените в модела физичните, филтрационните и миграционните параметри са съобразени с приетите за всеки пласт и зони стойности (табл. 2 и фиг. 6,б). За коефициента на филтрация k е прието практикуваното в моделирането съотношение $k_x = k_y = 10k_z$.
- Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по северната граница по схемата GHB (General Head Boundary) (фиг. 6,а). В клетките по тези границите е прието, че напорът е равен на зададения начален напор. Използваната проводимост по границата е изчислена съобразно дебелината на моделния пласт и коефициента на филтрация в пласта или зоната, в която попада съответната моделна клетка.
- Дерето Големия Катранджия е включено в модела с гранично условие от III род (River) (фиг. 6,а).
- Инфилтрационното подхранване е зададено като постоянна величина във всички клетки от моделната област. Въведено е с гранично условие подхранване (Recharge), като скоростта на инфилтрация на чистите валежни води (извън границите на депото) е $W=1,33 \times 10^{-4}$ m/d, а скоростта на замърсения инфилтрационен поток е $W_p=2,6 \times 10^{-4}$ m/d.
- FM3D е калибриран по данни за водните нива в сондажите и в речните пунктове, измерени в хода на детайлното гидрогеолошко проучване (Стойанов, 2012).
- Композирият модел детерминира пространственото разпределение на градиентите и скоростите на подземните води в района на бъдещото депо. Същият е приет за основа в миграционните модели.

Композиране на MM3D-1 и MM3D-2

Накратко, работната схема и входните данни, при които са съставени двата модела са:

- Композириани са с програма MT3D-MS. Базират се на определеното с FM3D пространствено разпределение на градиентите и скоростите на подземните води.
- Изчислителната схема отчита конвективния пренос, обратимото елиминирание (сорбцията), механичната дисперсия, молекулярната дифузия и смесването.
- Зададените в моделите стойности на ρ_s , K_D , α_L и D_m са дадени в таблица 2.

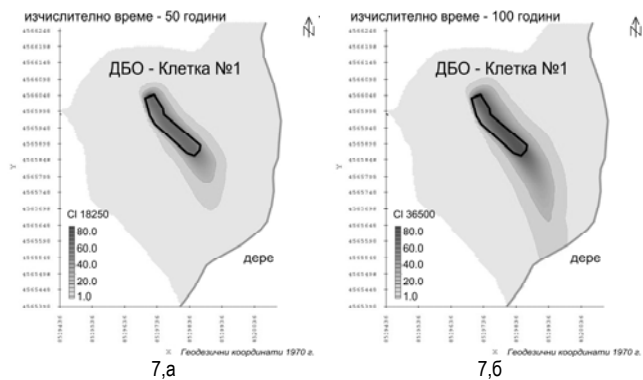


Фиг. 6. Моделна мрежа и гранични условия. Моделни зони в МП-2.

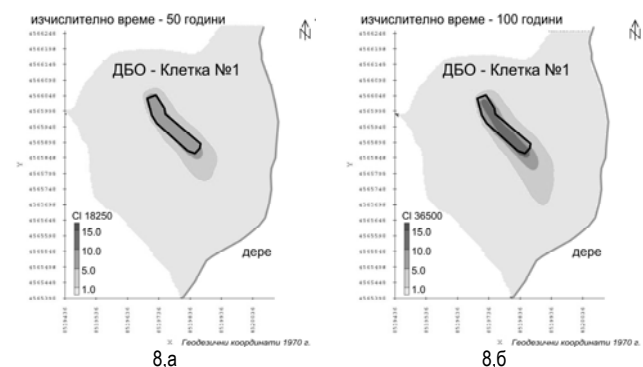
Таблица 3.

Воден баланс от калибрирания FM3D.

Приходни елементи (източници на подхранване), Q_i^{in} , l/s		Разходни елементи (зони на дrenaиране), Q_i^{out} , l/s	
Инфилтрация на валежи	0,496	Дренаиране в дерето и подземен отток извън обхвата на водосбора	0,542
Подхранване от север	0,004		
Подхранване от дерето	0,017		
Инфилтрация под депото	0,023		
Общо	0,540	Общо	0,542
Балансова грешка 0,36 % (difference)			



Фиг. 7. Резултати от прогнозните изчисления с MM3D-1. Замърсяване на подземните води при наличие на пласт от уплътнена глина.



Фиг. 8. Резултати от прогнозните изчисления с MM3D-2. Замърсяване на подземните води при наличие на пласт от уплътнена глина и бентомат.

- Проекцията на дъното на депото върху границата между зоната на аерация и водонаситената зона е зададена като площен източник с постоянна концентрация на Cl^- . В

ММ3D-1 зададената постоянна концентрация е $c_{Cl} = 180$ mg/l, а в ММ3D-2 тя е $c_{Cl} = 30$ mg/l.

Резултати от математическото 3D моделиране

Получените с 3D моделите решения показват следното:

- **Структура на подземния поток.** Моделното решение показва, че доминиращата посока на подземния поток е на Ю-ЮИ. Може да се очаква, че замърсените води ще мигрират в тази посока и ще се дренират в дерето.
- **Воден баланс.** На базата на определения с FM3D воден баланс може да се направи следния коментар: (1) В границите на водосбора естествени ресурси на подземни води са около 0,5 l/s. (2) Основната част от този ресурс (над 91%) се формира от инфилтрация на чисти валежни води, около 3-4 % е за сметка на речно подхранване и 1% идва от постъпващия по северната граница поток. (3) Инфилтрационният поток от депото съставлява едва 5-6 % в общия воден баланс. Това предполага, че след навлизане на замърсени води във водонаситената зона и при смесването им с чисти пластови води, концентрацията на съдържащите се в тях замърсители ще намалее с един порядък и повече.
- **Замърсяване на подземните води.** С ММ3D-1 и ММ3D-2 са прогнозирани размерите и степента на възможното замърсяване на подземните води за изчислително време от 100 г. Получените решения са илюстрирани с карти по съдържание на Cl^- (фиг. 7 и 8), които показват очакваното разпространение на замърсителите в изчислителни моменти 50 и 100 г. след навлизането на замърсени води във водонаситената зона. Всъщност, тези моменти се предшества от един период от няколко десетилетия, през който замърсените води се очаква да преминат зоната на аерация.

Анализ на резултатите от 3D моделите

Въз основа на получените моделни решения може да се направи следният коментар относно възможния обхват и степен на замърсяване на подземните води в района при наличие на една или две инженерни бариери:

- Посоката на хоризонталните компоненти на описващите миграционните процеси скоростни вектори, се контролира главно от градиентите на филтрационния поток. Ето защо, фронтът на замърсяване се движи на ЮИ, следвайки естествената посока на подземните води – към дерето Големия Катранджия.
- В резултат на концентрационните градиенти между замърсените и незамърсените подземни води замърсителите ще мигрират и в дълбочина. Достигайки до много слабо проницаемия скален комплекс, те ще започнат да се движат по посока на филтрационното течение, като формират характерен „шлейф“.
- Резултатите от ММ3D-1 показват, че ако под дъното на депото е положен пласт от уплътнена глина с дебелина 0,5 m, замърсяването ще обхване ограничена зона, в която максималната концентрация на Cl^- няма да надвишава 95 mg/l. В края на прогнозната симулация замърсените води ще достигнат до дерето, но в много ниски концентрации (около 10-15 mg/l) (фиг.7).
- Прогнозните решения от ММ3D-2 дават основание в дългосрочен план да се очаква съвсем незначително замърсяване на подземните води, ако над глинения пласт е положен и бентомат. В замърсената зона максималната концентрация на Cl^- няма да надвишава

18 mg/l. В края на прогнозната симулация (100 г.) замърсените води не биха достигнали до дерето (фиг. 8).

- Прогнозираните с ММ3D-1 и ММ3D-2 максимуми на очакваните концентрации в подземните води са доста по-ниски от установената в българския стандарт за питейни води пределно допустима стойност (250 mg/l).

От направения до тук анализ, естествено се налага заключението, че пластът от уплътнена глина и допълнителният пласт бентомат обезпечават много добра защита срещу евентуално замърсяване на подземните води за дълъг период след изграждането на депото.

Заключение

Представеният подход за оценка на възможна миграция на замърсители през долния изолационен екран от глини и задържащата способност на геоложката основа по примера ДБО на гр. Самоков, с успех може да бъде прилаган за оптимизиране на инженерните бариери, не само при проектиране на депа за отпадъци, но и на много други съоръжения, представляващи потенциални източници на замърсяване на подземните води и почвата.

Литература

- Гълъбов, М., Н. Стоянов, М. Панайотова. Изследвания върху миграционните характеристики на някои замърсители, постъпващи от сметищата в подземните води. *Год. МГУ "Св.Ив.Рилски", т. 27, св. I, Геол., 1999.* - 103-108.
- Стоянов, Н. *Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци.* Дисертация, МГУ, С., 2003. - 215 с.
- Стоянов, Н. *Хидрогеоложо проучване и математически модел за оценка на замърсяването от ДТБО в землището на гр. Самоков –* Хидрогеоложки доклад, Фонд на община Самоков, 2012. - 89 с.
- Стоянов, Н. *Модели за оценка на защитния ефект на глинения изолационен екран и на геоложката основа на новото ДБО на гр. Самоков,* Отчет по дог. № ГПФ 177-2014, МГУ“Св. Ив.Рилски”, С., 2014. - 36 с.
- Spitz, K., J. Moreno. *A practical guide to groundwater and solute modeling.* JW&S, Inc., NY, 1996. – 460 p.
- Healy, R.W. *Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. geological survey's computer program VS2D:* USGS, Water-Resources Investigations Report 90-4025, Denver, Colorado, 1990. - 125 p.
- McDonald, J.M., A.W. Harbaugh. *A modular three-dimensional finite-difference flow model. Techniques of Water Resources Investigations of the USGS, Book 6.* 1988. – 586 p.
- Zheng, C., P. P. Wang. *MT3DMS – A modular 3-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and user's guide.* Dep. of geol. and math., Univ. of Alabama. 1998. – 239 p.

Статията е рецензирана от проф. д-н Михаил Гълъбов и препоръчана за публикуване от кат. „Хидрогеология и инженерна геология“