

МОДЕЛИ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА КАРСТОВИЯ ВОДОНОСЕН ХОРИЗОНТ ОТ СТАРОТО И НОВОТО ДЕПО ЗА БИТОВИ ОТПАДЪЦИ НА ГРАД ПАЗАРДЖИК

Николай Стоянов, Стефан Димовски

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

РЕЗЮМЕ. Използван е комплексен подход за моделиране на замърсяването на подповърхностното пространство и подземните води от депа за отпадъци в карстови райони. Проведено е електротомографско проучване за установяване на окарстени зони и детайлизиране на хидрогеоложките условия в района на старото и новото депо за битови отпадъци на гр. Пазарджик. Съставени са двумерни (2D) хидрогеоложки модели на условията за преминаване на сметищни води през зоната на аерация и разпространението им в подземните води. В различни моделни варианти е изследвано поведението на силно и слабо подвижни замърсители по примера на хлоридните и амониевите йони (Cl и NH₄). Направена е оценка на досегашното замърсяване от старото депо и прогноза за развитието на негативните процеси след неговата рекултивация при отчитане ролята на горния противифилтрационен екран. Прогнозирано е и възможното замърсяване на карстовия резервоар от новото депо, като е направена оценка на защитния ефект на глинестия пласт в долния противифилтрационен екран и на задържащата способност на геоложката основа.

MODELS OF CONTAMINATION IN THE KARST AQUIFER CAUSED BY THE OLD AND THE NEW LANDFILL OF PAZARDZHİK

Nikolay Stoyanov, Stefan Dimovski

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

ABSTRACT. A comprehensive approach for modeling the subsurface space and groundwater pollution caused by landfills in karst areas is applied. An electrical tomography surveying was performed in order to study the karst areas and to obtain a detailed picture of the hydrogeological conditions in the area of the old and the new landfill of Pazardzhik. Two-dimensional (2D) models of the hydrogeological conditions for the landfill leachate passage through the unsaturated zone and its spread into groundwater are developed. Different model variants are used in order to study the behavior of contaminants characterized by high and by low mobility on the example of chloride and ammonium ions (Cl and NH₄). An evaluation of the current contamination caused by the old landfill was performed and a forecast for the development of possible negative processes after its recultivation was done taking into account the role of the upper insulating screen. The potential contamination of the karst reservoir caused by the new landfill is predicted after assessing the protective effect of the clay layer in the bottom insulating screen and the retention capacity of the geological base.

Въведение

Математическите моделни изследвания през последните 15-20 години се прилагат много успешно за изследване и прогнозиране на замърсяването на подповърхностното пространство и подземните води от депа за битови отпадъци (ДБО). Най-често обект на изследване са ненаситената и водонаситената зона в поров тип колектори – хидрогеоложки единици, изградени от несвързани и/или полусвързани литоложки разновидности (Стоянов, 2003, 2007; Stoyanov and Dimovski, 2004 и много други). Математически модели са прилагани и при изследване на процесите на замърсяване от ДБО в пукнатинни колектори (Стоянов, 2010).

Обект на настоящето изследване е карстов масив, върху който са разположени старото и новото ДБО на гр. Пазарджик (фиг. 1). В района на депата е проведено електротомографско проучване за детайлизиране на хидрогеоложкия строеж и за локализиране на карстови зони. Посредством математически хидрогеоложки 2D модели са симулирани условията за миграция на силно и слабо подвижни замърсители (по примера Cl и NH₄) през зоната на аерация и във водонаситената зона. С тях е

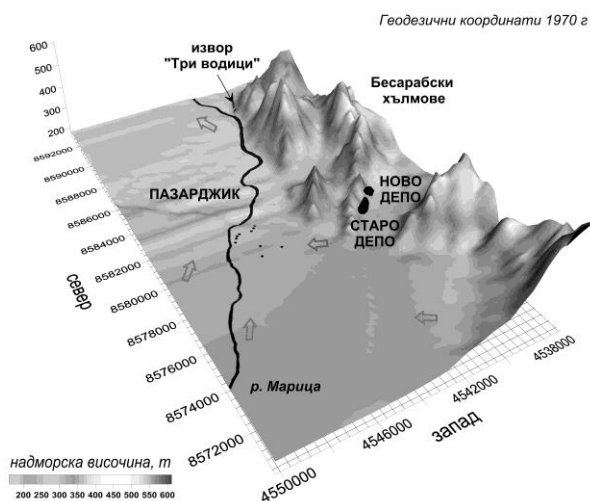
направена оценка на замърсяването от старото депо, както и дългосрочна прогноза за развитието на миграционните процеси след неговата рекултивация. Прогнозирано е и възможното замърсяване на карстовия водоносен хоризонт от новото депо, като е оценен защитният ефект на долния глинест противифилтрационен екран и на задържащата способност на геоложката основа. Моделите са разработени с програма VS2DTI (Healy, 1990 и др.).

Обща характеристика на изследвания обект

Старото и новото ДБО на гр. Пазарджик са ситуирани в обхвата на карстов водоносен хоризонт, известен в литературата като Перушица-Огняновски карстов басейн (Антонов и Данчев, 1980). Хоризонтът е формиран в окарстените мрамори и мраморизирани варовици от Добростанската мраморна свита. Басейнът е привързан към блоково разломеното бедро на Севернородопската антиклинала между р. Чепинска и р. Вьча. В резултат на тектонски движения част от скалните блокове са погребани в дълбочина, а други афлорират на повърхността. Двете депа са разположени в разкритата северозападна част на басейна, в района на Беспарските хълмове (фиг. 1) –

хорстови структури от мрамори, прослоени от гнайси и гнайсо-шисти. Мраморният комплекс е интензивно напукан и окарстен. В него е формиран карстов поток с генерална посока на север. Модулът на подземен отток е 8,6 (l/s)/km².

По данни от сондажното проучване на геоложката основа на депата е установено, че горната част на разрез е изградена от глини и пясъчливи глини, чиято дебелина варира от 0,3 m (С-5) до 12-15 m (С-1, С-6). Под глините се разкрива скална подложка от мрамори (С-1, С-2, С-3, С-4, С-5 и С-6), а в СИ част на участъка – от гнайсошисти (С-7) и гнайси (С-8).

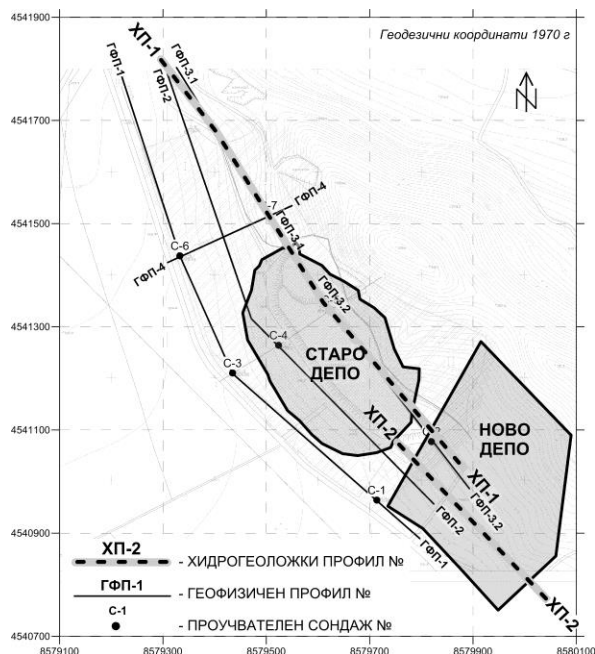


Фиг. 1. Местоположение на изследвания обект

Старото депо се експлоатира от началото на 60-те години на XX век. Отпадъците се депонират в изкопите на стара мраморна кариера без полагане на изолиращ слой. Това създава благоприятни условия за навлизане на "сметищните" води в дълбочина и за замърсяване на подземните води. Експлоатацията на старото депо приключва през 2015 г. и върху сметищното тяло се полага изолационен екран, който не допуска инфилтрация на атмосферни и повърхностни води и рязко намалява продуцирания инфилтрат. Новото депо е проектирано в съответствие със законовите и нормативни документи, регламентиращи изграждането и експлоатацията на подобен тип обекти. За безопасното му функциониране проектът предвижда изграждане на защитни съоръжения и бариери, ограничаващи изтичането на течни емисии.

Геоелектрични модели

Проведено е електротомографско 2D проучване за конкретизиране на хидрогеоложкия разрез и локализиране на окарстени зони, зони с различна водопропускливост и замърсени зони под двете депа. Теренните измервания са изпълнени по схемата "полус – дипол" по пет геофизични профила (фиг. 2). Регистрацията е извършена с Terrameter SAS 1000 - ABEM. Данните от измерванията са интерпретирани с програма RES2DINV (Loke, 2001).



Фиг. 2. Ситуация с разположението на двете депа, хидрогеоложките профили, геоелектричните профили и проучвателните сондажи

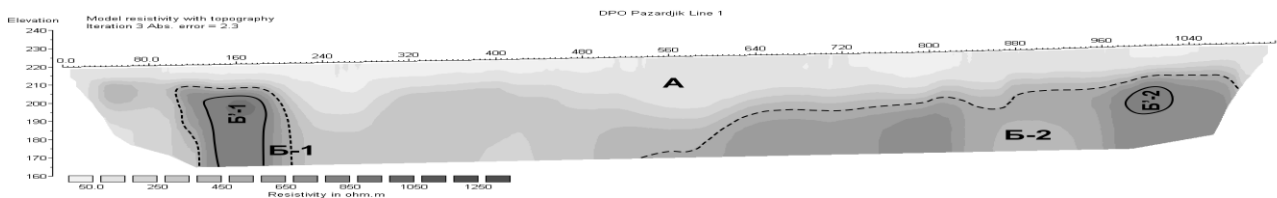
Анализът на интерпретираните резултати (фиг. 3 и 4) дава основание в разрезите по геофизичните профили да се отделят следните зони:

- приповърхностна част на геоложкия разрез (зона А), представена доминиращо от глини и глинитизирани скали с ниско електрично съпротивление (до 100 Ωm);
- скален масив с относително висока йонна електропроводност и ниско съпротивление (от 200 до 500 Ωm), представен от водонаситени напукани и окарстени мрамори (зона В);
- скален масив с плътна структура и високо (зони Б) и много високо (зони Б') съпротивление, съответно между 500 и 850 Ωm за зони Б и над 850 Ωm за зони Б';
- старо депо със силно изразена йонна проводимост и с много ниско съпротивление (до около 20 Ωm), което е свързано с високата минерализация на съдържащата се в него инфилтрат (зона С).

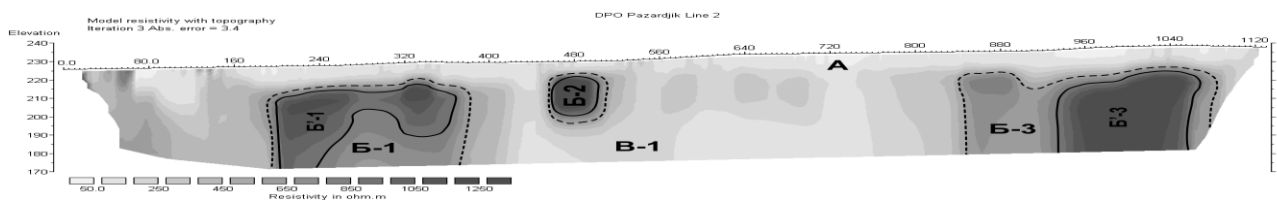
Хидрогеоложки строеж

Въз основа на комплексен анализ на информацията за проведените сондажни, геофизични и хидрогеоложки проучвания (Стойнев, 2007, 2011 и др.), в геоложката основа на двете депа се отделят пет ниско рангови хидрогеоложки единици (ХГЕ):

- *Проницаем пласт (ХГЕ1)*. Обхваща глинесто-пясъчливата покривка и горната силно изветряла част на скалния комплекс (мрамори и гнайси). Дебелината на ХГЕ1 варира в диапазона от 1-2 до 15-16 m и повече. Доминиращата на глинестия фациес предполага ниска водопропускливост и относително висока задържаща способност филтрационната среда. В разглеждания район ХГЕ1 е неводонаситена. На практика тя изгражда големи части от зоната на аерация и е важна бариера за инфилтриращите се от повърхността замърсители.

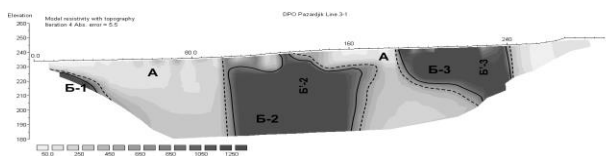


(а) ГФП-1

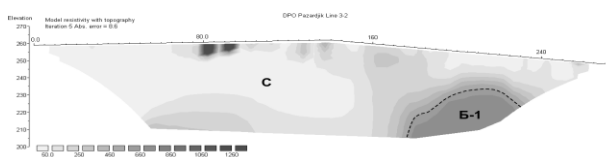


(б) ГФП-2

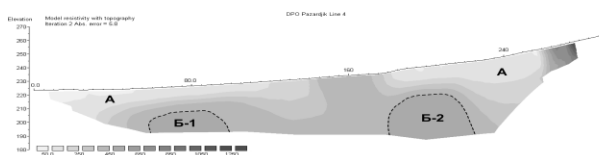
Фиг. 3. Разпределение на електричното съпротивление по геофизични профили ГФП-1 и ГФП-2



(а) ГФП-3.1



(б) ГФП-3.2



(в) ГФП-4

Фиг. 4. Разпределение на електричното съпротивление по геофизични профили ГФП-3.1, ГФП-3.2 и ГФП-4

- **Първа силно проницаема зона (ХГЕ2).** Формирана е в силно натрошените и окарстени участъци в мраморния комплекс. Развита е като вертикални или субвертикални издължени тела в масива, които изклинват в дълбочина. Отличава се с добра пропускливост и слаба задържаща способност, което я прави благоприятна среда за миграция на замърсители през зоната на аерация и за разпространение им във водонаситената зона.
- **Първа слабо проницаема зона (ХГЕ3).** Изградена е от здрави до слабонапукани мрамори с нищожна водонепропускливост. Навлизането и движението на замърсители в ХГЕ3 е възможно да се реализира единствено по дифузионен път, което предполага и силна ограниченост на миграционните процеси.
- **Втората силно проницаема зона (ХГЕ4).** Представена е от силно напукани до натрошени шисти и гнайсо-шисти. Притежава сравнително по-голяма водопропускливост и по-ниска задържаща способност. Това предполага по-интензивно развитие на миграционните процеси в тази част на подповърхностното пространство.

- **Втората слабо проницаема зона (ХГЕ5).** Включва здрави до слабонапукани шисти и гнайсо-шисти. Има изключително слаба водопропускливост и е основна бариера срещу замърсяването на подземните води. Границите, пространствените взаимоотношения и геометрията на установените ХГЕ в района на двете депа са илюстрирани на фигури 5 и 6.

Хидрогеоложки модели

Работните хипотези, използвани в хидрогеоложките 2D модели, са представени в таблица 1. С първите два модела (M2D-1 и M2D-2) се оценява естествената защита на геоложката среда под старото депо и ефекта от екологичните мерки след неговото закриване, а с модели (M2D-3, M2D-4, M2D-5 и M2D-6) се изследва естествената защита на геоложката основа под новото депо и ролята на проектирания глинест пласт в долния изолиращ екран.

Таблица 1.

Работни хипотези за хидрогеоложките модели

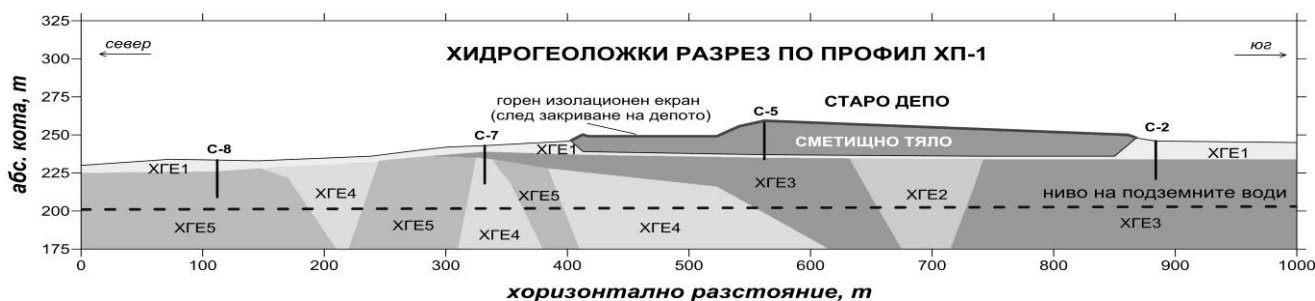
Модел	РАБОТНА ХИПОТЕЗА						
	Замърсител	Инженерна бариера	Миграционни процеси				Смесване
			Конвективен пренос	Сорбция	Молекулярна дифузия	Механична дисперсия	
СТАРО ДЕПО							
M2D-1	Cl	от 1960 до 2015 няма бариери	да	не	да	да	да
		след 2015 г горен пласт глини	да	не	да	да	да
M2D-2	NH ₄	от 1960 до 2015 няма бариери	да	да	да	да	да
		след 2015 г горен пласт глини	да	да	да	да	да
НОВО ДЕПО							
M2D-3	Cl	няма бариери	да	не	да	да	да
M2D-4	NH ₄	няма бариери	да	да	да	да	да
M2D-5	Cl	долен пласт глини	да	не	да	да	да
M2D-6	NH ₄	долен пласт глини	да	да	да	да	да

Таблица 2.

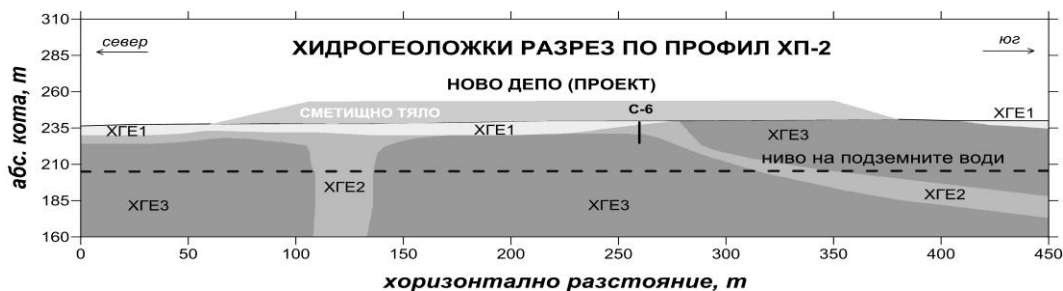
Физични, филтрационни и миграционни характеристики на хидрогеоложките единици и инженерни бариери

ХГЕ	Моделна зона mZ №	Плътност на скелета ρ_s , mg/m ³	Коефициент на филтрация k, m/d	Коеф. на разпределение K_D за Cl ⁻ , m ³ /mg	Коеф. на разпределение K_D за NH ₄ ⁺ , m ³ /mg	Надлъжна дисперсивност α_L , m	Коеф. на дифузия D_M , m ² /d
ХГЕ1	MZ-1	2,01E+09	1,0E 00	2,49E-10	1,49E-09	2,5E 00	5,0E-04
ХГЕ2	MZ-2	2,35E+09	4,0E-01	8,51E-11	3,19E-10	1,5E+01	7,0E-04
ХГЕ3	MZ-3	2,51E+09	5,0E-03	1,99E-11	9,96E-11	1,2E 00	3,5E-04
ХГЕ4	MZ-4	2,23E+09	3,0E-02	3,59E-11	3,14E-10	1,5E 00	5,0E-04
ХГЕ5	MZ-5	2,29E+09	4,0E-03	1,31E-11	6,55E-11	5,0E-01	2,0E-04
ХГЕ6*	MZ-6	1,75E+09	1,0E-06	5,29E-10	1,71E-09	1,0E-02	1,0E-05

Забележка: * ХГЕ6 – инженерна бариера (пласт от глина с дебелина 0,5 m в долния противофилтрационен екран на новото депо).



Фиг. 5. Граници на хидрогеоложките единици в разреза по хидрогеоложки профил ХП-1 (ситуационният план е представен на фиг. 2)



Фиг. 6. Граници на хидрогеоложките единици в разреза по хидрогеоложки профил ХП-2 (ситуационният план е представен на фиг. 2)

Концептуална схема

Моделите са съставени при следните изходни позиции:

- **Моделна област.** В M2D-1 и M2D-2 обхваща разреза по профил ХГ1 в участъка на старото депо, а в M2D-3, M2D-4, M2D-5 и M2D-6 включва разреза по профил ХГ2 в участъка на новото депо (фиг. 2, 5 и 6).
- **Хидрогеоложки единици.** В хидрогеоложките модели в различна степен присъстват установените в геоложката основа на двете депа ХГЕ. В M2D-5 и M2D-6 противофилтрационният пласт от глина с дебелина 0,5 m, макар и изкуствена формация, се разглежда като хидрогеоложка единица от по-нисък ранг (ХГЕ6).
- **Хидрогеоложки параметри (табл. 2).** Коефициентите на филтрация и разпределение (k и K_D) и физичните характеристики (плътност ρ , порестост n и др.) на ХГЕ1, както и k , ρ и n на останалите ХГЕ са определени по данни от полеви и лабораторни изследвания. Според проектната документация k на глинения пласт под новото депо е 10^{-9} m/s. Миграционните характеристики (коефициент на разпределение K_D , надлъжна дисперсивност α_L , коефициент на дифузия D_M) на ХГЕ и инженерната бариера са изчислени чрез корелационни преходи с цитираните в литературата данни за изграждащите ги литоложки разновидности (Healy, 1990; Spitz and Moreno, 1996; Стоянов, 2003 и др.).
- **Граница между ненаситената и водонаситената зона.** Определена е по данни от сондажните проучвания и

електротомографското изследване.

- **Валежна инфилтрация.** За района е установено, че в подповърхностното пространство постъпва около 7% от валежа (548 mm), а скоростта на инфилтрация извън двете депа е в размер на $8,4 \times 10^{-5}$ m/d.
- **Повърхностни източници на замърсяване.** В моделите е изследвано поведението на силно и слабо подвижните замърсители по примера на Cl и NH₄. Основните мотиви те да бъдат ползвани като маркери при прогнозните изчисления и за количествените оценки са: (1) Cl са изключително подвижни и очертават максималния обхват на възможното замърсяване; (2) NH₄ се сорбират (задържат) много силно от филтрационната среда и маркират зоните с най-интензивно замърсяване; (3) концентрацията на Cl и NH₄ в сметищните води е висока.
- **Скорост на инфилтрация на сметищните води W_p .** Определена е чрез проиграване на голям брой варианти на шестте модела, включващи вариране на нейните стойности при равни други условия. Моделните решения са устойчиви при W_p не по-висока от $1,68 \times 10^{-4}$ m/d. След закриване на депата и изграждане на защитен глинен екран над сметищното тяло, количеството на инфилтратата много рязко намалява, а изтичащите течни емисии под депото са нищожни, т.е. $W_p = 0$.
- **Концентрации на изследваните замърсители (Cl и NH₄).** Разработването на моделите, количествените оценки и прогнозите са направени като съдържанието на

замърсителите е изразено в относителни концентрации. Прието е, че максималната начална концентрация на Cl и NH_4 в сметищните води (инфилтратата) е 1 или 100 %, а в незамърсената част на моделната област и във валежните води е 0 или 0%. Разпределението на концентрациите на замърсителите в моделните решения е изразено в части от единицата или в проценти.

- **Механизъм на масопренасяне.** Заложен е в пълния му вид: конвективен пренос, съпроводен с обратимо елиминирание (сорбция), механична дисперсия, молекулярна дифузия и разреждане

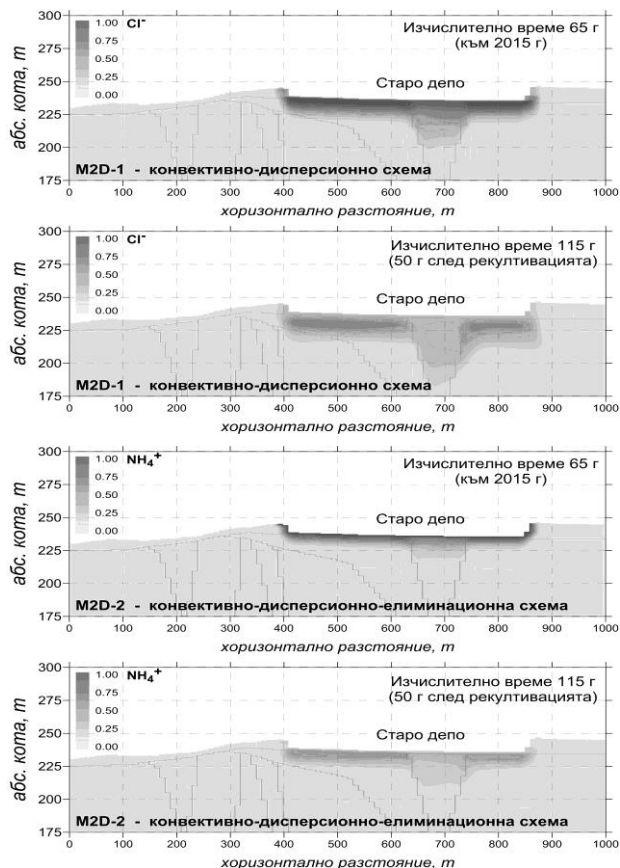
Композиране на хидрогеоложките 2D модели

Математическите модели композирани с програма VS2DT1 (Healy, 1990 и др.). Детерминираните ХГЕ в M2D-1 и M2D-2 са симулирани с пет моделни зони (MZ-1, MZ-2, MZ-3, MZ-4 и MZ-5), в M2D-3 и M2D-4 – с три зони (MZ-1, MZ-2 и MZ-3), а в модели M2D-5 и M2D-6 – с четири зони (MZ-1, MZ-2, MZ-3 и MZ-6). 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. Граничните условия са зададени в съответствие с представените в концептуалната схема работни хипотези и дефинираните параметри на валежната инфилтрация и постъпващите под дъното на депата течни емисии. При дискретизацията на моделната област е използвана ортогонална мрежа с размери на клетките 1,0x0,5 m. Продължителността на симулацията в моделите на старото депо е 115 г. (период на експлоатация 55 г. – до 2015г. и период след закриването – 50 г.), а общият период на симулацията в моделите на новото депо е 80 г. (период на експлоатация 30 г. – до 2045 г. и период след закриването – 50 г.). Времето за симулация е разделено на стрес периоди с дължина 1 г.

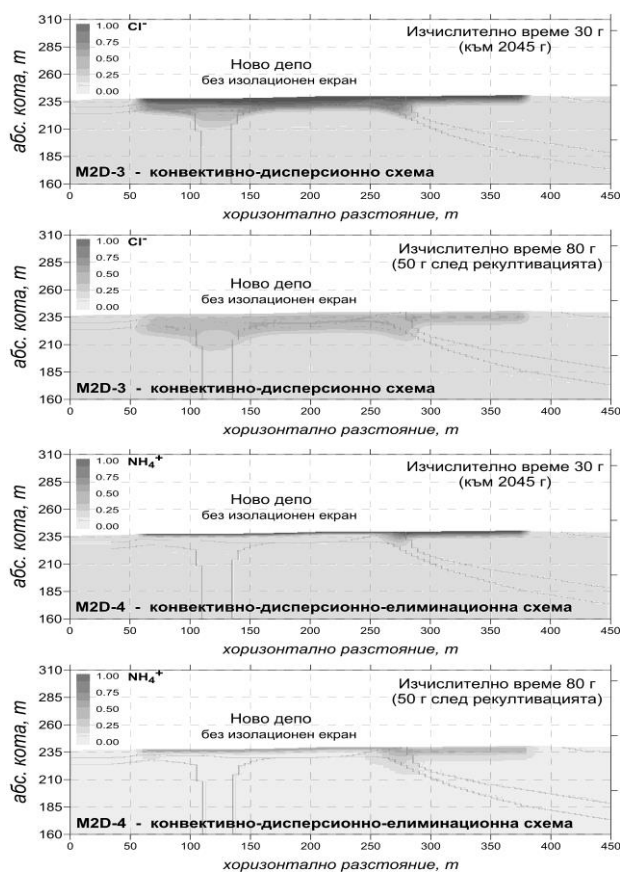
Анализ на резултатите от моделните изследвания

Анализът на резултатите от моделните изследвания, част, от които са илюстрирани на фигури 7, 8 и 9, дава основания да се направят следните обобщения и изводи:

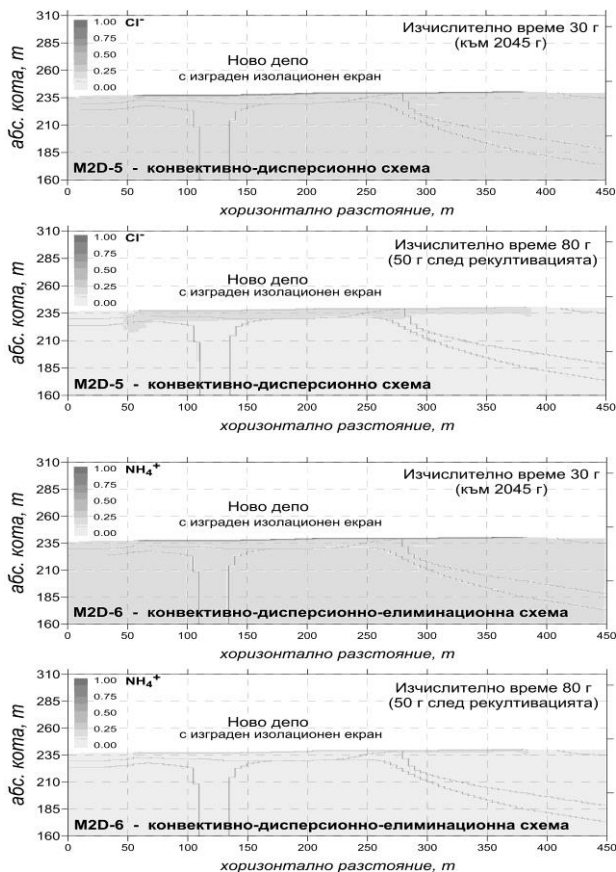
- Количеството на инфилтрационния поток под дъното на двете депа е функция на проницаемостта на геоложката основа и на наличието или отсъствието на инженерни бариери. Основните пътища за миграция на замърсители са ХГЕ1 (глинесто-песъчливият пласт, покриващ скалния комплекс), ХГЕ2 (окарстените мрамори) и ХГЕ4 (напуканите гнайсо-шисти). Голямата дебелина на зоната на аерация (над 20-25 m и повече) е важен фактор за забавяне на миграционните процеси.
- Направените с M2D-1 и M2D-2 симулации показват следните по-важни тенденции в развитието на миграционните процеси в района на старото депо (фиг. 7). Замърсителите от сметищното тяло мигрират до подземните води през малка по размер окарстена зона с ширина 50-70 m в централната част на депото. Отвъд



Фиг. 7. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на старото депо, получени с модели M2D-1 и M2D-2



Фиг. 8. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на новото депо, получени с модели M2D-3 и M2D-4



Фиг. 9. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на новото депо, получени с модели M2D-5 и M2D-6

тази зона сметищните води не преминават зоната на аерация. Силно подвижни замърсители (Cl) мигрират в дълбочина с висока скорост, съизмерима със скоростта на инфилтрационния поток. Достигат до подземните води за около 25 г. след началото на експлоатацията. През този период и след закриване на депото, концентрацията на Cl в замърсените подземни води е около 25 %. Слабо подвижните замърсители (NH₄) мигрират много по-бавно, а замърсената с тях зона е много по-ограничена. Първите „порции“ NH₄ достигат до подземните води в крайния етап от експлоатацията на старото депо (към 2015 г.). След закриването му ще продължат да навлизат във водонаситената зона, но в много ниски концентрации (около 4-5 %).

- Получените с M2D-3 и M2D-4 прогнозни решения, при неотчитане на инженерните бариери, показват, че геоложката основа на новото депо има добра задържаща способност и е в състояние да забави миграционните процеси (фиг. 8). Силно подвижните замърсители ще достигнат до подземните води около 40-45 г. след началото на математическата симулация, т.е. 10-15 г. след закриване на новото депо. Постъпващите във водоносния хоризонт замърсени води ще съдържат около 7-8 % от замърсителите в сметищния инфилтрат. Слабо подвижните замърсители се движат много бавно и не биха засегнали подземните води. В случая Cl мигрират през две малки окарстени зони с ширина 20-30 м. Извън тези зони замърсяването с Cl под депото ще се ограничи в зоната на аерация до дълбочина 20-25 м. Същевременно, замърсяването с NH₄ ще обхване само най-горната част на разреза до дълбочина от 3 до 9 м.

- Резултатите, получени с M2D-5 и M2D-6 показват, че долният противифилтрационен пласт глина ще ограничи проникването на сметищни води под дъното на новото депо (фиг. 9). За 50 г. замърсяването ще обхване само малка част от зоната на аерация. Силно подвижните замърсители ще достигнат до дълбочина 4-5 м, като концентрацията им в тази зона ще е не повече от 4-5 %. Слабо подвижните замърсители ще се задържат почти изцяло от глинения защитен екран. Замърсената с тях зона в края на симулацията достига до дълбочина 0,5-1,0 м, а концентрацията им ще е под 2%.

Предвид факта, че долният пласт глина е само един елемент от зададените в проекта на новото депо инженерни бариери, получените с M2D-5 и M2D-6 решения могат да се разглеждат като една по-консервативна прогноза за развитието на миграционните процеси и размерите на замърсяване на земната основа.

Литература

- Антонов, Хр., Д. Данчев. Подземни води в НРБ. С., Техника, 1980. - 360 с.
- Стоянов, Н. Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци. С., Дисертация, МГУ, 2003. - 215 с.
- Стоянов, Н. Математически модел на замърсяването на подземните води в района на ДБО Асеновград. – Сп. „БУЛАКВА”, бр. 1, 2007. - 32-40.
- Стоянов, Н. Условия за миграция на несорбируеми замърсители в неводонаситената зона на палеогенските вулкани в района на гр. Хасково. Част 2. Математически модел. Год. МГУ „Св.Ив.Рилски”, т.53, св I: Геол. и геоф., 2010. - 169-174.
- Стойнев (ред). Доклад с резултати от предпроектни (детайлни) геоложки, геофизични, инженерногеоложки, хидрогеоложки и хидроложки проучвания на пл. № 16 Ал. Константиново за регионално ДТБО. Консорц. „Геокомплекс” ООД. 2007.
- Стойнев (ред). Доклад за проведени инженерно-геоложки и хидрогеоложки проучвания на об.: „Терен за разширение на „Регионална система за управление на отпадъците от регион Пазарджик” по ОП „Околна среда” 2007-2013”. Геотехника АБС ООД. 2011.
- 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.
- Loke, M. H. A practical guide to RES2DINV ver. 3.4; Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2-D & 3D. Geotomo Software. Penang, Malaysia. 2001.- 129 p.
- Stoyanov, N., St. Dimovski. A simplified approach for modeling of groundwater pollution caused by the sanitary landfill of the city of Plovdiv, Bulgaria. – Lucrarile stiintifice ale simpozionului international multidisciplinary “Univ. Ropot 2004”, Petrosani, Romania, 2004. - 104-109.
- Spitz, K., J. Moreno. A practical guide to groundwater and solute modeling. JW&S, Inc., NY, 1996. - 460 p.
- Статията е рецензирана от проф. дгн Михаил Гълъбов и е препоръчана за публикуване от кат. “Хидрогеология и инженерна геология.