

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ВЪЗМОЖНОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ПОДПОВЪРХНОСТНОТО ПРОСТРАНСТВО ПРИ ВРЕМЕННО ДЕПОНИРАНЕ НА БИТОВИ ОТПАДЪЦИ В РУДНИК "ЧУКУРОВО"

Николай Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Разработен е двумерен математически модел на условията за движение на замърсители в подповърхностното пространство в района на вътрешното насипище на рудник "Чукурово". Посредством модела е оценена естествената защита, която дава геоложката основа на предложената площадка за временно депониране на битови отпадъци. Прогнозата за размерите и степента на възможното замърсяване е направена при условие, че на площадката не са изградени стандартните за подобни обекти противифилтрационен защитен екран, дренажна система за улавяне на постъпилите в дълбочина "сметищни" води и система от канали за отвеждане на повърхностните води. Работната хипотеза предполага още, че положените върху земната повърхност "бали" с битови отпадъци са с нарушена изолация и изтичащите от тях течни емисии непрекъснато ще се инфилтрират в неводонаситената част на насипището (в зоната на аерация).

A MATHEMATICAL MODEL OF THE POSSIBLE POLLUTION IN THE SUBSURFACE AREA CAUSED BY TEMPORARY DEPOSITION OF WASTE MATERIALS IN MINE "CHUKUROVO"

Nikolay Stoyanov

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

ABSTRACT. A 2-D mathematical model is developed revealing the conditions determining the movement of pollutants in the subsurface area of mine "Chukurovo". The model is used for evaluating the natural protection provided by the geological basis of the site proposed for temporary deposition of waste materials. The spread and the level of the possible pollution are prognosticated on the assumption that the site is not equipped with the standard for such type of regulated facilities amenities that comprise insulating protective shield, drain system for catching infiltrated leachate and system of open channels for collecting surface water. The work hypothesis suggests also that there is a breach in the cover of the waste bales stored on the surface and that volumes of leachate infiltrate continuously into the unsaturated zone.

Въведение

Социалната практика в последните години убедително показва, че проблемът с битовите отпадъци на гр.София е изключително тежък и за съжаление липсват ясни индикации, че може в близко бъдеще да намери някакво задоволително решение. Една от причините за създалата се ситуация, е провокираната психоза от неаргументирани изказвания на екозащитници и неспециалисти. Тяхната теза обикновено се свежда до аксиомата: "независимо от характеристиките и естествената защитеност на геоложка основа на дадена площадка, изграждането на депо за отпадъци би довело до трайно замърсяване на околната среда, в това число на повърхностните и подземните води в района на обекта".

В действителност, много от немотивирано отхвърлените с лека ръка площадки в хидрогеоложки аспект притежават необходимите качества да бъдат използвани като депа за отпадъци. И това убедително се доказва с помощта на математически модели на условията за движение на замърсители в подповърхностното пространство за всеки конкретен обект. В подкрепа на изказаното твърдение статията представя двумерен

математически модел за прогнозиране на възможното замърсяване на подповърхностното пространство при временно депониране на битови отпадъци в района на вътрешното насипище на рудник "Чукурово". Използватана работна хипотеза предполага, че на площадката не са изградени стандартните за подобни обекти противифилтрационен защитен екран, дренажна система за улавяне на постъпилите в дълбочина "сметищни" води и система от канали за отвеждане на повърхностните води. В модела е прието още, че положените върху земната повърхност "бали" с битови отпадъци са с нарушена изолация и изтичащите от тях течни емисии непрекъснато ще се инфилтрират в неводонаситената част на насипището.

Обща характеристика на изследвания обект

Изследваният обект се намира на около 30 km на югозапад от гр. София (фиг. 1). В общ план той попада в Преходната планинско-котловинна област, на границата между Лозенска планина и Ихтиманска Средна гора. Релефът е нископланински с денудационни заравнености с височина от 400 до 1200 m. Средната температура на

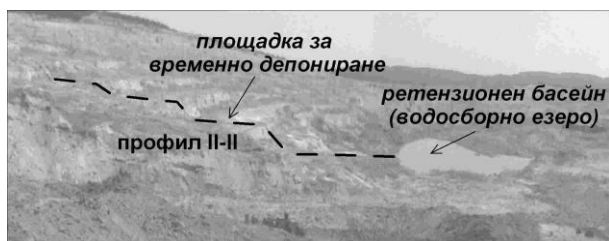
въздуха през годината е 8°C, а средната сума на падналите валежи – около 630 mm.



Фиг. 1. Местоположение на изследвания обект

Обектът попада във водосбора на р. Габра, която извира на 3.5 km от яз. Искър. Тя преминава през едноименното село, след което тече на североизток и се влива в р. Лесновска. Вододелната линия между водосборните области на р. Габра и язовира е съвсем ясно изразена и напълно изключва движение на повърхностни води от обекта към яз. Искър.

По-конкретно, отредената за временно депо площадка заема ограничена територия от вътрешното насипище на рудник "Чукурово". Характерните за този район хидроложки условия са предимно функция на интензивната антропогенна дейност. Стичащите води се по скатове на ограждащите рудника възвишения, падналите на неговата територия валежи и рудничните води се събират посредством специално изградена система от хидротехнически съоръжения. Тези води се отвеждат в ретензионен басейн (водосборно езеро), формиран на дъното на котлована (фиг. 2). Езерото е със значителен обем и е напълно изолирано от р. Габра и яз. Искър.



Фиг. 2. Общ изглед на площадката за временно депониране на отпадъци в района на вътрешното насипище на рудник "Чукурово"

В геоложкия строеж в района на вътрешното насипище участва твърде широк спектър от литоложки разновидности – глини, пясъчливи глини, прахово-пясъчливи глини, глинести пясъчници, пясъчници, въглищни прослойки и др. Те се характеризират с изключително ниска проницаемост и изградените от тях хидрогеоложки единици обикновено се класифицират като практически "водоупори", неводоносни структури или слабо

водоносни тела, чиито водни ресурси са незначителни и нямат стопанско значение.

Резултатите от детайлните проучвания дават основание в седментите, изграждащи геоложката основа на площадката, да се отделят три ниско рангови хидрогеоложки единици. В рамките на насипището се разграничават един проницаем пласт в горната част на разреза (до дълбочина 10-15 m) и един слабо проницаем пласт в по-уплътнените в дълбочина материали. Коефициентът на филтрация в тези два пласта е нисък – от 10^{-1} до 10^{-2} m/d. Седиментите от подложката, представени от алтерниращи пясъчници, глинести пясъчници, глини и въглищни прослойки, са с 1-2 порядъка по-ниски филтрационни характеристики. В хидрогеоложки аспект формираната от тях слабо проницаема зона представлява водонаситена слабопроводяща среда, която може да се разглежда и като практически "водоупор".

Естеството на детерминираниите в района на разглеждания обект хидрогеоложки единици предполага съвсем ограничено присъствие на подземни води. Тези води се формират главно в тялото на насипището (в проницаемия и слабопроницаемия пласт). Имат сезонен характер и твърде динамичен режим. През дъждовни периоди и при топенето на снеговете част от оттичащите се в чашата на открития рудник повърхностни води се инфилтрират в насипаните материали и формират безнапорен подземен поток, насочен по посока на основния отводнител – водосборното езеро. Поради ниския коефициент на филтрация на средата в зоната на аерация преминава само една много малка част от повърхностните води (около 3-6%). Другата част се оттича под формата на повърхностни потоци, следвайки наклона на терена. Освен от инфилтрация на валежи и скатови води, подземните води се подхранват и от необлицован събирателен канал, който маркира контура на високата южна граница на открития рудник и събира повърхностния отток, идващ от юг. Малко вероятно е подземните води да се подхранват от преминаващо на около 300-400 m на юг от този канал коригирано русло на р. Габра, тъй като реката тече върху седименти с много ниска проницаемост (кватернерни делувиялни глини и неогенски седименти).

При тези условия в годишен разрез присъствието и поведението на подземните води в насипището е изключително динамично. То е свързано основно с продължителността и интензивността на падналите валежи и топенето на снеговете. При по-продължителни дъждове и в периода на снеготопене в насипа се формира водонаситена зона, като нивото на акумулираните в нея подземни води се колебае в широки граници. По време на последното проучване (през месеците декември-януари 2005-2006 г.) то е регистрирано на 5-10 m от повърхността. Единствено при езерото то е на дълбочина 1-2 m. Структурата на формирания в тялото на насипището временен подземен поток се контролира от водосборното езеро. Генералната посока на безнапорния поток е насочена на североизток. Средният хидравличен градиент е сравнително висок – варира в диапазона 0.01-0.05. Предвид ниските филтрационни свойства на насипаните материали, скоростите на филтрация (по Darcy) са ниски – около 3×10^{-3} m/d. Все пак, не бива да се пропуска и

съществуването в горната слабоуплътнена част на насипището (в проницаемия пласт) на ограничени по размери зони с по-висока проницаемост. Тук на дълбочина до 10 m в резултат на ерозионни и суфозионни процеси в отделни части от подповърхностното пространство средата са с по-висока от средната за пласта активна порестост. По тези по-проницаеми зони се дренира и част от вече формираните в насипа подземни потоци, които на по-ниски коти излизат под формата на разсеяни или съсредоточени извори. Тези естествени изходища като явление са изключително краткотрайни и имат незначителни дебити. Впрочем, дори в условията на пълноводие общият разход на подземния поток е не по-голям от 1-3 l/s. В засушливи периоди, при отсъствие на подхранване, акумулираните в тялото на насипището подземни води постепенно се дренират на север-североизток и то остава сухо.

Неогенските седименти (слабо проницаемата зона), върху които е изградено насипището, представлява един много добре издържан в регионален план "водоупор". Те са водонаситени и естествено притежават някаква макар и много ниска проницаемост, която обаче е пречка за протичане на флуиди, респ. на подземни води или на постъпващи от повърхността разтвори (напр. "сметищни" води). Единствено на големи дълбочини в неогенските седименти са установени много слабо водоносни зони, привързани главно към възглещните пластове и прослойки или към отделни пластове от слабоспоени пясъчници. Акумулираните в тези зони подземни води са в съвсем незначителни количества и са практически напълно изолирани едни от други.

Математически моделни изследвания

Главна цел на математическите моделни изследвания е да се прогнозира възможното замърсяване на геоложката основа на площадката "Чукурово – вътрешно насипище" при драстично неспазване на нормативно утвърдената технология за временно депониране на битови отпадъци.

Математическият модел разглежда екстремната хипотеза, според която върху геоложката основа на площадката не е изграден противифилтрационен екран, няма дренажна система за улавяне на "сметищните" води, както и канали за отвеждане на повърхностните води. Предполага се още, че "балираните" отпадъци са с нарушена изолация и изтичащите от тях течни емисии безпрепятствено се инфилтрират в неводонаситената част на насипището (в т. нар. зона на аерация).

Посредством съставения модел се симулират условията за разпространение на силно подвижните замърсители по примера на хлоридните йони. Направената прогноза за развитието и възможния обхват на процесите на замърсяване в подповърхностното пространство в района на обекта обхваща период от 100 години. На основата на моделните решения са оценени и самопречистващите способности на геоложката основа на площадката.

Методика и инструменти за математическо моделиране на миграционните процеси в зоната на аерация

За моделиране на условията за движение на замърсители в зоната на аерация е използвана разработената от Геоложката служба на САЩ (USGS) компютърна програма VS2DTI. Програмата използва числови процедури по крайни разлики за изчисляване на функцията на потока по класическото уравнение на Richards, като връзката между всмукващия потенциал Ψ , съдържанието на влага в почвата ω и коефициента на влагопроводност $\bar{k}$ се моделира посредством функциите предложени от van Genuchten (1980), Brooks and Corey (1964), Haverkamp et al (1977) или чрез таблични стойности. Началните хидравлични условия се специфицират със статичен равновесен профил, със зададен всмукващ потенциал или със зададена влагонаситеност. Граничните условия се симулират чрез задаване по границите на моделната област на стойности (или на функция) на всмукващия потенциал или на общия напор, на разхода, на инфилтрационното подхранване и посредством гранични елементи с възможно протичане. Преносът на вещество се описва чрез числово решаване в крайни разлики на конвективно-дисперсионното уравнение, записано във вида (Bear, 1979):

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \nabla \cdot \theta \bar{D}_h \cdot \nabla c - \nabla \cdot \theta \bar{v} c + SS \quad (1)$$

където: θ е обемната влагонаситеност, [-]; c е концентрацията на съответния замърсител, [ML⁻³]; t е времето, [T]; ∇ е диференциалният оператор $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$, [L⁻¹]; $\bar{D}_h$ е тензорът на хидродинамичната дисперсия, [L²T⁻¹]; $\bar{v}$ е векторът на скоростта на движение на течността, [LT⁻¹]; SS отчита най-общо постъпването или напускането на вещество в или от течната фаза, [ML⁻³T⁻¹].

Подробна информация относно използвания в алгоритъма на компютърната програма VS2DTI математически апарат и методически указания за нейното прилагане са дадени в голям брой литературни източници (Lappala et al., 1987; Healy, 1990; Стоянов, 2005 и др.).

Концептуален модел

Математическият модел за прогнозиране на поведението на замърсителите в зоната на аерация е разработен при следните предпоставки.

Обект на разглеждане е геоложката основа на площадката "Чукурово – вътрешно насипище" по профил II-II (фиг. 2). Профилът е ориентиран по направление юг-североизток. В неговия разрез са отделени три ниско рангови хидрогеоложки единици: проницаем пласт, слабо проницаем пласт и слабо проницаема зона. Тяхната геометрия и филтрационните им характеристики са определени по данни от сондажното проучване и от опитно-филтрационните тестове (Стойнев и др., 2006). Трите хидрогеоложки единици се приемат като еднородни по отношение на филтрационните параметри, тъй като стойностите им в границите на всяка единица варират в много тесни диапазони. Независимо от получените от

автора в лабораторни условия високи стойности за сорбционните свойства на изследваните проби, в модела (с много голям инженерен запас) се приема, че средата въобще не задържа силно подвижните замърсители и те свободно мигрират в подповърхностното пространство. Същевременно, за дисперсивността на изграждащите основата на площадката седименти са използвани стойности, съобразени с цитираните в специализираната литература данни за подобен тип среда (Garabedian et al, 1988; Gelhar et al, 1992 и др.). В табл. 1 са представени зададените в модела средни стойности на филтрационните и миграционните параметри на трите хидрогеоложки единици – обща порестост n , плътност на скелета ρ_d , коефициент на филтрация k , забавящ фактор R_f , надлъжна дисперсивност α_L и коефициент на молекулярна дифузия D_m .

Таблица 1

Филтрационни и миграционни параметри на основните хидрогеоложки единици

ПАРАМЕТЪР	ХИДРОГЕОЛОЖКА ЕДИНИЦА		
	Проницаем пласт	Слабо проницаем пласт	Слабо проницаема зона
n , -	0.36	0.39	0.33
ρ_d , g/cm ³	1.62	1.63	1.83
k , m/d	0.15	0.01	0.002
R_f , -	1	1	1
α_L , m	3.5	1.0	0.75
D_m , m ² /d	2×10^{-4}	4×10^{-4}	5×10^{-4}

Според приетата работна хипотеза, на територията на площадката при отсъствие на противофилтрационен екран, на дренажна система и на канали за отвеждане на повърхностните води, в продължение на 10 години от депонираните отпадъци изтичат "сметищни" води. От всички съдържащите се в тези води различни по вид и концентрация замърсители е уместно да се проследи поведението на хлоридните йони, които поради своята консервативност са изключително подвижни и най-точно маркират границите на възможното замърсяване в подповърхностното пространство.

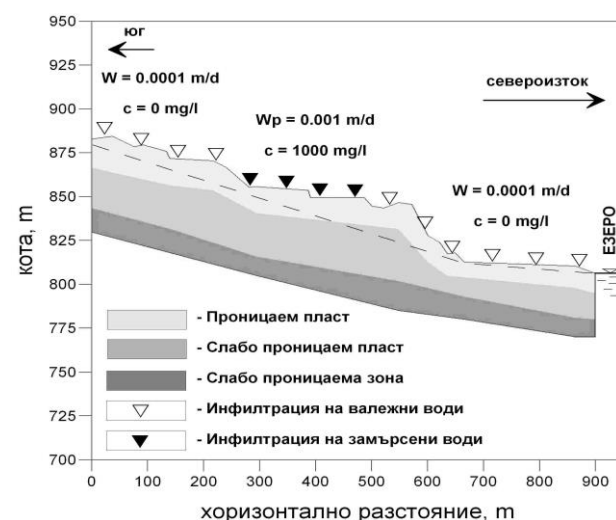
В регионален план от повърхността в дълбочина постъпват около 5-6% от падналите валежи, т.е. скоростта на инфилтрация е $W = 1 \times 10^{-4}$ m/d. Съдържанието на хлоридни йони в инфилтриращите се валежни води е незначително и за тях може да се приеме, че $c_{Cl} \approx 0$ mg/l. Същевременно, се приема (с много голям запас), че постъпващите в продължение на 10 години от територията на площадката "сметищни" води се инфилтрират с 10 пъти по-голяма скорост от валежните – $W_p = 1 \times 10^{-3}$ m/d. При това концентрацията на хлоридни йони в тези води е много голяма – $c_{Cl} = 1000$ mg/l. В модела е прието още, че след първите 10 години изтичането на течни емисии от депонираните отпадъци е ликвидирано, теренът е почистен и от цялата повърхност постъпват единствено чисти води ($c_{Cl} \approx 0$ mg/l) със скорост $W = 1 \times 10^{-4}$ m/d.

При тези начални и гранични условия прогнозата за разпространението на подвижните замърсители е направена в различни моменти от време за период от 100 години. Получените прогнозни решения позволяват да се оцени количествено и самопречистващата способност на геоложката основа.

Композиране на математическия модел

При композирането на модела са използвани компютърна програма VS2DTI и основните положения, представени в концептуалния модел.

Математическият модел е двумерен. С него се симулира поведението на бързите замърсители (по примера на хлоридните йони) в подповърхностното пространство в разреза по профил II-II (фиг. 3). Отделените три ниско рангови хидрогеоложки единици са симулирани с три моделни зони. Всяка моделна зона е зададена с геометрия, филтрационни и миграционни характеристики, отговарящи на реалните обекти (табл. 1). При решаването на филтрационната задача е приета функционалната зависимост на van Genuchten, като за параметрите RMC, α и β са използвани посочените в специализираната литература стойности за подобен тип геоложка среда (Healy, 1990; Lappala et al, 1987; и др.). Границата между неводонаситената и водонаситената зона в разреза е зададена, съобразно средногодишните водни нива в тялото на насипището и котата на водното ниво в езерото. На фиг. 3 тази граница е изобразена с пунктирна линия. При дискретизацията на моделната област е използвана ортогонална мрежа с размери на клетките 1.0x2.5 m.



Фиг. 3. Граници на моделните зони; гранични условия

Времето за симулация е разделено на 100 стрес периода. Всеки период е с дължина 1 година. През първите 10 стрес периода се приема, че от повърхността постъпват замърсени води със скорост на инфилтрация $W_p = 1 \times 10^{-3}$ m/d. Входната концентрация на хлоридните йони е $c_{Cl} = 1000$ mg/l (фиг. 3). В следващите стрес периоди (от 11 до 100) постъпването на замърсители е преустановено и по цялата граница е зададено гранично условие $W = 1 \times 10^{-4}$ m/d и $c_{Cl} = 0$ mg/l, т.е. от повърхността се инфилтрират само чисти валежни води.

Резултати от математическото моделиране

С разработения математически модел в края на всеки стрес период е направена прогноза за размерите и степенята на замърсяване в подповърхностното пространство на площадка "Чукурово – вътрешно насипище". За илюстрация на получените резултати на фиг. 4 са представени четири вертикални карти по съдържание на хлоридни йони. Те дават добра представа за настъпилите промени в концентрационното поле в изчислителни моменти 1, 3, 5 и 10 години, т.е. в условията на непрекъснато постъпване на замърсители от земната повърхност. На фиг. 5 са представени други четири карти – за моменти 25, 50, 75 и 100 години, т.е. след елиминиране на основния източник на замърсяване. Тези карти илюстрират възможното последващо разпространение на замърсителите, при условие че от повърхността се инфилтрират единствено чисти валежни води.

Обсъждане на резултатите от моделните изследвания

Сравнителният анализ на представения на фиг. 4 и фиг. 5 картен материал дава основание да се направи следния коментар относно евентуалните размери и динамиката на процесите на замърсяване на геоложката основа на площадка "Чукурово – вътрешно насипище".

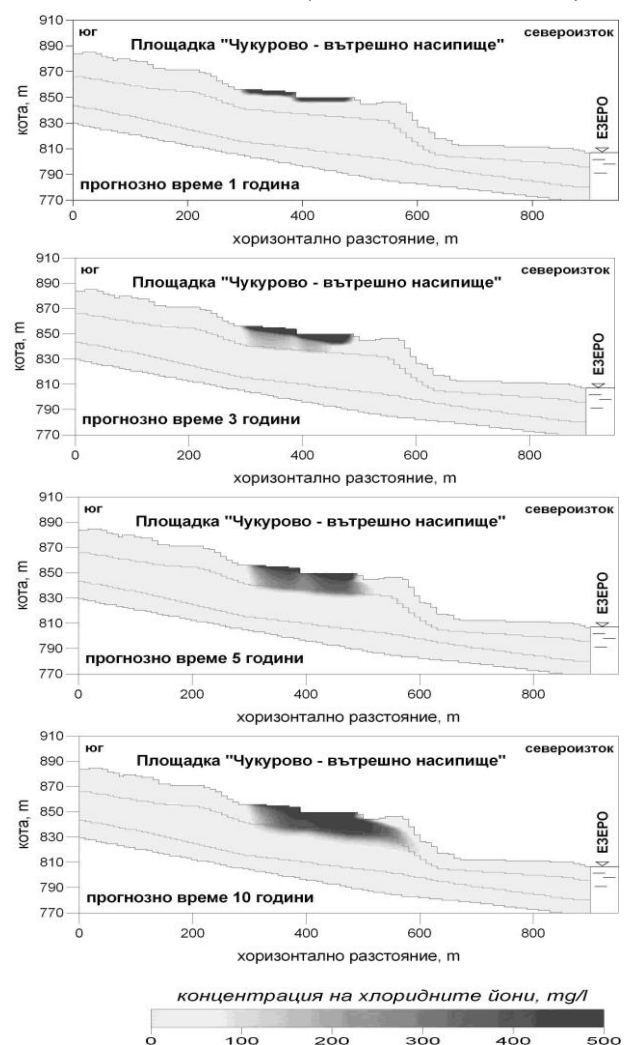
При непрекъснато изтичане на "сметищни" води по цялата площ на бъдещото депо замърсителите ще се инфилтрират в дълбочина, като тяхната концентрация ще расте. Този процес ще протича много интензивно в горните неуплътнени части на насипището, където проникваемостта на средата е относително по-висока. В първите няколко години движението ще е предимно вертикално (фиг. 4). За 2-3 години бързо подвижните замърсители ще напреднат до дълбочина 17-18 m, като постепенно ще започнат да навлизат и в по-уплътнената (долна) част на насипището. Замърсяването ще е по-интензивно в приповърхностната част (до дълбочина 7-8 m), където концентрацията на хлоридните йони ще бъде над 500 mg/l.

През следващите 10 години, в условията на продължаващо навлизане на "свеж" сметищен инфилтрат, замърсената зона ще достигне до дълбочина 25 m. При това, след третата година най-замърсените води ще започнат да се движат и латерално (в североизточна посока), следвайки посоката на подземния поток и релефа на граничната повърхнина между неуплътнената част на насипището и лежащите отдолу по-уплътнените материали (фиг. 4). Фронтът на замърсяване ще напредне със 120-130 m на североизток от границата на депото. През този период най-замърсена ще е горната част на насипището (до дълбочина 17-18 m). Тук се очаква съдържанията на хлоридни йони да са около и над 500 mg/l. В по-дълбоките части на насипището концентрациите ще са ниски – най-често в диапазона 100-200 mg/l.

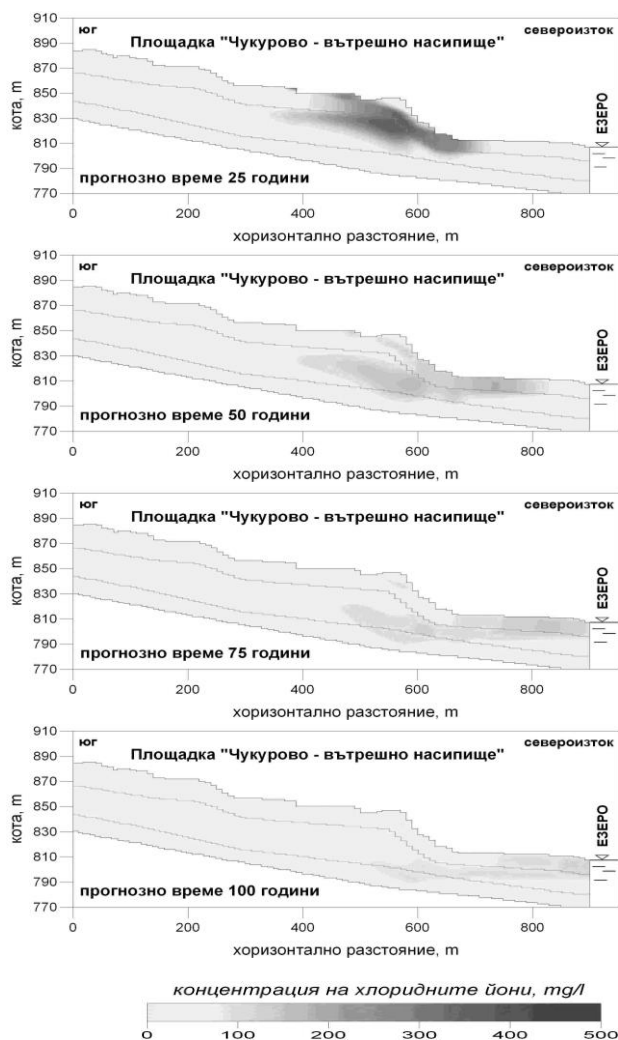
След ликвидиране на повърхностния източник на замърсяване, замърсената вече зона ще продължи да се разширява и да напредва в дълбочина и на североизток, но концентрацията на подвижните замърсители в нея ще

започне рязко да намалява (фиг. 5). Около 1-2 години по-късно част от замърсените подземни води ще започне да се дренира на по-ниска кота (в петата на насипа по целия фронт на подземния поток с ширина около 500 m) под формата на разсеяни или съсредоточени изворчета със сумарен дебит, ненадвишаващ 0.1 l/s. Тези води с концентрации на хлоридни йони 30-40 mg/l ще се оттичат повърхностно към езерото. Същевременно, след около 60-65 години от началото на симулацията замърсените води в тялото на насипището ще започнат да се дренират и подземно в езерото, но и в тях съдържанието на силно подвижни замърсители ще бъде доста ниско – под 50 mg/l. Замърсените води главно по дифузионен път ще проникнат по вертикала и в неогенските седименти – на дълбочина 6-7 m, но концентрациите на замърсителите в тях ще са също незначителни (под 30 mg/l).

В резултат на протичащите процеси на дифузия, дисперсия и смесване (разреждане) на замърсените води с инфилтриращите се валежни води в края на симулационния период (след 100 години) замърсената зона ще се измести на около 100-150 m от североизточния край на площадката (фиг. 5). При това концентрацията на хлоридни йони ще бъде не по-висока от 25-30 mg/l. В един по-дълъг период тези концентрации ще продължат да намаляват, като постепенно ще доближат естествения фон.



Фиг. 4. Разпространение на замърсителите при непрекъснато постъпване на замърсени води от земната повърхност



Фиг. 5. Разпространение на замърсителите след ликвидиране на източника на замърсяване

Направените на базата на математическия модел прогнози дават основание да се предположи, че за дълъг период геоложката основа постепенно ще се изчисти от подвижни и относително консервативни замърсители. Може да се очаква, обаче, че малка част от насипището ще остане или ще бъде впоследствие замърсена с доста широк спектър от по-слабо подвижни конвенционални и приоритетни замърсители (органични съединения, тежки метали и др.).

Следва да се отбележи все пак, че ако се спазват изискванията на законовите и нормативните документи, регламентиращи изграждането и експлоатацията на депата за отпадъци, симулираният с математическия модел сценарий ще е невъзможно да се реализира.

Заклучение

Резултатите от моделните изследвания показват, че и при драстично неспазване на технологията за депониране замърсяването на земната основа в района на площадка "Чукурово – вътрешно насипище" ще е дълготрайно, но с твърде ограничени размери. То ще обхване само части от насипището, като ще засегне много малка част от неогенските седименти (до дълбочина 7-8 m).

"Сметищните" води, които биха се дренирали подземно в ретензионния басейн (езерото) са незначителни като количества и съвсем слабо замърсени.

Следователно, геоложката основа е способна естествено да ограничи разпространението на замърсители и всички изказани опасения за достигане на някакви замърсени води от площадката до яз. "Искър" са несъстоятелни. В хидрогеоложки аспект теренът е подходящ за изграждане на депо за временно депониране на отпадъци.

Литература

- Стойнев, Ст. и колектив. 2006. *Комплексни геоложки, геофизични, инженерно-геоложки и хидрогеоложки изследвания на територията на Република България за определяне на площадки на отпадъци. Резултати от проведените детайлни геологопроучвателни работи на площадка №18 – мина Чукурово – вътрешно насипище*. Док. №551/22.10.2004. Фонд на МОСВ, София.
- Стоянов, Н. 2003. Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци. Дисертация, С., МГУ "Св. Иван Рилски", 215 с.
- Стоянов, Н., Ч. Гюров. 2005. Математически модел за движението на замърсителите в зоната на аерация. – *Геология и минерални ресурси*, 3, 3-8.
- Bear, J. 1979. *Hydraulics of Groundwater*. New York, McGraw-Hill, 569 p.
- Brooks, R. H., A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. – In: *Colorado State University Hydrology Paper*, 3, 27 p.
- Gelhar, L. W., C. Welty, K. R. Rehfeldt. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. – *Water Resour. Res.*, 28, 7, 1955-1974.
- Garabedian, S. P., L. W. Gelhar, M. A. Celia. 1988. Large-scale dispersive transport in aquifers. – In: *Field experiments and reactive transport theory*. Rep. 315, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Haverkamp, R., M. Vaudin, J. Tovina, P. J. Wierenga, G. Vachaud. 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. – In: *Soil Science Society of America Proceedings*, 41, 285-294.
- Healy, R. W. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's computer program VS2D. – In: *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 90-4025*, Denver, Colorado, 125 p.
- Lappala, E. G., R. W. Healy, E. P. Weeks. 1987. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. In: *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 83-4099*, Denver, Colorado, 184 p.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – In: *Soil Science Society of America Proceedings*, 44, 5, 892-898.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Хидрогеология и инженерна геология", ГПФ