

ОЦЕНКА НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ ПО МЕТОДА НА 2D ЕЛЕКТРО-СЪПРОТИВИТЕЛНО ПРОУЧВАНЕ ПО СХЕМАТА ПОЛЮС-ДИПОЛ

Н. Стоянов, Ч. Гуров

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, e-mail: nts@mgu.bg, cg@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Постъпващите във водоносните пластовете замърсители водят до съществени промени в състава на подземните води. Тези промени могат да бъдат с достатъчна точност регистрирани по косвен път чрез прилагането на геоелектрични съпротивителни методи. Най-подходящ за оценка на замърсяването на подземните води е методът на 2D електросъпротивително проучване по схемата полюс-дипол, чиито предимства са високата чувствителност към хоризонтални и вертикални промени в съпротивлението на средата, много доброто хоризонтално покритие и немалката дълбочина на проучването. Оценката се прави като по данни от полевите измервания се определят истинските съпротивления в подповерхностното пространство. Геоелектричният модел се трансформира в модел на замърсяването на водоносната структура посредством локални критерии, определящи връзката между съпротивление на средата и промените в състава на подземните води. Този подход е използван за оценка на замърсяването на неоген-кватернерния водоносен комплекс в района на депото за битови отпадъци на гр.Пловдив. Измерванията са направени по 5 профила с обща дължина около 2500 m. Разрезите на реалните съпротивления по профилите са трансформирани във вертикални карти на замърсяването на подземните води, като достоверността на направените интерпретации е потвърдена чрез химически анализи на водни проби от различни точки на водоносния комплекс.

THE APPLICATION OF 2D ELECTRORESISTIVITY SURVEY USING POLE-DIPOLE ARRAY FOR ESTIMATING GROUNDWATER CONTAMINATION

N. Stoyanov, C. Gurov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: nts@mgu.bg, cg@mgu.bg

ABSTRACT. Contaminants penetrating aquifers lead to substantial changes in the groundwater content. These changes could be indirectly registered with adequate precision by the geoelectrical resistivity methods. The most suitable technique for estimating of groundwater contamination is the 2D resistivity survey with pole-dipole array. The advantages of this method are the high sensitivity towards horizontal and vertical changes in the section resistivity, very good horizontal coverage and considerable depth of surveying. Field measurement data are used for defining the true resistivity values of the subsurface section. Afterwards, obtained geoelectrical model is transformed into a model of the aquifer's contamination by the application of local criteria characterizing the relation between section resistivity and changes in the groundwater content. Proposed approach is applied for estimating the contamination of the Neogene-Quaternary aquifer complex in the region of Plovdiv sanitary landfill. Field measurements are performed along five lines with a total length of about 2500 m. Obtained resistivity sections along the lines are transformed into vertical maps of groundwater contamination. Reliability of performed interpretation is confirmed through chemical analysis of water samples taken from different points of the aquifer.

Въведение

За установяване и предварителна оценка на степента на замърсяване на подземните води, най-подходящи са електросъпротивителните методи, с които може доста точно да се регистрират промените в концентрационното поле в една водоносна структура. Те позволяват посредством измервания на земната повърхност да се определи действителното разпределение на електрическите съпротивления в подповерхностното пространство. Получената картина интегрално отразява характеристиките на средата (минерален и зърнометричен състав; пористост; степен на водоносителност на скалите; химичен състав на флуидите, респ. на подземните води). Във водоносната среда, относително еднородна по отношение на състава и проникваемостта на твърдата фаза, регистрираните различия в съпротивления се дължат основно на различията в йонния състав и общата минерализация на подземните води. На тази основа във водоносните структури могат да се установят и диференцират зони с различна степен на замърсяване (Стоянов, 2004).

До преди десет години от електросъпротивителните методи най-широко приложение намираха методите, използващи едномерен (1D) модел на геоложката среда – вертикалното електрическо сондиране (ВЕС) и електропрофилирането. Техните най-сериозни ограничения са, че могат да регистрират измененията на съпротивленията единствено по вертикала (ВЕС) или по хоризонтала (ЕП). На практика, обаче, наличието на замърсени зони в подземната хидросфера е причина на къси разстояния съпротивленията да се променят доста бързо не само в дълбочина, но и латерално. Ето защо, точното установяване и прецизната оценка на явленията изисква прилагането на методите на двумерното (2D) или тримерното (3D) електропроучване. Досегашното им използване бе ограничено от липсата на подходящо полево оборудване и на подходящи средства за интерпретацията на значително по-сложните 2D и 3D модели. С въвеждането на многоелектродните разстановки (Griffiths et al., 1990) и компютърните програми за бързо решаване на обратните (идентификационните) задачи (Loke, 1999), тези методи се налагат като стандарт при решаването на редица практически задачи. Ще отбележим, че поради значителни трудности при полевите

измервания, както и недостатъчната ресурсна обезпеченост за решаване на обратната задача при 3D моделите, преобладаващо приложение има 2D проучването. Без да отстъпва много по точност на решението, при подходящо разположение на профилите то дава добра представа за пространственото разпространение на замърсителите в подземната хидросфера.

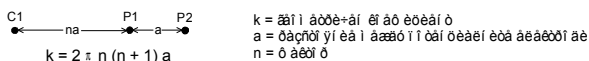
Методика на изследването при 2D електросъпротивителното проучване

Същност и особености на метода

При метода на 2D проучването (томографията) измерването на съпротивленията в подповърхностното пространство се извършва чрез въвеждане на електричен ток в земята с помощта на два ذخарнаващи (токови) електрода (C1 и C2) и регистриране на предизвиканата потенциална разлика в два приемни (потенциални) електрода (P1 и P2). Най-често използваните схеми за разположение на електродите са схемите *Wenner*, *дупол-дупол*, *Wenner-Schlumberger*, *полюс-полюс* и *полюс-дупол*. Изборът на електродна схема зависи от характерните особености на изследвания обект, от чувствителността на регистриращата апаратура и от нивото на фоновия шум. Различните схеми се сравняват според чувствителността им към хоризонтални и вертикални промени в съпротивлението на средата, дълбочината на проучване, хоризонталното покритие на данните и интензитетът на регистрирания сигнал.

Във водоносните структури замърсителите се разпространяват не само хоризонтално (по посока на подземния поток), но и в дълбочина, вследствие плътностните разлики между незамърсените и замърсените води. В разрез замърсените зони са тела с неправилни форми, силно удължени по посока на движението на подземните води. В резултат на процесите на хидродисперсия, дифузия, сорбция и елиминиране на вещество границата между замърсените и незамърсените води е силно размита. Тези особености на изследвания обект изискват използваната електродна схема да има на първо място висока чувствителност към хоризонталните и към вертикалните промени в съпротивлението на средата. Големи са изискванията и към хоризонталното покритие, а в повечето случаи и към дълбочината на проучване.

Сравняването на основните характеристики на различните електродни схеми показва, че най-подходяща за подобен вид изследвания е *схемата полюс-дипол* (фиг.1). Тя е доста чувствителна към хоризонтални и вертикални промени в съпротивлението на средата, има много добро хоризонтално покритие и немалка дълбочина на проучването.

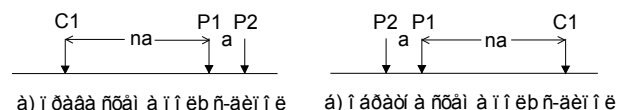


Фиг. 1. Електродна схема полюс-дипол

Схемата полюс-дипол изисква отдалечен електрод (C2), който трябва да бъде разположен достатъчно далеч от измервателната линия (в "безкрайността"). Според Loke (1999), ако той е разположен на разстояние 5 пъти по-голямо от максималното разстояние C1-P1, грешката от пренебрегването му ще е по-малка от 5%.

Важна особеност на схемата е, че силата на сигнала намалява с квадрата на фактора n . Затова не се препоръчва за n да се използват стойности по-големи от 8-10. Над тази граница, за получаване на по-голям интензитет на регистрираната потенциална разлика, е необходимо да се увеличи разстоянието a .

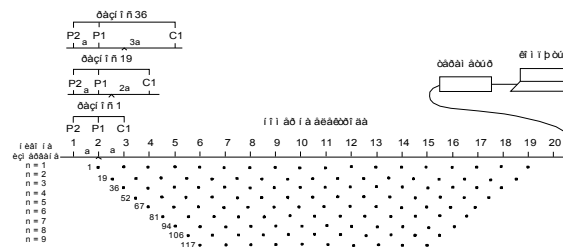
Главният недостатък на схемата полюс-дипол е нейната несиметричност (фиг.2, а), поради което над симетрични структури се получават асиметрични аномалии на привидното съпротивление. Тази асиметрия може да се елиминира, като измерванията се повторят при обратно разположение на електродите (фиг.2, б).



Фиг. 2. Права и обратна схема на разположение на електродите

Методика на полевите измервания

При полевите измервания се използват голям брой електроди, които са свързани към многожилен кабел (Griffiths and Barker, 1993). Тяхното разположение и последователността на работа по един профил е представено на фиг. 3. Най-често разстоянието между съседните електроди е постоянно. Измерванията се правят с резистивиметър, като при всеки отчет посредством механично или електронно устройство се избират подходящите четири електрода. Данните от измерванията и координатите на електродите, при които те са направени, се записват в текстов файл с цел последващо въвеждане в компютър за обработка.



Фиг. 3. Разположение на електродите и последователност на измерванията при схемата полюс-дипол

Възможната последователност на работа с многожилен кабел с 20 електрода е илюстрирана на фиг. 3. Разстоянието между съседните електроди е a . Вторият токов електрод C2 е поставен на разстояние 5 пъти по-голямо от максималното разстояние C1-P1. Първото измерване се извършва с електроди 1, 2 и 3. Електрод 1 е вторият приемен електрод P2, електрод 2 е първият приемен електрод P1, а електрод 3 се използва като първи токов електрод C1. При второто измерване електродите 2, 3 и 4 се използват съответно като P2, P1 и C1. Тази процедура се повтаря докато електроди 18, 19 и 20 се използват при последното измерване с разстояние $1a$, т.е. при стойност 1 за фактора n . След завършване на цикъла измервания с разстояние $1a$ се пристъпва към следващия цикъл, при който $n = 2$. При последващите измервания n факторът се увеличава до максималната си стойност от 9. За да се повиши дълбочината на проучването, разстоянието между съседните

електроди се увеличава на 2а и се прави нова серия от измервания с различни стойности на фактора n .

За да се увеличи областта на хоризонтално покритие, особено при малък брой електроди, след извършване на измерванията, кабелът се придвижва по посока на единия край на профила на разстояние, кратно на единичното разстояние между електродите. Всички измервания, които включват неприпокриващи оригиналния край на профила електроди, се повтарят.

Определяне на действителните съпротивления в подповърхностното пространство

По данните от полевите измервания действителните съпротивления в подповърхностното пространство е възможно да се определят с помощта на компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001). За целта от измерените с полевата апаратура съпротивления се преминава към привидни съпротивления. Като входни данни се въвежда записаната в текстов файл информация за положението на електродите на повърхността и за стойностите на привидното съпротивление във всяка точка. На тази основа се съставя 2D модел на средата, като програмата автоматично поделва подповърхностното пространство на голям брой блокове. След това по метода на най-малките квадрати определя съпротивлението на всеки блок по такъв начин, че изчисленото привидно съпротивление от модела да съвпада възможно най-добре с измереното електрично поле (de Groot-Hedlin and Constable, 1990; Loke and Barker, 1996).

Като краен резултат от интерпретацията на данните от 2D проучването програмата дава три вертикални карти (разреза): псевдоразрез с измерените привидни съпротивления; псевдоразрез с изчислените чрез модела привидни съпротивления; и разрез с изчислените посредством модела действителни съпротивления, съставен чрез интерполация на определените с 2D модела съпротивления за всеки моделен блок. Сравнението на първите два разреза илюстрира достоверността на моделното решение, а третият разрез дава реалното разпределение на електричните съпротивления в подповърхностното пространство.

Трансформирането на резултатите от 2D проучването в модел на замърсяването на изследваната водоносна структура се прави на базата на локални критерии, даващи връзката между електричното съпротивление на средата и промените в състава на подземните води, настъпили в резултат на навлизането на замърсителите. Методическата основа и техниката за извеждане на локални геоелектрични критерии за конкретен обект е подробно представена в (Стоянов, 2004).

Модел на замърсяването на неоген-кватернерния водоносен хоризонт в района на ДБО Пловдив

Депото за битови отпадъци (ДБО) на гр. Пловдив се намира на 12 km западно града. То е изградено в деснобрежната тераса на р. Марица, на 1 km преди вливането на р. Въча. През 70-те и 80-те години в стари баластриерни изкопи са насипвани отпадъците на гр. Стамболийски, а от 10-15 години на тази територия започват да се депонират и битовите отпадъци на гр. Пловдив. Организирането на това т.нар. "градско сметище" първоначално е било твърде при-

митивно и е довело до безконтролно изтичане на сметищни води (инфилтрат), които прониквайки в дълбочина са предизвикали мащабно замърсяване на неоген-кватернерния водоносен комплекс. От 5-6 години се изпълнява нов проект за експлоатация на депото, който е напълно съобразен със съвременните изисквания за изграждане на подобен тип съоръжения и предвижда и предепониране на старото депо. Дъното на новите котловани е покрито със защитен двуслоен екран, над който е изграден дренаж за събиране и отвеждане на инфилтратата в два утайни басейна извън сметищното тяло. Изградена и система от наблюдателни кладенци и речни пунктове за локален мониторинг на подземните и повърхностните води.

Неоген-кватернерният водоносен комплекс е една от най-водообилните структури в България. Той е изграден от чакъли, пясъци и глини, чиято обща дебелина в района на депото не надвишава 40-50 m. За долен служат лежащите под тях горнокредни гранодиоритови порфири. В границите на водоносния комплекс са отделени два водоносни хоризонта – горен и долен. Разделящият водоупорен пласт е представен от глини и пясъчливи глини. Установените в него прекъсвания (т.нар. "хидрогеоложки прозорци") създават условия за пряка хидравлична връзка и възможност за масообмен между горния и долния водоносен хоризонт.

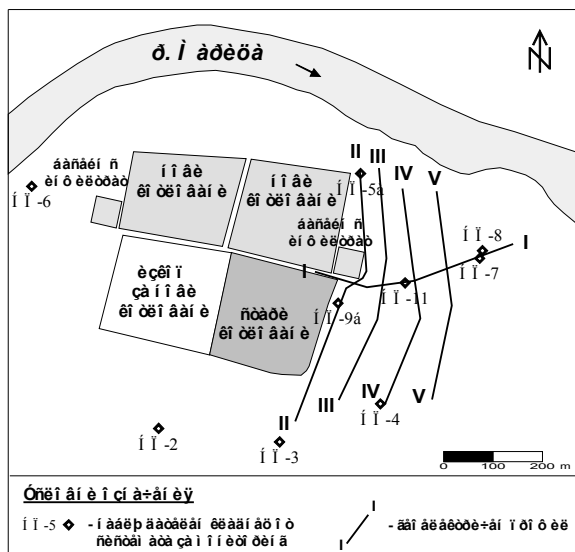
Структурата на подземния поток в неоген-кватернерния комплекс предполага, че постъпващите от депото замърсители се разпространяват на изток, по посока на движението на подземните води и в дълбочина в резултат на различията в плътността на замърсените и на незамърсените води. Резултатите от мониторинга потвърждават изказаната хипотеза, но ограниченият брой на наблюдателните сондажи не позволява да се направи по-точна оценка на пространствените параметри на това явление.

Ето защо, от авторите е потърсен алтернативен подход за съставяне на актуален модел на замърсяването в неоген-кватернерния водоносен комплекс. В изпълнение на това намерение през лятото на 2002 г. в района на изток от депото е проведено 2D проучване по схемата полюс-дипол. Използвана е система от 11 електрода, които са съединени с многожилен кабел и са разположени по един профил. Разстоянието между съседните електроди е 10 m. Тази схема обезпечава около 40 m дълбочина на проучване. Измерванията са направени с резистивиметър *ABEM Terrameter SAS 300B*. Главният недостатък на използваната схема (нейната несиметричност) е елиминиран като всички измервания са повторени при обратно разположение на електродите. Областта на хоризонтално покритие е увеличено като многожилният кабел е придвижван по посока на единия край на профила на разстояние равно на разстоянието между два съседни електрода – 10 m.

Измерванията са направени по 5 профила с обща дължина около 2500 m. Първият профил е ориентиран по направлението на подземния поток и следва линията, свързваща наблюдателни кладенци НП-9б, НП-11, НП-7 и НП-8. Другите четири профила са разположени напречно на посоката на движение на подземните води, на около 50-80 m един от друг. Местоположението на профилите, наблюдателните кладенци и контурите на новите и старите котловани на ДБО Пловдив към датата на проучване е определено с GPS и е илюстрирано на фиг. 4.

Данните от полевите измервания са интерпретирани с компютърна програма RES2DINV. Като входни данни в програмата е въведена информация за координатите на

електродите и за стойностите на привидното съпротивление във всяка точка от псевдоразреза, получени след предварително преизчисляване на измерените с полевата апаратура съпротивления.

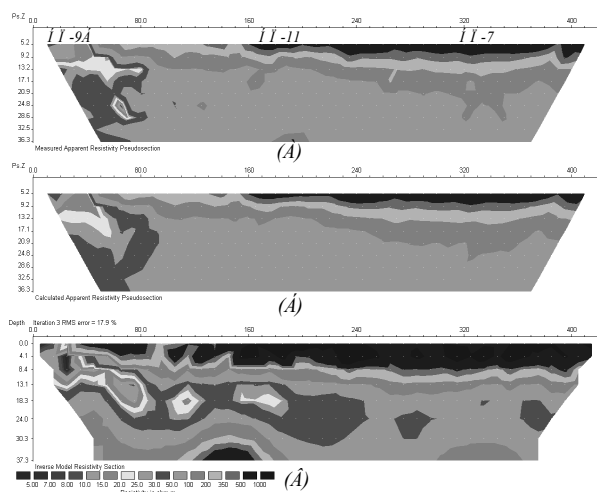


Фиг. 4. Местоположение на геоелектричните профили и контури на старите и новите котловани на ДБО Пловдив към юни 2002 г.

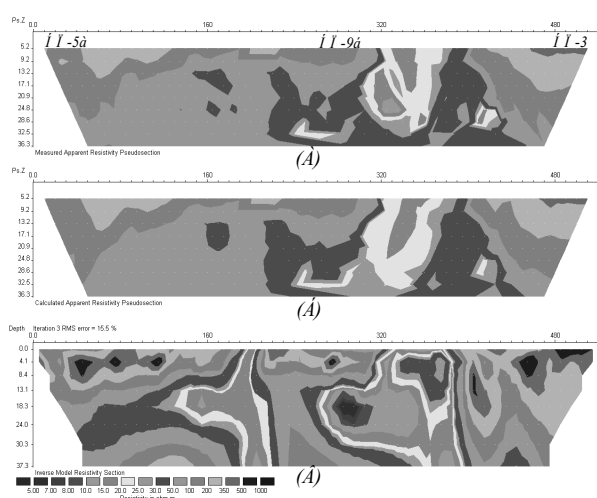
Като краен резултат от обработката на първичните данни за всеки профил са получени по 3 вертикални карти – А, Б и В (фиг. 5). Първата карта (А) представлява псевдоразрез на измерените в полеви условия привидни съпротивления, втората карта (Б) е псевдоразрез на изчислените чрез модела привидни съпротивления, а третата карта (В) дава разреза на изчислените посредством модела истински съпротивления. Достоверността на моделното решение се илюстрира чрез сравнение на псевдоразрезите (А и Б) и се определя количествено посредством изчислената от програмата средноквадратичната грешка RMS. Сравняването на получените псевдоразрези за всички профили показва една добра съпоставимост между измерените и изчислените привидни съпротивления, което гарантира надеждността на интерпретацията.

За облекчаване на хидрогеоложката интерпретация, зададената в програмата скала на изомните граници, по която са изчертани вертикалните карти, е съобразена с изведените от Стоянов (2004) локални геоелектрични критерии. Повечето от избраните диапазони, особено в долната част на скалата, отговарят на стойностите на съпротивленията, които определят вероятните граници между незамърсените и замърсените води, както и контурите на зони с различна степен на замърсеност.

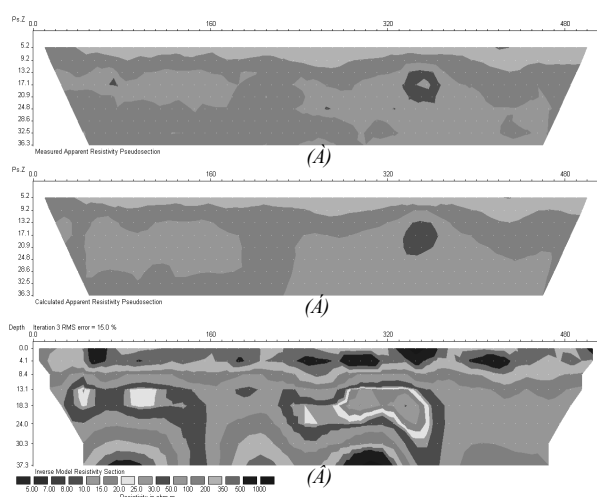
По данни за реалното геоелектрично поле, илюстрирано с разрезите на действителните съпротивления по петте профила (фиг. 5), са съставени пет вертикални карти на замърсяването в неоген-кватернерния водоносен комплекс (фиг. 6).



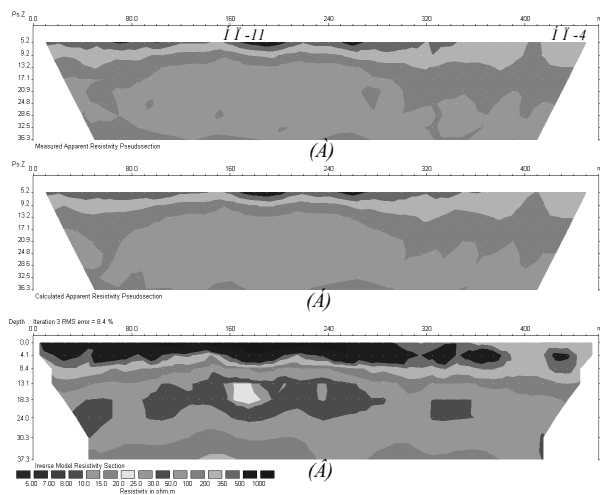
Фиг. 5 а. Резултати от обработката на данните по профил I-I



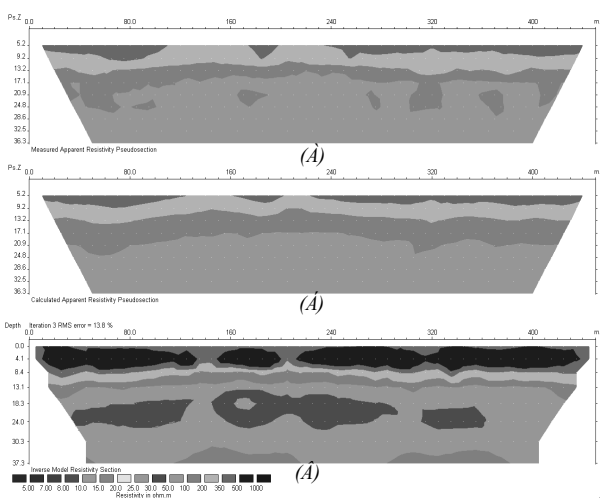
Фиг. 5 б. Резултати от обработката на данните по профил II-II



Фиг. 5 в. Резултати от обработката на данните по профил III-III



Фиг. 5 г. Резултати от обработката на данните по профил IV-IV



Фиг. 5 д. Резултати от обработката на данните по профил V-V

На фиг. 6 незамърсените части на водоносната структура са неоцветени, а с различни нюанси на сивия цвят в замърсената зона са оцветени няколко подзони с различна степен (процент) на замърсеност на подземните води.

За изготвянето на вертикалните карти на замърсяването са използвани лабораторно изведените локални геоелектрични критерии – вж. табл. 2 в (Стоянов, 2004). За проверка достоверността на направените интерпретации по време на полевите измервания са взети водни проби от всички наблюдателни кладенци, през които преминават профили (НП-3, НП-5а, НП-7, НП-8, НП-9а и НП-11). Представените в табл.1 данни за общата минерализация и за концентрацията на хлоридните йони в тези пунктове убедително потвърждават достоверността на представения на фиг. 6 модел на замърсяването на неоген-кватернерния комплекс.

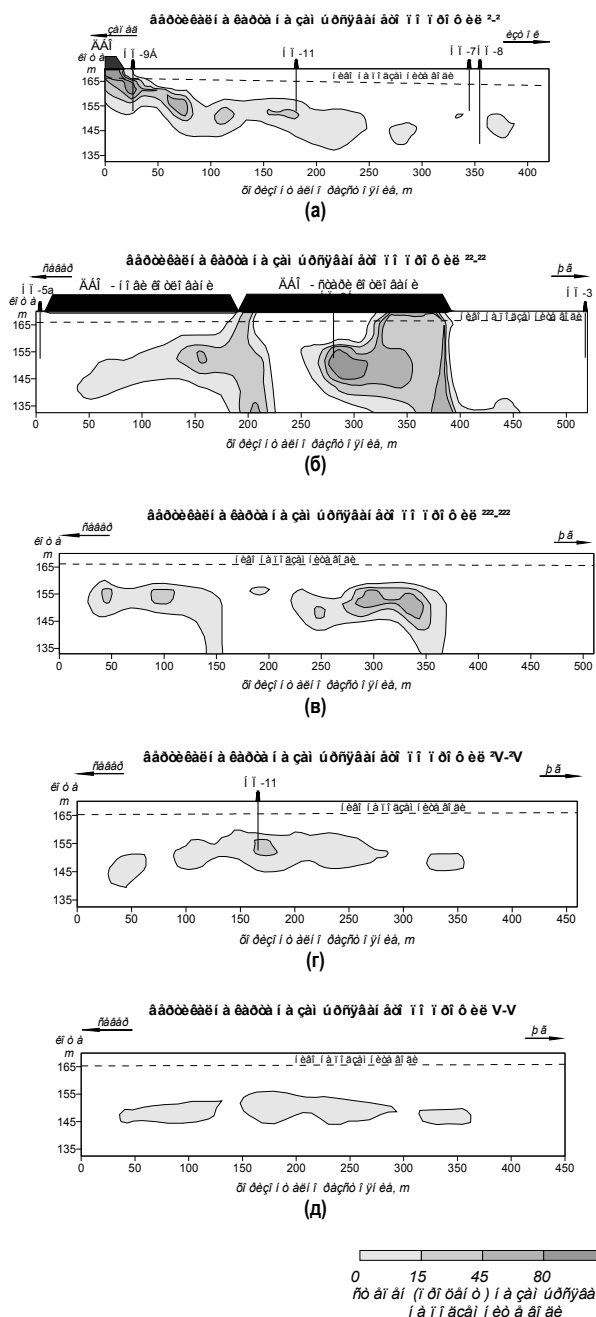
При интерпретацията на получените резултати е необходимо да се отчете едно важно обстоятелство, което е свързано с експлоатацията на обекта. Към момента на геоелектричното проучване, отпадъците от старото сметище на гр.Стамболийски, както и голяма част от старото депо са предепонирани в новите котловани. Поради това следва да се очаква, че в подземните води ще постъпва свеж сме-

тищен инфильтрат единствено в района на старите котловани.

Таблица 1.

Хидрохимична характеристика на водните проби (към месец юни 2002 г.).

Наблюдателен кладенец	Обща минерализация, mg/l	Съдържание на Cl, mg/l
НП-3	422	20.5
НП-5а	479	21.8
НП-7	465	18.5
НП-8	391	12.2
НП-9б	2175	398.6
НП-11	1048	143.2



Фиг. 6. Вертикални карти на замърсяването на подземните води

Анализът на получените по всеки профил разрези на разпределението на действителните съпротивления (фиг.

5) и на съставените вертикални карти по замърсяването на подземните води (фиг. 6) дава основание да се направи следния интерпретативен коментар относно пространствените размери и степента на замърсяване на подземните води в района на депото.

- (1) Замърсяването в проучвания район заема една значителна по площ територия, която в източна посока достига до 250-300 m от границата на депото. В посочените рамки то обхваща фронт с ширина около 300-350 m, който е установен във всички напречни на подземния поток разрези. На по-големи разстояния по профил I-I замърсяването на подземните води се регистрира под формата на отделни петна (фиг. 6а).
- (2) В дълбочина замърсената зона доминира в интервала от 10 до 25 m от терена, т.е. в посочената територия тя обхваща почти изцяло горния водоносен хоризонт и част от долния хоризонт. В отделни участъци по профили II-II и III-III се установява локално замърсяване и на по-голяма дълбочина.
- (3) В така рамкираната в план и разрез зона на замърсяване се очертават няколко подзони с различна степен на замърсеност. Наблюдаваната диференциация е най-отчетлива под и в непосредствена близост до старите котловани, където процесите на замърсяване са най-интензивни. Разрезите по профили I-I и II-II показват, че в тези участъци се очертават четири подзони, в които степените на замърсеност варират от 15 до 100 % (фиг. 6а и фиг. 6б).
- (4) Нискоомните зони контактуват с дъното на депото, което потвърждава изказаната възможност, че и към момента на проучването от старите котловани постъпва сметищен инфильтрат. Разрезът по профил II-II илюстрира пътищата на проникване на инфильтрата. В дълбочина замърсените зони постепенно се разширяват, като на около 20 m от повърхността замърсяването е с най-голямо хоризонтално разпространение и с максимална интензивност. На това ниво водоупорният пласт, маркиращ границата между горния и долния водоносен хоризонт, значително ограничава мащабното проникване на замърсителите на по-голяма дълбочина. Ето защо, замърсяването на подземните води обхваща предимно горния хоризонт. Впрочем, това се потвърждава и от разрезите по останалите профили (фиг. 6). Само в отделни участъци се установява частично замърсяване и на долния хоризонт. Този процес е най-изявен на разрезите по профили II-II и III-III, където през хидрогеоложки прозорци замърсителите безпрепятствено преминават в дълбочина и най-вероятно достигат до долния водоупор.
- (5) Разрезът по профил I-I показва, че в план замърсителите мигрират на изток, следвайки посоката на подземния поток. Това се потвърждава и от установената в разрезите по напречните профили тенденция на относително запазване на контурите на замърсената зона при намаляваща в източна посока степен на замърсяване.
- (6) Измерените съпротивления в подповърхностното пространство извън замърсената зона също варират

в доста широки граници (от 50 до 1000 Ω .m). Установените в най-горната част на разрезите по всички профили високоомни зони маркират сухите пясъци от зоната на аерация. Под тях следват няколко пласта с постепенно намаляващи в дълбочина съпротивления от 500 до 100 Ω .m. Тази сравнително високоомна зона показва, че подземните води в приповърхностната част на водоносната структура са незамърсени и вероятно с по-ниска минерализация, вследствие на инфилтрационното подхранване. В най-долните части на разрезите по всички профили са установени пластове с нарастващи в дълбочина съпротивления от 100 до 350 Ω .m, т.е. в рамките на долния хоризонт, подземните води са незамърсени. Тук в отделни участъци по профили I-I и III-III са регистрирани и доста високи съпротивления (около и над 500 Ω .m), които не е изключено да маркират издигнатите части от скалната подложка.

Заклучение

Съставеният посредством прецизна интерпретация на получените резултати пространствен модел на замърсяването дава много добра представа за обхвата и тенденциите на негативните процеси в неоген-кватернерния комплекс. С него нагледно се илюстрира ефективността от прилагането на метода на 2D проучването по схемата полюс-дипол за количествена оценка на замърсяването на подземните води от ДБО. Този метод с успех може да се прилага и за решаването на други подобни задачи, при които замърсяване на изследваната водоносна структура е довело до резки промени в състава на подземните води и от там в реалното разпределение на електричните съпротивления в подповърхностното пространство.

Литература

- Стоянов, Н. Т. 2004. Метод за дефиниране на локални геоелектрични критерии за оценка на замърсяването на подземните води". *БУЛАКВА*, 2 (под печат).
- de Groot-Hedlin, C., S. Constable. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Griffiths, D. H., J. Turnbull, A. I. Olayinka. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8, 121-129.
- Griffiths, D. H., R. D. Barker. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Loke, M. H., R. D. Barker. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M. H. 1999. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Penang, Malaysia, p. 57.
- Loke, M. H. 2001. *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, p. 96.