Application of electrical tomography for determination and characterization of prominent areas for extraction of groundwater

Stefan Dimovski[1], Nikolay Stoyanov[2], Ivailo Ivanov[3]

1 - University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; dimovski@mgu.bg
2 - University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; nts@mgu.bg
3 - University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1046 Sofia; bulgeo@dir.bg

Key words: electrical tomography, near-surface geophysics, hydrogeological models, groundwater

Abstract
The proposed geoelectrical approach for determination and characterization of prominent areas for extraction of groundwater is based on the different electrical resistivity properties of these zones in comparison to those of the remaining parts of the rock massif. The same characteristic can be applied with high credibility for the differentiation of sub-surface areas with different water saturation and water abundance, which is a very important benchmark in the search for promising sites for construction of water wells. The high efficiency of the proposed approach for mapping prominent zones is illustrated by the results of the performed electrical tomography study in the area of the state hunting grounds Palamara, located in Northeast Bulgaria in the heart of the Ludogorie Mountain. The presented results confirm the applicability of the proposed methodology for measurement, data analysis and interpretation.

Приложение на електротомографията при определяне и характеризиране на перспективни участъци за добив на подземни води

Стефан Димовски [1], Николай Стоянов [2], Ивайло Иванов[3]

1 - Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; dimovski@mgu.bg
2 - Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; nts@mgu.bg
3 - Университет по архитектура, строителство и геодезия, 1046 София; bulgeo@dir.bg

Ключови думи: електротомография, приповърхностно картиране, хидрогеоложки модели, подземни води

Въведение

Предимството на геофизичните методи се обуславя от възможностите за получаване на данни от непрекъснати последователности за определени интервали или обеми в пространството или в определени периоди от време. При това получаваната информация е за естествени условия на разположение на скалите и се осигурява двумерно (2D) и тримерно (3D) изследване на геоложкия разрез.

Електротомографията намира все по-широко приложение за картиране на приповърхностния геоложки разрез. Това е метод, който бързо се развива през последните десетилетия и се базира върху използването на съвременна апаратура, оптимална методика на измерване и компютърна обработка на данните. (Griffiths, D. H., Barker, R. D., 1993; Loke, M. H., Barker, R. D., 1996).

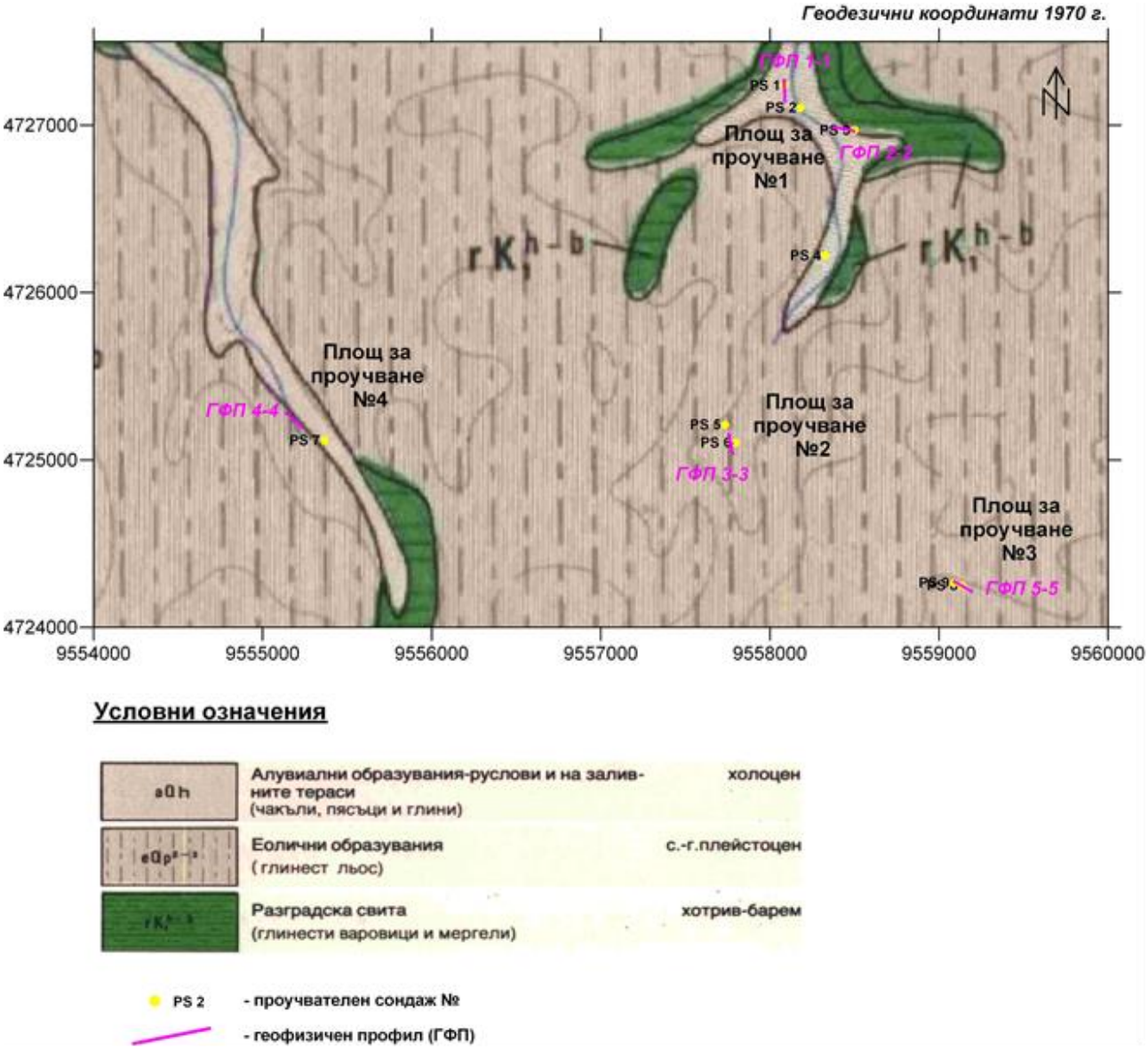
Регистрираното разпределение на специфично електрично съпротивление в подповърхностното пространство е еднозначно отражение на степента на проява на йонна електропроводимост (Daniels F., Alberty, R. A., 1966). Анализът на установените геоелектрични разрези са добра основа за по-точна и детайлна количествена оценка на геоложките, хидрогеоложките и инженерногеоложките условия на изследваната част от природната среда.

Проведените от нас изследвания през последните 10-15 години ни убедиха в безспорните предимства на електротомографските методи за детайлно изучаване на приповърхностния геоложки разрез. Комплексното им прилагане с различни други методи и техники дава възможност за много по-прецизно диференциране и пространствено картиране на границите на геоложки или хидрогеоложки единици, окарстени или напукани зони, зони с различна водонаситеност и водообилност, зони с различна степен на техногенно или природно замърсяване обекти и др. (Димовски и др. 2007, Димовски 2010, Димовски и Стоянов 2010, 2011, 2015, Димовски и др. 2012, Стоянов 2003, Стоянов 2004, Стоянов и Гюров 2004, и други).

Приложимостта на електротомографията при определяне и характеризиране на перспективни участъци за добив на подземни води ще илюстрираме с представените по-долу резултати от изпълненото от нашия екип електротомографско проучване в района на ловно стопанство (държавна дивечовъдна станция) „Паламара".

Кратка информация за изследвания обект

Геоложкият строеж в района на ловно стопанство „Паламара" е относително прост (Фигура 1). Приповърхностният разрез до дълбочина 20-30 m е представен от кватернерна покривка и долнокредна скална подложка (Филипов и Дечева, 1994).



Фигура 1. Геоложка карта в района на държавно ловно стопанство „Паламара" (по Геоложка карта на България в М 1:100000, Картен лист Разград. 1992. ГИ БАН, Геология и Геофизика АД)

Кватернерната покривка е изградена от алувиални наслаги (глини, пясъци и чакъли) и еолични образувания (глинест льос и льосовидни глини).

Доминиращо присъствие имат еоличните образувания, които в преобладаващата част от разглежданата територия лежат директно върху скалната подложка. Дебелината на льосовия комплекс обикновено варира в диапазона между 5 и 20 m. Еоличните материали имат твърде хетерогенен състав – от льос с голямо съдържание на глинеста компонента до песъчливи глини.

Алувиалните образувания имат доста ограничено присъствие на територията на ловното стопанство. Те запълват негативни ерозионни форми на релефа – сухи долове и малки речни долини. Алувиалният разрез е представен от глини, песъчливи глини, глинести пясъци и в различна степен заглинени чакъли и пясъци. Общата дебелина на тези материали е около 7-8 m и повече. На места алувиалните наслаги са припокрити от преотложен льос, глини с голямо присъствие на органично вещество, тини, опочвени глини и почви.

Долнокредната скална подложка е изградена от теригенно-карбонатните седименти на Разградската свита, представени основно от мергели и глинести варовици. В горната си част скалите са напукани и силно изветрели, а пукнатините са запълнени с глинести материали. Средната дебелина на по-интензивно засегнатата от вторични процеси зона е около 5-10 m.

Разглежданата част от подповърхностното пространство на територията на ловно стопанство „Паламара" притежава ограничени водни ресурси. Основен колектор на подземни води са алувиалните наслаги, запълващи понижените релефни форми. Формираният в тях кватернерен водоносен хоризонт е слабо- до средно-водообилен. Нивото на подземните води е на 2-3 m от земната повърхност. За долен водоупор служат мергелите от Разградската свита.

Степента на водообилност на водоносните пластове и зони е пряко свързана с литофациалните характеристики на филтрационната среда. Слабоводообилните части се свързват с доминантното присъствие на финнозърнести и глинести фракции, а по-високата водообилност е характерна за едрозърнестите материали. Ето защо, изграждането на съоръжения за добив на подземни води в района на ловното стопанство трябва да се предшества от едно по-детайлно комплексно проучване, което да установи площното разпространение и дълбочината на залягане на по-слабо заглинените, респективно по-водообилните пластове и зони.

Цели на проучването

Целите на проведеното геоелектрично 2D проучване са следните:

(1) Диференциране на по-водообилни участъци в границите на посочените от възложителя перспективни за добив на подземни води площи. Въз основа тази предварителна информация да се детерминират оптималните места за изграждане на проучвателни сондажи и кладенци.

(2) Разработване на детайлен хидрогеоложки модел на изследваната част от подповърхностното пространство (до дълбочина 17-18 m) чрез съвместна интерпретация на геоелектричните разрези и резултатите от проведените сондажни проучвания и филтрационни тестове in situ. По-конкретно така разработеният хидрогеоложки модел трябва да даде представа за:

- границите на отделените в разреза литоложки разновидности;
- границата между кватернерната покривка и скалната подложка;
- нивото на подземните води;
- пластове и зони с различна водообилност.

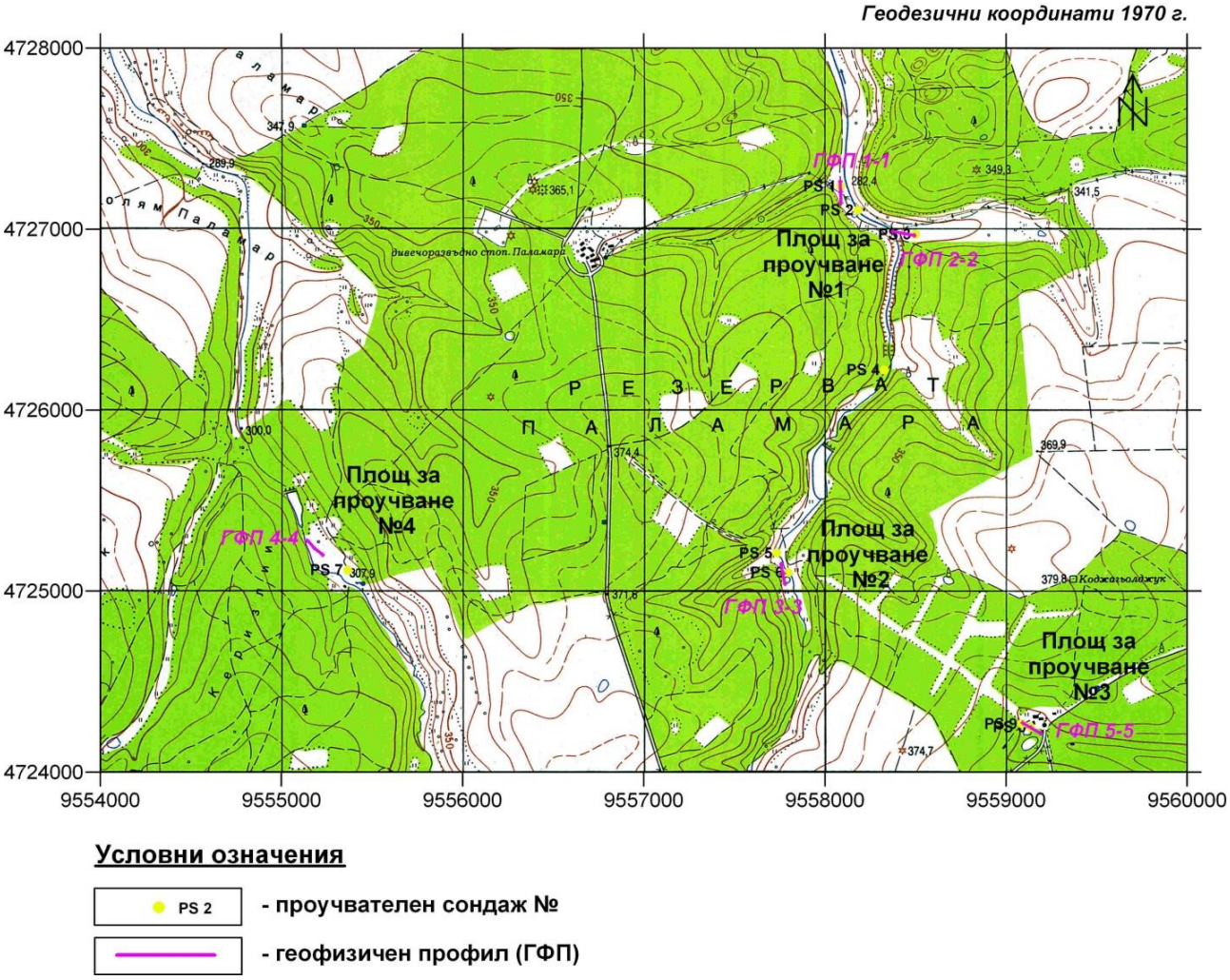
Методика и инструменти на изследване

Използваният електротомографски метод е подходящ за двумерно картиране на приповърхностния разрез във вертикални разрези по профили. Теренните измервания са изпълнени посредством голям брой свързани към многожилен кабел електроди (Griffiths et al., 1990). Използвана е 4-електродна схема Schlumberger. Регистрацията е извършена с помощта на апаратура Terrameter SAS 1000 B, производство на шведската фирма ABEM. Тя работи с изходно напрежение 150 V и максимален изходен ток 1000 mA. Състои се от предавател, приемник и микропроцесор, обединени в едно тяло. Принципът на измерване включва натрупване на сигнала с последователни измервания и аналогово филтриране, като резултатите се извеждат на дисплей. Това позволява да се контролира процесът на измерване и да се подтискат по избор 2, 4 и 8 пъти статистически разпределени шумове в приемната верига. По този начин се постига по-висока точност на измерванията, която е особено необходима при работа с по-слаби сигнали.

Теренните измервания в района на ловно стопанство (държавна дивечовъдна станция) „Паламара"са изпълнени по пет профила с обща дължина 575 m. Проучването обхваща горната приповърхностна част на геоложкия разрез до дълбочина 17-18 m.

Геофизичните профили (ГФП) са ситуирани в границите на предварително определените перспективни за добив на подземни води площи (Иванов, 2011,а). Местоположение на профилите е илюстрирано на

Фигура 2. На същата фигура е представено и разположението на изградените впоследствие проучвателни сондажи (PS).
На Фигура 3 са илюстрирани избрани моменти от провеждането на теренните измервания.



Фигура 2. Местоположение на геоелектричните профили и проучвателните сондажи



Фигура 3. Избрани моменти от провеждането на теренните измервания

При обработката на полевите данни е използвана компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001), която позволява детерминирането на разпределението на действителните съпротивления в подповърхностното пространство. При последващата интерпретация на получената геоелектрична картина преходът от геоелектричен разрез в хидрогеоложки модел се прави въз основа на обща информация за геоложките и хидрогеоложките условия в изследвания район, литературни данни за специфичните електрични съпротивления на различните типове скали (Keller and Frischknecht, 1966 и др.), данни от проучвателното сондиране и от опитно-филтрационните изследвания.

Анализ на геоелектричните разрези. Хидрогеоложка интерпретация.

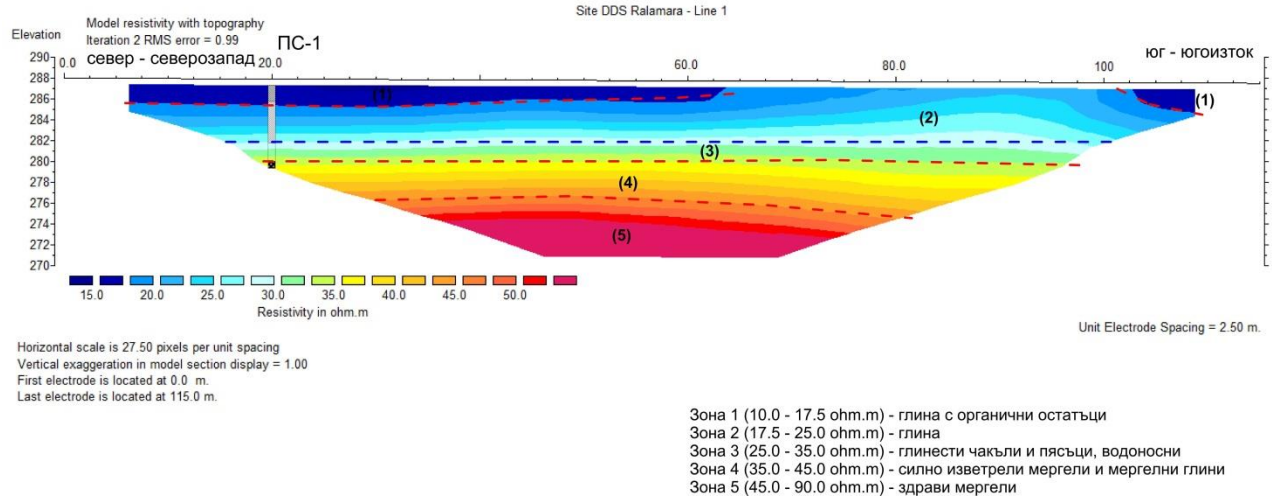
Предварителният анализ на съставените геоелектрични разрези позволява да се направят следните по-важни изводи:

1. Електричното съпротивление на разновидностите (средите), които изграждат изследвания геоложки разрез варира в диапазона от 10 Ωm до около 90 Ωm.
2. Най-обобщено изследваният геоелектричен разрез се представя от пет електросъпротивителни среди, маркиращи шест зони с различни литоложки характеристики и с различна водообилност:
   - *Първата електросъпротивителна среда (Зона 1)* се характеризира с най-ниските стойности на електричното съпротивление за изследвания геоелектричен разрез – в диапазона от 10 Ωm до 25 Ωm. Развита е като относително издържан пласт в приповърхностните части на геоелектричните разрези по три профила (ГФП 1-1, ГФП 3-3 и ГФП 4-4). Дебелината на този пласт е в интервала от 1-2 до 5 m. Може да се предполага, че *Зона 1* маркира пласт от глини с голямо съдържание на органично вещество и/или тинести почви.
   - *Втората електросъпротивителна среда (Зона 2)* се отличава с по-високи стойности на електричното съпротивление – в едни по-широки граници от около 20-25 Ωm до 50-60 Ωm. Тази среда вероятно картира пластове и зони от сухи глинести разновидности (глини, песъчливи глини, глини със скални късове и др.). Тя се установява в горната част на геоелектричния разрез по четири профила (ГФП 1-1, ГФП 2-2, ГФП 4-4 и ГФП 5-5). Ще отбележим, че в някои разрези *Зона 2* е сравнително добре издържан пласт, а в други има по-ограничено присъствие. Най-често нейната дебелина е около 3-5 m. Проследява се на различни хипсометрични нива и на различни позиции. *Зона 2* е добре издържан пласт в разрезите по профили ГФП 1-1 и ГФП 2-2, който по профил ГФП 1-1 частично се припокрива от *Зона 1*. В северната половина на профил ГФП 3-3, в горната част на разреза, *Зона 2* се установява като издържан пласт. По профил ГФП 5-5 същата зона се картира в два участъка като отделни петна.
   - *Третата електросъпротивителна среда (Зона 3)* притежава малко по-ниски от *Зона 2* стойности на електричното съпротивление, които варират в диапазона от 15 Ωm до 30-40 Ωm. Установена е като сравнително добре издържан пласт в разрезите по профили ГФП 1-1, ГФП 3-3 и ГФП 4-4. Горнището на *Зона 3* най-вероятно маркира нивото на подземните води (на около 2-5 m от земната повърхност). Може да се предполага, че тази зона картира водоносен пласт, формиран в сравнително по-едрозърнести алувиални наслаги (алтернация от чакъли, пясъци, глинести пясъци, песъчливи глини и глини). Общата дебелина на тези наслаги варира в доста широки граници - от 2 до 6-7 m.
   - *Четвъртата електросъпротивителна среда (Зона 4)* се характеризира с относително по-високи стойности на електричното съпротивление – в границите от 35 Ωm до 45-50 Ωm. Тази среда вероятно картира горната част на скалната подложка, представена от напукани и силно изветрели мергели. Установена е като издържан пласт в разрезите по петте профила. Дебелината на този пласт е около 3-4 m. Горнището на *Зона 4* маркира границата между кватернерната покривка и скалната подложка. В петте разреза тази граница е регистрирана на дълбочина от 6-7 до 9-10 m от терена.
   - *Петата електросъпротивителна среда* се характеризира с най-високите стойности на електричното съпротивление – от 45 Ωm до 90 Ωm. В разрезите по профили ГФП 1-1, ГФП 2-2, ГФП 3-3 и ГФП 4-4 тази електросъпротивителна среда картира незасегнатите от изветрителни процеси части на скалната подложка (здрави мергели) – *Зона 5*. В разреза по профил ГФП 5-5 тя най-вероятно маркира сух насип от глинести материали и скални късове *(Зона 6)*.

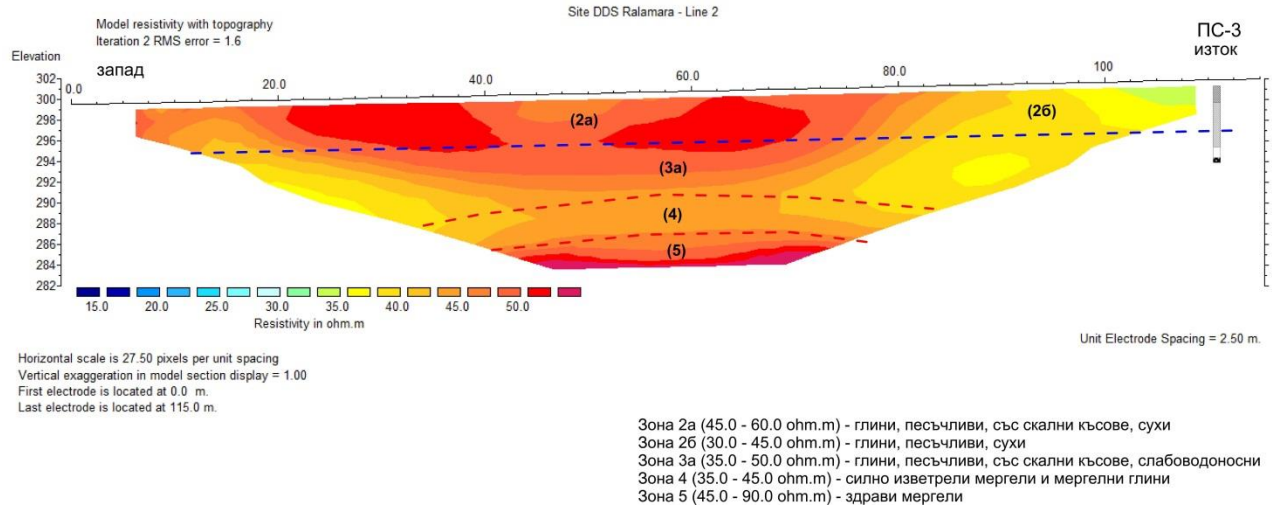
Въз основа на направения предварителен анализ на установените геоелектрични разрези може да се направят следните изводи и препоръки:

(1) най-водообилните участъци попадат в границите на Площ за проучване № 1 (по цялата дължина на ГФП 1-1), Площ за проучване № 2 (южната част на ГФП 3-3) и Площ за проучване № 4 (по цялата дължина на ГФП 4-4);
(2) слабоводообилни са участъците в източната част на ГФП 2-2 в Площ за проучване № 1 и северната част на ГФП 3-3 в Площ за проучване № 2;
(3) практически неводоносен е проученият район в обхвата на Площ за проучване № 3 (ГФП 5-5);
(4) проучвателните сондажи и кладенци трябва да бъдат изградени главно в посочените водообилни и слабоводообилни участъци с дълбочина не по-голяма от 10 m.

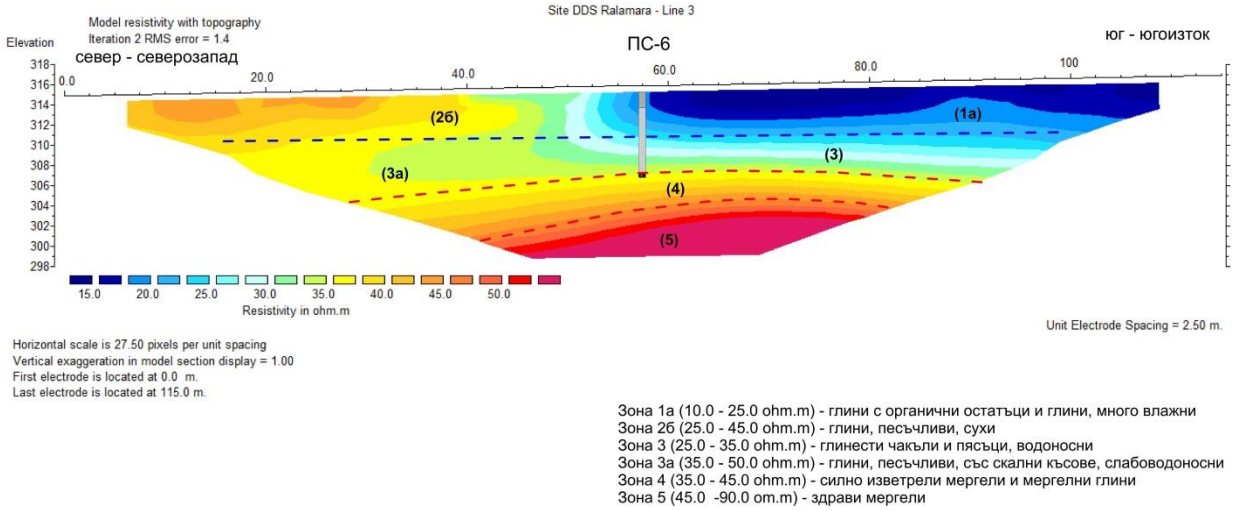
Детайлният хидрогеоложки модел на изследваната част от подповърхностното пространство е разработен чрез съвместна интерпретация на геоелектричните разрези и резултатите от проведените сондажни проучвания и опитни водочерпения (Иванов, 2011,б). В разрезите на всеки от петте профила са отделени различни пластове и зони, които са диференцирани по литоложки признак и по степен на водообилност. Литоложките граници са маркирани с пунктирани линии в червен цвят, а нивото на подземните води със синя пунктирана линия. Така съставените хидрогеоложки разрези са илюстрирани на Фигури №№ 4, 5, 6, 7 и 8. Обобщената информация за литоложките и хидрогеоложките характеристики на детерминираните в разрезите по петте профила зони е дадена в Таблица 1.



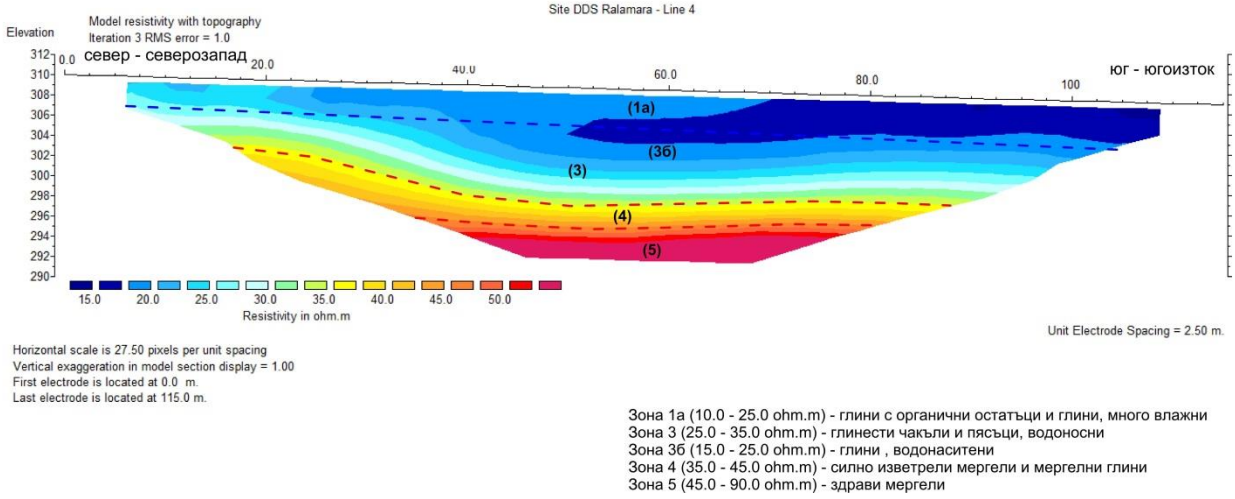
Фигура 4. Хидрогеоложки разрез по профил ГФП 1-1 (ситуационният план е представен на Фигура 2)



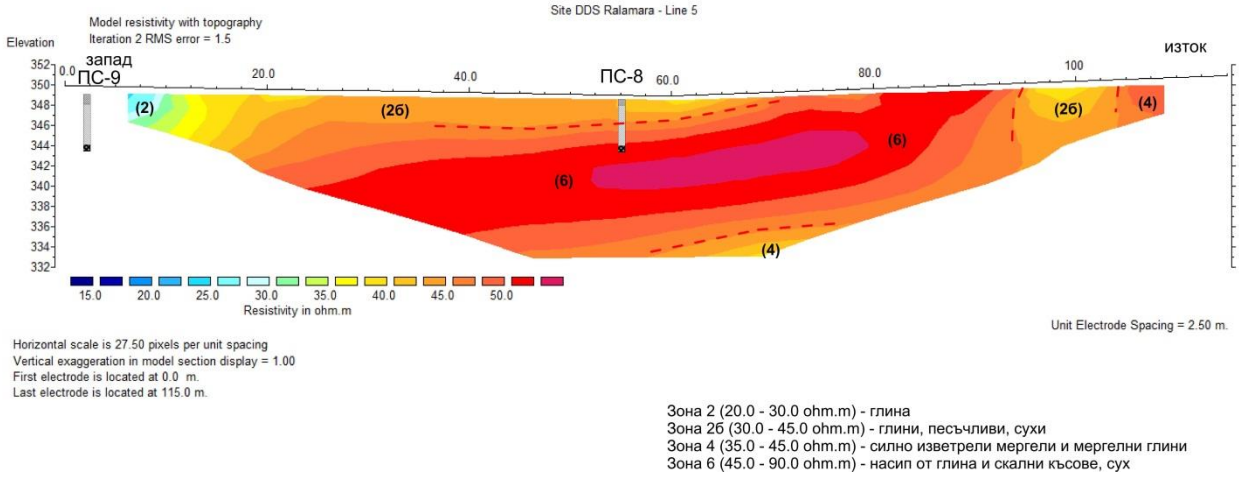
Фигура 5. Хидрогеоложки разрез по профил ГФП 2-2 (ситуационният план е представен на Фигура 2)



Фигура 6. Хидрогеоложки разрез по профил ГФП 3-3 (ситуационният план е представен на Фигура 2)



Фигура 7. Хидрогеоложки разрез по профил ГФП 4-4 (ситуационният план е представен на Фигура 2)



Фигура 8. Хидрогеоложки разрез по профил ГФП 5-5 (ситуационният план е представен на Фигура 2)

Таблица 1. Обобщена информация за литоложките и хидрогеоложките характеристики на детерминираните в разрезите по петте профила зони

Хидрогео-ложки разрез по ГФП №	Зона №	Електрично съпротивление, Ωm	Литоложка характеристика	Хидрогеоложко описание
ГФП 1-1	Зона 1	10.0 - 17.5	глини с органични остатъци	влажни
	Зона 2	17.5 - 25.0	глини	влажни
	Зона 3	25.0 - 35.0	глинести чакъли и пясъци	водонос
	Зона 4	35.0 - 45.0	силно изветрели мергели и мергелни глини	водонаситени
	Зона 5	45.0 - 90.0	здрави мергели	влажни
ГФП 2-2	Зона 2а	45.0 - 60.0	глини, песъчливи, със скални късове	сухи
	Зона 2б	30.0 - 45.0	глини, песъчливи	сухи
	Зона 3а	35.0 - 50.0	глини, песъчливи, със скални късове	слаб водонос
	Зона 4	35.0 - 45.0	силно изветрели мергели и мергелни глини	водонаситени
	Зона 5	45.0 - 90.0	здрави мергели	влажни
ГФП 3-3	Зона 1а	10.0 - 25.0	глини с органични остатъци и глини	влажни
	Зона 2б	25.0 - 45.0	глини, песъчливи	сухи
	Зона 3	25.0 - 35.0	глинести чакъли и пясъци	водонос
	Зона 3а	35.0 - 50.0	глини, песъчливи, със скални късове	слаб водонос
	Зона 4	35.0 - 45.0	силно изветрели мергели и мергелни глини	водонаситени
	Зона 5	45.0 - 90.0	здрави мергели	влажни
ГФП 4-4	Зона 1а	10.0 - 25.0	глини с органични остатъци и глини	влажни
	Зона 3	25.0 - 35.0	глинести чакъли и пясъци	водонос
	Зона 3б	5.0 - 25.0	глини	водонаситени
	Зона 4	35.0 - 45.0	силно изветрели мергели и мергелни глини	водонаситени
	Зона 5	45.0 - 90.0	здрави мергели	влажни
ГФП 5-5	Зона 2	20.0 - 30.0	глини	влажни
	Зона 2б	30.0 - 45.0	глини, песъчливи	сухи
	Зона 4	35.0 - 45.0	силно изветрели мергели и мергелни глини	водонаситени
	Зона 6	45.0 - 90.0	насип от глина и скални късове	сух

Заключение

Съставеният въз основа на комплексния анализ и интерпретация на резултатите от електротомографията хидрогеоложки модел дава относително добра представа за възможните пространствени размери и геометрията на потенциални перспективни участъци за добив на подземни води. Представените резултати от проведеното проучване, както и ефективното действие на вече изградените водочерпателни кладенци, са убедителна демонстрация за големите възможности и приложимостта на електротомографския метод за локализиране на подходящи места за изграждане на кладенци за добив на подземни води в райони с ограничени водни ресурси. Предложеният подход е сравнително евтин, достатъчно точен и много подходящ за успешното решаване на подобни често срещани в хидрогеоложката практика задачи.

Литература

Геоложка карта на България в М 1:100000. Картен лист Разград. 1992. ГИ БАН, Геология и Геофизика АД.

Димовски, С. 2010. Електротомографски изследвания на геоложката среда. Дисерт., С., МГУ "Св. Иван Рилски", 387 с.

Димовски, С., Н. Стоянов, Ч. Гюров. 2007. Ефективност на електротомографията за детайлно геоелектрично картиране на приповърхностния геоложки разрез. – BULAQUA (БУЛАКВА), 4, 47-55.

Димовски, С., Н. Стоянов. 2010. Приложение на геоелектрични проучвания при изучаване на хидрогеоложките условия в карстови райони. – 6-та Национална конференция по геофизика "20 години Дружество на геофизиците в България", София, 4 с.

Димовски, С., Н. Стоянов. 2011. Геоелектричен подход при изучаване на хидрогеоложките условия в района на ДБО Асеновград. – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.54, св. I, Геол. геоф., 125-130.

Димовски, Ст., Н. Стоянов, Хр. Цанков, Ат. Кисьов. 2012. Електротомографски изследвания в района на Зографския манастир в Света гора, Атон. – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.55, св. I, Геол. геоф., 96-101.

Димовски, С., Н. Стоянов. 2015. Локализиране на подходящи места за изграждане на мониторингови кладенци в слабоводоносен скален комплекс. – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.58, св. I, Геол. геоф., 140-145.

Иванов, Ив. 2011,а. Доклад за резултатите от предварителния оглед, относно възможностите за допълнително водоснабдяване с подземни води на ловно стопанство "Паламара". – Фонд на „Булгеоинвест" ЕООД

Иванов, Ив. 2011,б. Доклад за резултатите от сондажните проучвания и ОФИ в района на ловно стопанство "Паламара". – Фонд на „Булгеоинвест" ЕООД

Стоянов, Н. 2003. Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци. Дисерт., С., МГУ "Св. Иван Рилски", 215 с.

Стоянов, Н. 2004. Метод за дефиниране на локални геоелектрични критерии за оценка на замърсяването на подземните води. – BULAQUA (БУЛАКВА), 4 с.

Стоянов, Н., Ч. Гюров. 2004. Оценка на замърсяването на подземните води по метода на 2D електро-съпротивително проучване по схемата полюс-дипол – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.47, св. I, Геол. геоф., 219-224.

Филипов, Л., Ан. Дечева. 1994. Обяснителна записка към геоложка карта на България в М 1:100000, Картен лист Разград. – ГИ БАН, Геология и Геофизика АД, С. 46 с.

Daniels F., R. A. Alberty. 1966. Physical chemistry. John Wiley and Sons, Inc., 674 p.

Griffiths, D. H., R. D. Barker. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. – Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

Keller G.V., F.C. Frischknecht. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford, 517 p.

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, 151 p.

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.