

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОТОМОГРАФИЯТА ЗА КАРТИРАНЕ НА СУФОЗИОННИ ЗОНИ

**Стефан Димовски, Николай Стоянов, Атанас Кисъов, Миглена Янкова**

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

**РЕЗЮМЕ.** Формираните в резултат на суфозионни процеси разуплътнени зони в земната основа нарушават устойчивостта на фундамите над тях инженерни съоръжения. Предложеният електротомографски метод за локализиране границите на проблемните участъци се базира на различията в елекросъпротивителните свойства на тези зони и на незасегнатите части от подповърхностното пространство. Възможности за картиране на суфозионни зони и ефективността от прилагане на метода е илюстрирана с резултатите от проведеното електротомографско 2D проучване по трасето на железопътната линия София-Пловдив в участък между гара Синитево и гара Огняново. Представените резултати потвърждават приложимостта на използваната методика на измерване, анализ и интерпретация на данните.

### APPLICATION OF ELECTROTOMOGRAPHY FOR MAPPING OF SUFFOSION ZONES

**Stefan Dimovski, Nikolay Stoyanov, Atanas Kisiov, Miglena Yankova**

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

**ABSTRACT.** The decompressed zones in the near-surface, created as a result of suffosion, violate the stability of the engineering constructions founded on top of them. The proposed electrotopography method for locating the boundaries of such problem areas is based on the differences in the electrical resistivity properties of these zones and of the unaffected parts of subsurface space. The possibilities for mapping of suffosion zones and the efficiency of the applied method are illustrated by the results of the performed 2D electrotopography study along the railway line Sofia-Plovdiv in the region between station Sinitevo and station Ognjanovo. The presented results confirm the applicability of the utilized methodology for field measurements and analysis and interpretation of the obtained data.

### Въведение

Установеното разпределение на специфично електрично съпротивление в подповърхностното пространство е еднозначно отражение на степента на проява на йонна електропроводимост. Задълбоченият анализ и аргументираната интерпретация на регистрираните с помощта на електротомографията геоелектрични разрези са много добра основа за по-точна и детайлна количествена оценка на геоложките, хидрогеоложките и инженерногеоложките условия на изследваната част от природната среда.

Досегашният ни опит убедително показва големите 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; тектонските нарушения, зони с различна водонаситеност и водообилност, зони с различна степен на техногенно или природно замърсяване, свлачищни участъци, археологически обекти и др. (Стоянов 2003; 2004, Стоянов, Гюров, 2004; Стоянов и др., 2004; Димовски и др., 2007; Dimovski и др., 2008; Димовски 2010; Димовски, Стоянов, 2010; 2011; Димовски и др., 2012; и други).

Приложимостта на електротомографията при картиране на слабоустойчиви суфозионни зони в подповърхностното пространство ще илюстрираме с представените по-долу резултати от изпълненото от нашия екип електротомографско проучване по трасето на ж.п. линията София-Пловдив.

### Кратка информация за изследвания обект

Обект на изследване е горната част на геоложката основа на ж.п. линията София-Пловдив в малък участък между гара Синитево и гара Огняново (фиг. 1).

В по-общ план участъкът попада в периферната част на серия от поройни конуси, формиращи в подножието на южните склонове на Родопите (фиг. 2). Те са изградени от пролувиални, пролувиално-алувиални и пролувиално-делувиални седименти с кватернерна (холоценска) възраст. Представени са основно от глини, прахови и пясъчливи глини, глинести пясъци, финни пясъци, заглинени пясъци и чакъли. Преобладаващи са финните фракции, което е характерно за седиментите в периферията на поройните конуси. Сложните връзки и пространствени взаимоотношения между отделните пластовете, слоеве, прослойки и лещи, както и голямото

разнообразие в литоложкия и зърнометричния състав на седиментите, предопределят и изключително силната хетерогенност на геоложката основа. Същевременно, формираният в тях подземен поток, който се дренира на юг в чакълесто-песъчливите терасни наслаги на р. Марица, създава предпоставки за изнасяне на финни частици от пясъчните лещи и прослойки, т.е. за развитие на суфозионни процеси.



Фиг.1. Местоположение на проучвания участък

В проучвания участък е установено частично и ограничено по площ пропадане на терена в непосредствена близост до ж.п. линията. Възможна причина за това явление са суфозионни процеси, довели до образуване на зони с намалена устойчивост и кухини в глинесто-песъчливата геоложка основа.

### Цели на проучването

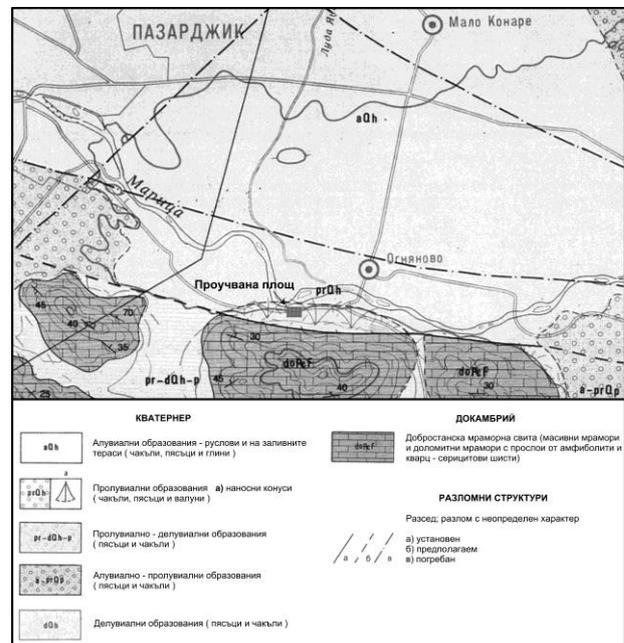
Главни цели на електротомографското проучване са: детайлизиране на геоложкия разрез до дълбочина около 15-20 m; картиране на пространствените граници на суфозионни зони, респективно на разуплътнени зони с намалена устойчивост.

### Методика и инструменти на изследване

Използваният електротомографски метод е подходящ за двумерно картиране на приповърхностния разрез във вертикални разрези по профили. Терените 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.

Терените измервания са изпълнени по четири профила, всеки от които с дължина по 155 m. Използвани са две коси от 12 жилен кабел с разстояние между електродите 5 m (общо 24 електрода на разстановка). След измерване на всяка разстановка, се извършва стъпковото преместване ("приплъзване") на кабела със стъпка 60 m. Профилите са ситуирани успоредно един на друг, по два на север и на юг от железопътната линия. Точното им местоположение с разположението на електродите по всеки от профилите е представено на фигура 7.

При обработката на полевите данни е използвана компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001). Програмата дава разрез на реалното разпределение на електричните съпротивления в подповърхностното пространство. Преходът от геоелектричен разрез в геоложки, инженерногеоложки или хидрогеоложки модел се прави като при последващата интерпретация на получените с програмата геоелектрична картина се отчита и събраната при стандартното проучване информация за конкретните природни условия. В конкретния случай, поради липса на сондажни проучвания и други данни за по-прецизно корелиране на регистрираните геоелектрични разрези, съставеният геоложки модел и отделените в него граници притежават известна условност.



Фиг. 2. Геоложка карта на района

### Анализ на геоелектричните разрези. Геоложка интерпретация

Детерминираното с програма RES2DINV разпределение на действителните съпротивления в разрези по четирите профила, са представени на фиг.3-6. Комплексният анализ на геоелектричните разрези при отчитане на конкретните условия и влиянието на изградените в него съоръжения (фундаменти, тръбопроводи и пр.) дава основание да се направят следните констатации за геоложкия строеж на земната основа и за наличието на зони с намалена устойчивост.

Електричното съпротивление на разновидностите (средите), които изграждат изследваната част на приповърхностния разрез варира в относително широки граници – от 25  $\Omega\text{m}$  до 450  $\Omega\text{m}$  и повече. Установеният геоелектричен разрез се представя от четири основни електросъпротивителни среди, картиращи зони с различен литоложки състав и/или, генезис. Регистрираните в тези зони геоелектрични аномалии локализируют суфозионни (разуплътнени) зони или части от подземни съоръжения.

Първата електросъпротивителна среда (Зона 1) се характеризира с относително ниско електрично съпротивление най-често в диапазона 50 - 100  $\Omega\text{m}$ . Тя оконтурва най-горната част на разреза по Профил 1 (фиг. 3), изграден от почвен слой и делувиални глини и прахови глини. Вариациите в изменението на електричното съпротивление зависят от степента на водонаситеност на този приповърхностен слой и от степента на хомогенност на средата. Високоомната аномалия в интервала между 55-тия и 60-тия метър по Профил 1 маркира подземен канален тръбопровод от бетонови тръби. Дебелината на *Зона 1* варира в тесни граници от 1-2 м до 2.5 м.

Втората електросъпротивителна среда (Зона 2) има по-високи и вариращи в по-широк интервал стойности на електричното съпротивление – от 50-60  $\Omega\text{m}$  до 140  $\Omega\text{m}$ , а в отделни участъци под 30  $\Omega\text{m}$  или до 170  $\Omega\text{m}$ . Тази зона очертава границите на разпространение на финно- до дребнозърнестите пролувиални материали, изграждащи периферните части на поройния конус (вж. фиг. 3-6). Те са представени от глини и прахови глини, прослойки от лещи и прослойки от финно зърнести пясъци, глинести пясъци и пясъчливи глини. На земната повърхност имат значителни повърхностни разкрития около ж.п. линията. По Профил 2 тази зона е установена в интервала между 55-тия и 60-тия метър (фиг. 4), а по Профил 3 – в интервалите между 40-тия и 115-тия метър и между 85-тия и 175-тия метър (фиг. 5). Дълбочината на *Зона 2* достига до дълбочина 8-10 м. В най-западната част на проучвателния район тя се проследява на около 14-15 м от терена и по-дълбоко. В обхвата на *Зона 2* са много ясно обособени две подзони – 2а и 2б:

- Подзона 2а се характеризира с относително по-високи стойности на електричното съпротивление – най-често в границите от 100  $\Omega\text{m}$  до 140  $\Omega\text{m}$ . Тя картира границите на незасегнатите от суфозионните процеси литоложки разновидности (глини, прахови и пясъчливи глини, глинести пясъци). В приповърхностните части на разрезите по Профил 2 и Профил 3 са детерминирани няколко ограничени по размер високоомни зони (фиг.4 и фиг.5). Те маркират подземния бетонов тръбопровод и фундаментите на електрическите стълбове (на фигурите са отбелязани с правоъгълници). Ще отбележим, че в приповърхностната част на разрезите в близост до каналния тръбопровод се очертават нискоомни участъци, в които съпротивленията са около и много под 70  $\Omega\text{m}$  (минималните стойности достигат и под 30  $\Omega\text{m}$ ). Тези нискоомни участъци най-вероятно картират течове

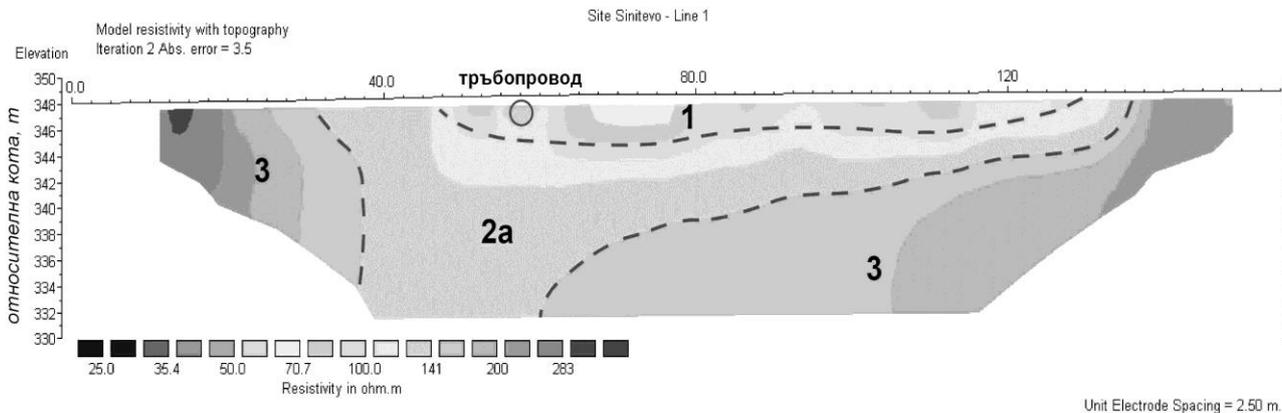
от каналния тръбопровод и формираните около него водонаситени зони.

- Подзона 2б маркира няколко нискоомни участъка около ж. п. линията в разрезите по Профил 2 и Профил 3. На фиг. 4 и 5 тези участъци са представени с прекъсната линия. Регистрираните стойности на електричното съпротивление са най-често в диапазона от 60  $\Omega\text{m}$  до 100  $\Omega\text{m}$ . *Подзона 2б* картира силно разуплътнени водонаситени зони в подповърхностното пространство, които притежават повишена йонна проводимост. Разуплътнените слабоустойчиви зони са резултат от суфозионно изнасяне на финните фракции, при което са се формирали и доста големи кухини в земната основа. В резултат на пропадане на покривния слой *Подзона 2б* има и визуално установени повърхностни разкрития, главно по Профил 2 – в интервалите между 80-тия и 90-тия метър и между 105-тия и 115-тия метър (фиг. 4). В останалите части тя е припокрита от материалите, изграждащи *Подзона 2а*. Под повърхността *Подзона 2б* се проследява до дълбочина 8-10 м.

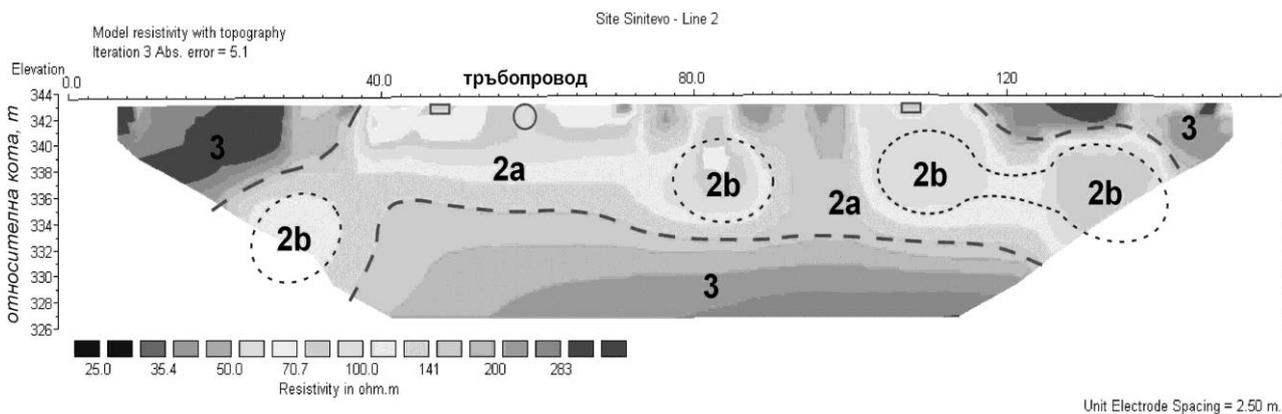
Третата електросъпротивителна среда (Зона 3) се характеризира с високо електрично съпротивление. Регистрираните в нея стойности варират в диапазона от около 140-170  $\Omega\text{m}$  до 450  $\Omega\text{m}$  и повече (фиг. 3-6). Тази зона картира границите на разпространение на по-едрозърнести пролувиално-алувиални материали – пясъци и чакъли с глинесто-пясъчлив запълнител и чакълести глини. Установените в разреза по Профил 3 високоомни аномалии най-вероятно маркират подземния тръбопровод и фундаментите на електрическите стълбове (на разрезите са отбелязани с кръгчета и правоъгълници).

Четвъртата електросъпротивителна среда (Зона 4) се установява в най-горната част на геоелектричния разрез по Профил 4 (фиг. 6). Тази зона маркира изградената на юг от ж.п. линията дига, която се проследява до дълбочина 2.0-2.5 м от терена. Силно хетерогенния характер на насипа и различната водонаситеност на материалите предопределят един твърде широк диапазон на вариране на стойностите на електричното съпротивление – от 60  $\Omega\text{m}$  до 200  $\Omega\text{m}$  и повече. Регистрираната около 65-тия метър в тази зона високоомна аномалия вероятно се дължи на преминаващия бетонов тръбопровод, а нискоомната аномалия в интервала между 40-тия и 65-тия метър картира течовете от каналния тръбопровод и формираната около него водонаситена зона.

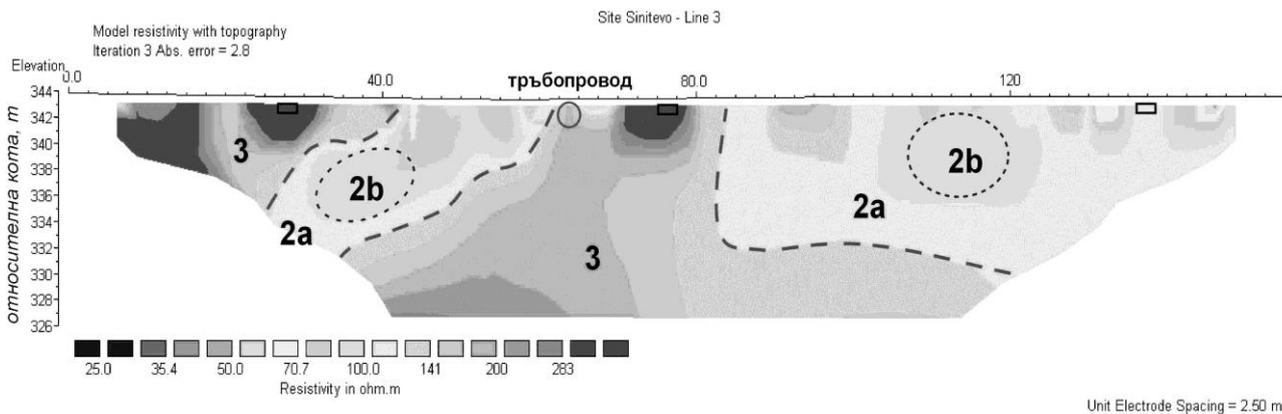
Ще отбележим, че под *Зона 4* (дигата) по Профил 4 се установява и една междинна електросъпротивителна среда – *Зона 2а-3* (вж. фиг. 6). В нея стойностите на електричното съпротивление варират от 100  $\Omega\text{m}$  до 200  $\Omega\text{m}$ . По всяка вероятност тази зона картира силно хетерогенна (нееднородна) среда, представена от алтерниращи пластове, прослойки и лещи от глини, глинести пясъци, пясъчливи и чакълести глини.



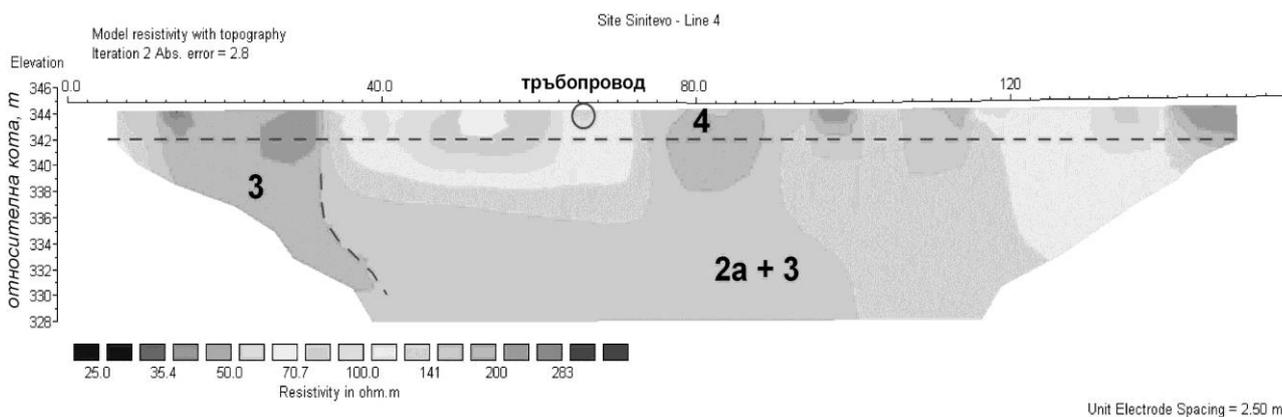
Фиг.3. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 1



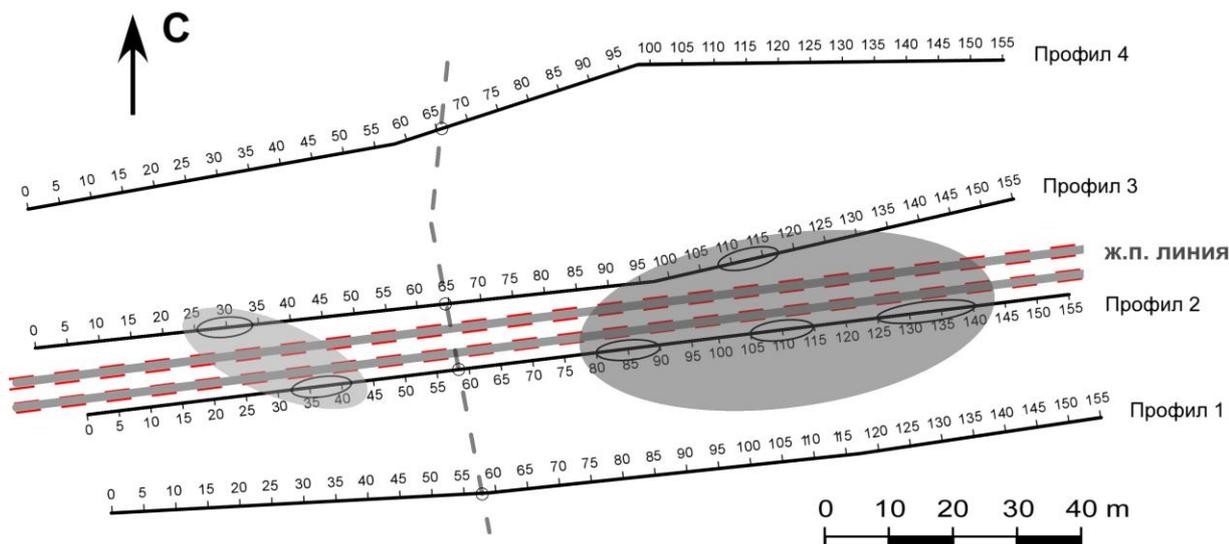
Фиг. 4. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 2



Фиг. 5. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 3



Фиг. 6. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 4



#### Условни означения

-  - Зона с реална опасност от пропадане на земната основа
-  - Зона с потенциална опасност от пропадане на земната основа
-  - тръбопровод

Фиг. 7. Площна карта на границите на суфозионните зони; зонирание по опасност от пропадане на земната основа

### Суфозионни зони

Въз основа на подробен анализ на резултатите от направените интерпретации и предвид очертаните граници на Подзона 2b е съставена площна карта на суфозионните зони, респ. на зоните с намалена устойчивост на земната основа (фиг. 7). С оглед вероятната дълбочина на тяхното залягане и възможната опасност от пропадане на терена са детерминирани две зони:

Зона с реална опасност от пропадане на земната основа. Тази зона има сравнително широк обхват в източната половина на проучвателния участък (фиг. 7). Тя заема най-горната приповърхностна част на геоложкия разрез, което предполага и голяма опасност от пропадане на терена. Впрочем, в тази част от изследваната територия (южно от ж.п. линията вече са реализирани частични пропадания и отваряне на празнини в подповърхностното пространство.

Зона с потенциална опасност от пропадане на земната основа. Тази зона заема сравнително ограничена площ в западната част на проучвания участък (фиг. 7). Нейното горнище е установено на дълбочина от 3 до 7 m дълбочина. Засвояването на разуплътнената зона в известна степен ограничава, но не елиминира възможно бъдещо пропадане на терена. Затова се предполага, че в рамките на тази зона съществува потенциална опасност от пропадане.

Следва да отбележим, че поради липса на сондажни проучвания и данни за по-прецизно корелиране на геоелектрични разрези, предложеният от нас геоложки модел и детерминираните на тази база граници на вероятните суфозионни (разуплътнени) зони имат известна условност и ограничена точност. Препоръчително в проучвания участък да се проведе допълнително (по-детайлно) проучване, включващо изграждане на един или повече проучвателни сондажи. Данните за преминалите със сондажите литоложки разновидности и установените в тях нива на подземните води ще позволят да се направи един много по-прецизен анализ на резултатите от електротомографията и да се получи по-точна представа за пространствените граници на зоните с намалена устойчивост на земната основа.

### Заклучение

Съставеният въз основа на комплексен анализ и интерпретация на резултатите от електротомографията при отчитане на съвсем ограничената информация за геоложкия строеж на проучвания участък дава относително добра представа за възможните пространствени размери и геометрията на суфозионните зони. Същевременно, отсъствието на сондажни данни, на практика демонстрира приложимостта и ефективността на електротомографския метод за предварителни оценки за

наличие на разуплътнени (суфозионни) зони и участъци с намалена устойчивост в приповърхностния разрез.

## Литература

- Димовски, С. 2010. *Електротомографски изследвания на геоложката среда*. Дисертация, С., МГУ "Св. Иван Рилски", 387 с.
- 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"*, С., 4 с.
- Димовски, С., Н. Стоянов. 2011. Геоелектричен подход при изучаване на *хидрогеоложките* условия в района на ДБО Асеновград. – *Год. МГУ "Св. Иван Рилски"*, 54, Св. I, *Геол. геоф.*, 125-130.
- 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, Хр. Цанков, Ат. Кисьов. 2012. *Електротомографски изследвания в района на Зографския манастир в Света гора, Атон*. – *Год. МГУ "Св. Иван Рилски"*, 55, Св. I, *Геол. геоф.*, 96-101.
- Кожухаров, Д., Р. Димитрова, Н. Кацков. 1992. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М1:100000, к. л. Пазарджик*. С., КГМР, 54 с.
- 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. 2004. *Метод за дефиниране на локални геоелектрични критерии за оценка на замърсяването на подземните води*. – *BULAQUA (БУЛАКВА)*, 4.
- 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. Иван Рилски"*, 47, Св. I, *Геол. геоф.*, 219-224.
- Стоянов, Н., С. Стойнев, Ч. Гюров. 2004. Детайлизиране на инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия посредством геоелектрични модели – *Геол. и минер. ресурси*, 10, 8-12.
- Daniels F., R. A. Alberty. 1966. *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, New York, 767 p.
- Dimovski, S., N. Stoyanov, S. Kostyanev. 2008. Application of electrical resistivity techniques for investigation of landslides. – *Proceedings of the First International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region, EARSeL, Zadar, Croatia*, 241-251.
- Griffiths, D. H., R. D. Barker. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. – *J. Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Keller G. V., F. C. Frischknecht. 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, Oxford, 519 p.
- Kockel, F., H. Mollat. 1978. *Geological Map of Greece. M1:50000. Peninsula of Athos Sheet. (Vatopedhiou – Monasterry Athos)*. Publ. Department of Geological Maps of I.G.M.R.
- 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. 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.