https://doi.org/10.48368/bgs-2021.1.N17

Application of the ERT method for mapping weathering zones in rock complexes

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

[1]-University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Department of Geotechnics, e-mail: bulgeo@dir.bg
[2]-University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Department of Applied Geophysics, e-mail: dimovski@mgu.bg
[3]-University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Department of Hydrogeology and Engineering Geology, e-mail: nts@mgu.bg

Keywords: applied geophysics, ERT method, rock complex, weathering zone, Struma highway

Abstract:
Conventional engineering geological survey methods are often difficult to apply when studying high and steep rock slopes. In such conditions, the use of drilling equipment is difficult and even dangerous, especially when there are weak, strongly weathered sections on the slopes, creating a potential danger of self-collapse of rock fragments. In many cases, the slopes are close to roads or railways, a circumstance that creates extra danger.
The possibilities for mapping zones affected by weathering and secondary alteration in the near-surface parts of rock complexes by the application of ERT (Electrical Resistivity Tomography) method are presented. The high efficiency of this non-invasive method is based on the large differences between the electrical resistivity values typical for the unaltered rock varieties and for those affected by weathering processes. The sharp differences in ionic conductivity are due to the presence of a high percentage of gas or liquid phase between the altered particles, as well as to the presence of fine-grained, fine-dispersed or decomposed to clay materials.
In the presented article are illustrated the results of a geoelectrical survey for mapping weathered zones in the upper parts of rock slopes along the route of the Struma highway, Southwestern Bulgaria. The results of the study are of great practical importance for the development of a project for optimal strengthening and securing of the hazardous slopes, which has been successfully implemented.

Приложение на метода ERT за картиране на изветрели зони в скални комплекси

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

[1]-Университет по архитектура, строителство и геодезия, 1046 София; bulgeo@dir.bg
[2]-Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", Катедра „Приложна геофика", e-mail: dimovski@mgu.bg
[3]-Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", Катедра „Хидрогеология и инженерна геология"; e-mail: nts@mgu.bg

Ключови думи: приложна геофизика, ERT метод, скален комплекс, изветряла зона, автомагистрала Струма

Въведение

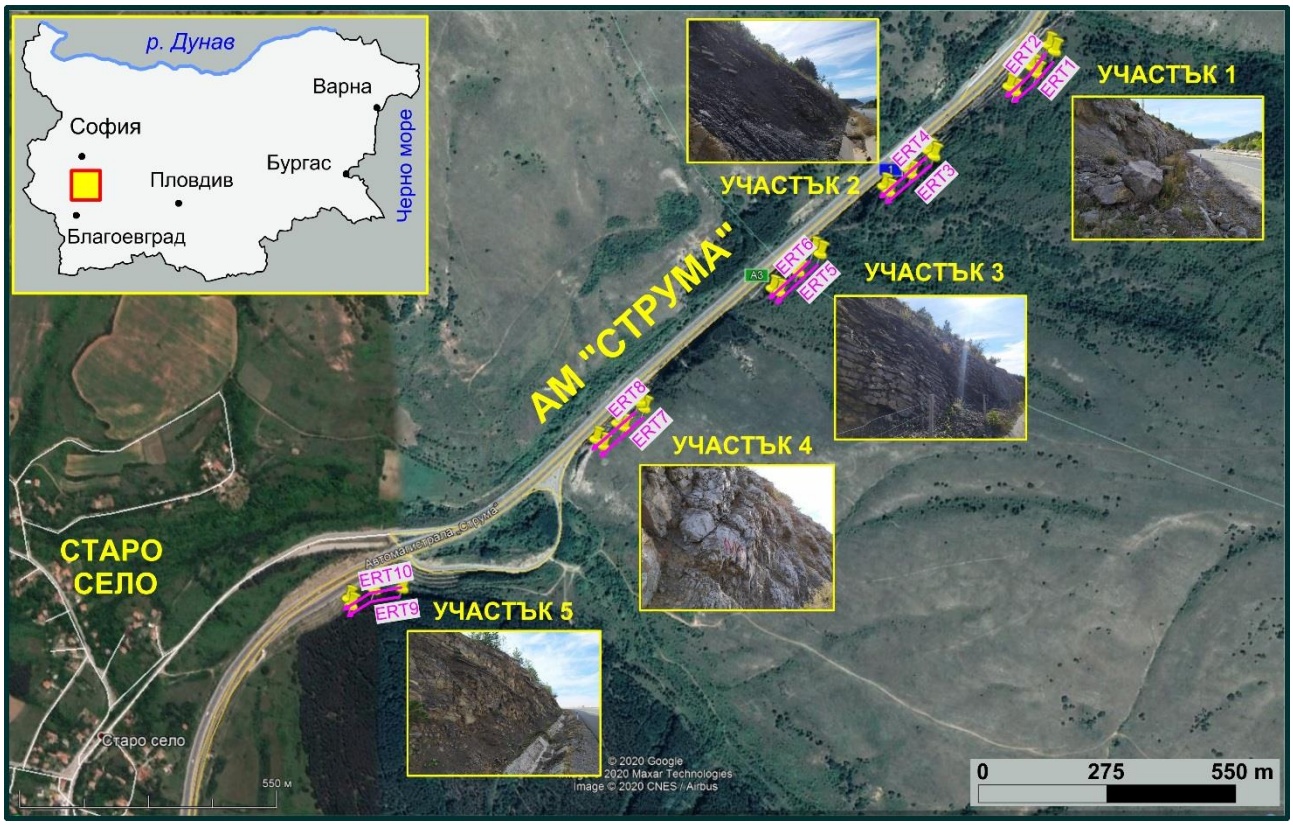
През последните 20 години метод ERT (Electrical Resistivity Tomography) се утвърди като универсален инструмент за картиране на приповърхностния геоложки разрез. Високата му ефективност се базира на много добрата диференциация на изследваната среда по специфично електрично съпротивление. Различията в неговите стойности се предпоставят от ендо- и екзогенните характеристики на скалните формации в проучвания разрез на всеки конкретен – литоложки и минерален състав, структура и текстура, зърнометрия, порестост, напуканост, окарстяване, изветряне, водонаситеност, състав на течната фаза и др. При интерпретацията на електричните модели обикновено се установяват и други, най-често имплицитни корелации между стойностите на електричното съпротивление и регистрираните промени в първичното състояние на изследваната среда, настъпили в резултат на природни и/или антропогенни въздействия.
Нашият дългогодишен опит показва безспорните предимства на метод ERT при картирането на границите на геоложки или хидрогеоложки формации, 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. (Димовски и др., 2007, 2012,

2013, 2015, 2016; Димовски, 2010; Димовски и Стоянов, 2010, 2011, 2015, 2016, 2018; Стоянов и Гюров, 2004; Стоянов и др., 2004; Dimovski et al., 2008, 2013, 2017a, 2017b; и други). Сходни резултати, доказващи ефективността на метод ERT са публикувани и от други български автори (Коцев и др., 2018; Шанов и др., 2009; Georgieva et al., 2008; Grigorova and Koprev, 2017, 2018, 2019; Ivanov et al., 2008; Shanov et al., 2009, 2011).

В настоящата статия представяме резултатите от проучване, което показва възможностите на метода при картиране на изветрели и вторично променени зони в самообрушващите се скални откоси по трасето на автомагистрала Струма в западния склон на планина Витоша. Откосите са с височини, на места надминаващи 30 m, като от тях често падат скални късове, създаващи опасност за пътното движение. Основната задача на проучването е да се определят дебелините на силно изветрелите зони, така че при проектните укрепителни работи тези зони да бъдат преминати и анкерите да се закотвят в по-свежата и здрава скална основа или такива зони да се укрепят допълнително. Техническите трудности при използване на други методи за проучване на подобни стръмни и високи откоси доказаха ползите от използването на ERT метода (Тоцев, 2020). При интерпретацията на данните са използвани и резултати от проведеното инженерногеоложко картиране на откосите и данни от направеното измерване на пукнатини.

Характеристика на изследвания обект

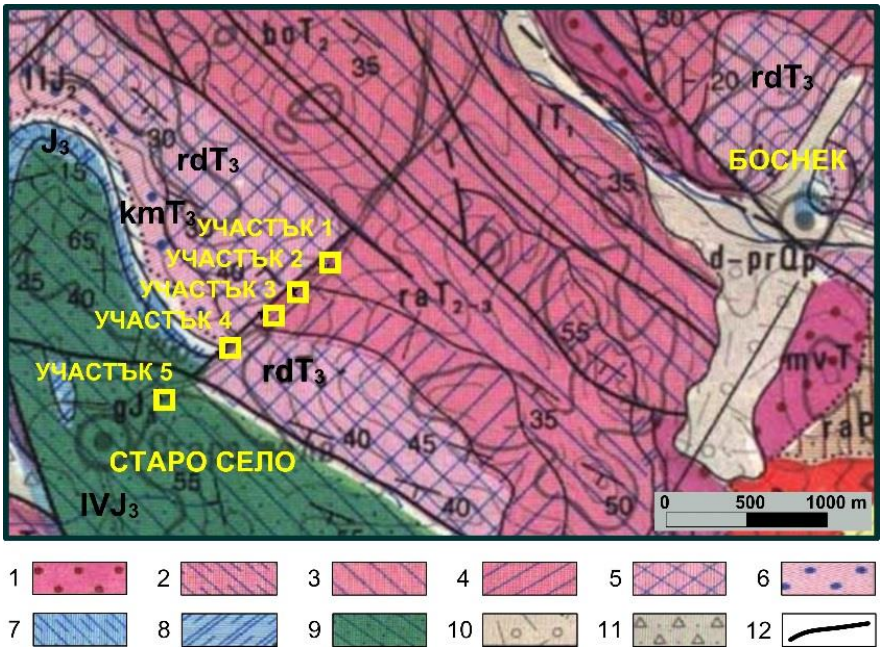
В регионален план районът попада в западния дял на планина Витоша. Обект на изследване са високите части на скалния откос в пет участъка по трасето на автомагистрала Струма между селата Боснек и Старо село, Пернишка област. Изследването обхваща горната част на геоложкия разрез до дълбочина 19-23 m в тясна ивица с широчина 30-40 m по периферията на откоса. (Фигура 1). В първите четири участъка теренът е с наклон на югозапад, а в петия участък – на изток. Надморската височина варира в диапазона между 810 и 850 m.



Фигура 1. Проучвани участъци по трасето на автомагистрала Струма между селата Старо село и Боснек. Сателитна снимка от Google Earth.

Геоложкият строеж на района е много пъстър, а тектониката - твърде сложна. В повърхностните разкрития се установяват скали от различни генетични типове и с различни възрасти от долния триас до кватернера (Загорчев и др., 1991, 1994). По-конкретно в пълния стратиграфски разрез отдолу нагоре

следват следните геоложки формации: Мърводолска свита mvT_1 – конгломерати, пясъчници, алевролити; Любашка свита lT_1 – алевролитови варовици, мергели, варовити пясъчници; Боснекска свита boT_2 – доломити; Радомирска свита raT_{2-3} – варовици, мергели, алевролити, аргилити; Русиновделска свита rdT_3 – доломити; Комщицка свита kmT_3 – варовици, алевролити, пясъчници, мергели, брекчоконгломерати; Градецка свита и Полатенска свита IIJ_2 – пясъчници, конгломерати, варовици; Гинска свита J_3 – ядчести варовици; Нешковска свита и Костелска свита IVJ_3 – мергели, пясъчници, аргилити; Делувиално-пролувиални образувания *d-prQp* – чакъли, пясъци, песъчливи глини. Разломите в района са с направление NW - SE и перпендикулярно на тях NE - SW, като пукнатинните системи в скалните формации следват приблизително същите направления, обусловени от тектонските напрежения, довели до разломяването и формирането на отделни тектонски блокове. Теренните разкрития и границите на изброените геоложки формации са представени на Фигура 2.



Фигура 2. Геоложка карта в района на проучваните участъци

1 – Мърводолска свита mvT_1; 2 – Любашка свита lT_1; 3 – Боснекска свита boT_2; 4 – Радомирска свита raT_{2-3}; 5 – Русиновделска свита rdT_3; 6 – Комщицка свита kmT_3; 7 – Градецка свита и Полатенска свита IIJ_2; 8 – Гинска свита J_3; 9 – Нешковска свита и Костелска свита IVJ_3; 10 – Делувиално-пролувиални образувания *d-prQp*; 11 – Пролувиално-делувиални *pr-dQp*; 12 – Разлом.

Забележка: По Геоложката карта на България 1:100000, к.л. Перник (Загорчев и др., 1991).

В обхвата на изследваните участъци доминират седименти от състава на Радомирската свита raT_{2-3}, Русиновделската свита rdT_3, Нешковската и Костелската свита IVJ_3 и частично припокриващите ги делувиално-пролувиални образувания *d-prQp*.

Горната част на откосите и склоновете в района е покрита частично от делувиални (свлечени от по-високите части) и елувиални (изветрителни) седименти, включващи кафяви песъчливи глини, сред които се срещат множество скални късове. Дебелината на делувиалните наслаги е от 0.50 до над 4 m, в зависимост от релефа и повърхността на скалната подложка. В горната и лицевата част на скалните откоси се е оформила изветрителна кора с дебелина от 1.0 до 2.0 m, състояща се от напукани от мразово изветряне скални пластове и ерозирали аргилити (Фигура 3).

Методика и инструменти

Картирането на приповърхностния разрез е проведено по метод ERT. Теренните измервания са изпълнени по 4-електродна схема Schlumberger посредством голям брой свързани към многожилен кабел електроди (Griffiths et al., 1990). Използвани са две коси от 12 жилен кабел с разстояние между електродите 5 m (общо 24 електрода на разстановка). Регистрацията е извършена с помощта на апаратура Terrameter SAS 1000. Измерванията са изпълнени по десет профила, всеки от които с дължина 115 m. Точното местоположение профилите е представено на Фигура 1.



Фигура 3. Откос, силно засегнат от изветрителни процеси.

Полевите данни са обработени със софтуер RES2DINV (Loke, 2001). С него са получени геоелектрични модели – разрези на реалното разпределение на електричните съпротивления по десетте профила. Трансформирането на геоелектричните модели в геоложки модели е направено на базата на: (i) обща информация за геолого-тектонски условия в изследвания район; (ii) литературни данни за специфичните електрични съпротивления на различните типове скали (Daniels and Alberty, 1975; Keller and Frischknecht, 1966); (iii) резултати от инженерногеоложкото картиране на откосите и данни от направеното измерване на пукнатини в петте участъка.

Анализ и интерпретация на получените резултати

Получените с програма RES2DINV геоелектрични разрези по 10-те профила, са представени на Фигура 4, Фигура 5, Фигура 6, Фигура 7 и Фигура 8. Комплексният анализ на геоелектричните разрези, резултатите от картирането и данните от измерването на пукнатини дава основание да направим следните по-важни констатации и изводи:

(i) Геоелектричният разрез е добре издържан по разпределението на електричното съпротивление в дълбочина.

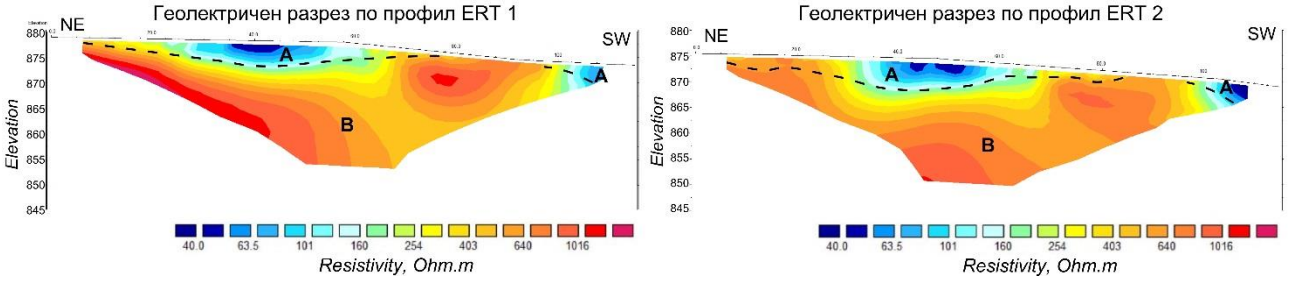
(ii) Регистрираните електрични съпротивления на разновидностите (средите) в изследваните разрези варират в много широк диапазон – от 30 Ωm до 3800 Ωm и повече.

(iii) Изследваните геоелектрични разрези се представя от четири електросъпротивителни среди (зони), обозначаващи пластове и зони с различия в степента на изветряне и настъпилите вторични промени на геоложката среда.

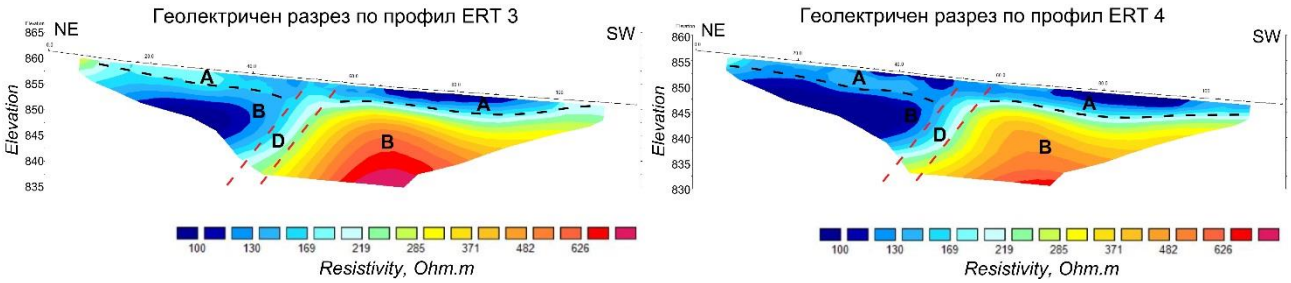
- Първата електросъпротивителна среда (Зона А) е установена във всички разрези по десетте профила. Най-вероятно тя очертава границите на силно изветрелите и вторично променени зони в горната част на скалния откос. Дебелината на тази зона във всеки от изследваните разрези е представена в Таблица 1. В същата таблица са представени и стойностите на електричните съпротивления, характеризиращи електросъпротивителната среда. Високите стойности на електричното съпротивление се свързва с наличие на по-едрозърнести продукти при вторичната промяна на коренните скали, а ниските предполагат, че в тези продукти преобладава глинестия

фациес. В първите четири участъка Зона А е с по-голяма дебелина в близките до скалния откос разрези (Профили ERT-1, ERT-3, ERT-5 и ERT-7) в сравнение със съответните им по-отдалечени от откоса разрези (Профили ERT-2, ERT-4, ERT-6 и ERT-8). Това е логично и обяснимо тъй като далечните за откоса части от скалните комплекси на Боснекската свита, Радомирската свита и Русиновделската свита са по-слабо засегнати от изветрителните процеси. В петия участък дебелината на Зона А е по-голяма в отдалечения от откоса разрез по Профил ERT-10. Това се обяснява с наличие на пласт от делувиални глини с дебелина 2.5-3.0 m, покриващ вторично променените скали от състава на Нешковската и Костелска свити.

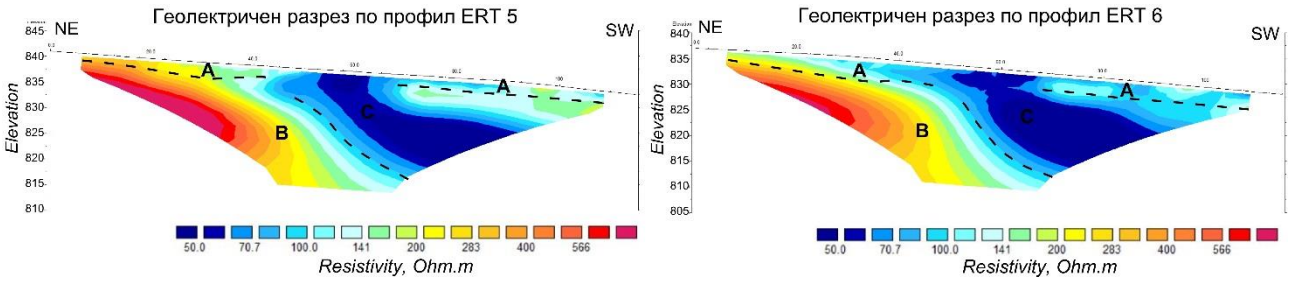
- Втората електросъпротивителна среда (Зона В) също присъства в разрезите на десетте профила. Най-вероятно тя картира здравите и по-слабо засегнатите от вторични промени части на скалните комплекси в петте участъка. Локалните различия в установените електрични съпротивления, вариращи в широкия диапазон от 100-200 до 3800 Ωm и повече, се обясняват както с твърде пъстрия литоложки състав на седиментните комплекси (пясъчници, варовици, доломити, мергели, алевролити, аргилити, брекчоконгломерати и т.н.), така и с наличието на зони с различна степен на водонасищане.
- Третата електросъпротивителна среда (Зона С) притежава много ниски стойности на електричното съпротивление – от 30 до 150 Ωm. Най-вероятно зона картира черните аргилити от състава на Русиновделската свита, които съдържат въглищни включения и прослойки. Зона С е установена единствено в двата разреза по профили ERT-5 и ERT-6.
- Четвъртата електросъпротивителна среда (Зона D) вероятно маркира разседна зона в централната част на участък 2. Регистрирана е разрезите по Профил ERT 3 и Профил ERT 4. Широчината на зоната е около 5-6 m. Стойностите на електричното съпротивление е между 150 и 250 Ωm, което предполага слабо присъствие на глинест фациес.



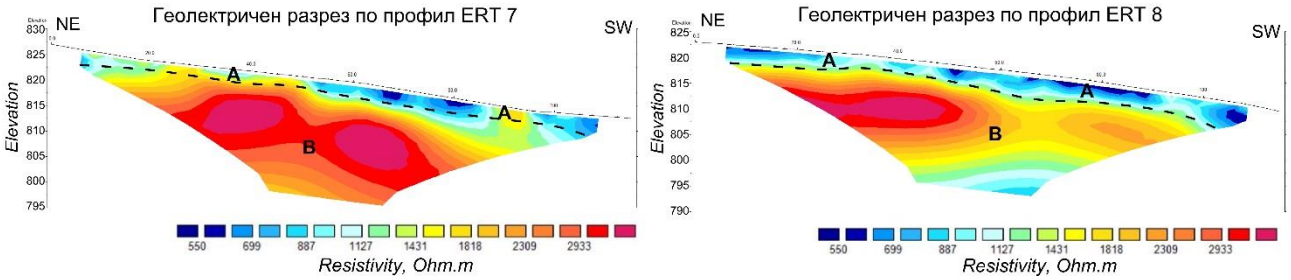
Фигура 4. Зониране на изветрелите и вторично променени части в Участък 1.



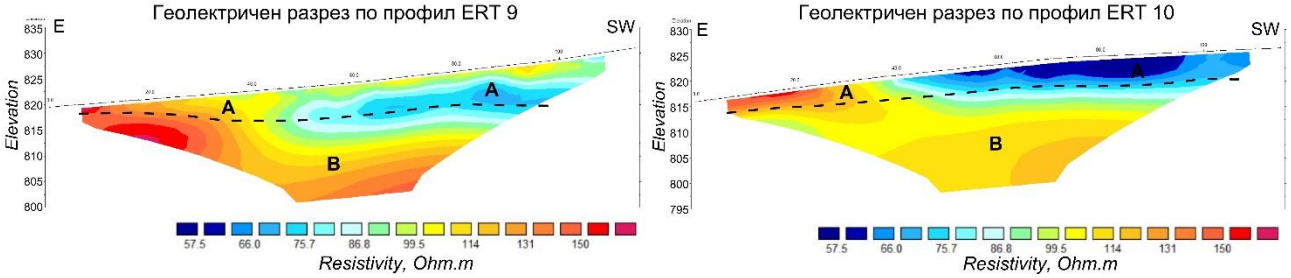
Фигура 5. Зониране на изветрелите и вторично променени части в Участък 2.



Фигура 6. Зониране на изветрелите и вторично променени части в Участък 3.



Фигура 7. Зониране на изветрелите и вторично променени части в Участък 4.



Фигура 8. Зониране на изветрелите и вторично променени части в Участък 5.

Таблица 1. Средна дебелина на силно изветрелите и вторично променени зони в горната част на скалния откос

Участък	Геофизичен профил	Дебелина, m	Електричното съпротивление, Ωm
1	ERT-1	0.0-2.5	от 30 до 160 Ωm, на места до 500 Ωm
	ERT-2	0.0-3.0	
2	ERT-3	0.0-2.0	от 30 до 160 Ωm, на места до 220 Ωm
	ERT-4	1.0-2.0	
3	ERT-5	1.0-2.0	от 50 до 150 Ωm, на места до 300 Ωm
	ERT-6	1.5-2.5	
4	ERT-7	1.0-2.0	от 500 до 1100 Ωm, на места до 3800 Ωm
	ERT-8	1.5-3.0	
5	ERT-9	1.0-5.0	от 50 до 100 Ωm, на места до 150 Ωm
	ERT-10	1.5-3.5	

Заключение

Представеното геофизично изследване демонстрира високата ефективност на метод ERT за картиране на зони с различия в степента на изветряне и настъпилите вторични промени на геоложката среда.
В приложен аспект, резултатите имаха важно практическо значение за изготвянето на проект за оптимално укрепване и обезопасяване на изветрелите слаби зони по откосите чрез полагане на система от високоякостни мрежи, анкери и въжета.

Литература

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

Димовски, С. 2010. Електротомографски изследвания на геоложката среда. Дисерт., 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”, 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, С., Н. Стоянов, Х. Цанков, А. 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, А. Кисьов. 2013. Приложение на електротомографията за картиране на суфозионни зони. – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.55, св. I, Геол. геоф., 96-101.

Димовски, С., Н. Стоянов, М. Янкова, А. Кисьов. 2015. Електротомографско проучване за картиране на свлачищни повърхнини. – Материали от VII-ма Национална конференция по геофизика с международно участие „Геофизика 2015" – 25 години Българско Геофизично Дружество, 20-23 Май 2015, София. (on CD)

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.

Димовски, С., Н. Стоянов. 2016. Геоелектричен подход при търсене на окарстени зони и перспективни участъци за изграждане на вододобивни сондажи. – Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т.59, св. I, Геол. геоф., 129-134.

Димовски, С., Н. Стоянов, И. Иванов. 2016. Приложение на електротомографията при определяне и характеризиране на перспективни участъци за добив на подземни води. – Сб. докл. VIII-ма Нац. конф. геоф., 25 ноем. 2016, София. (on CD)

Димовски, С., Н. Стоянов. 2018. Приложение на метода ERT в свлачищен участък при наличие на подземни води с повишена минерализация – Сборник доклади от IX-та Национална конференция по геофизика, 30 ноем. 2018, София, стр. 96-103 (on CD).

Загорчев, И., Р. Мартинова, Д. Чунев. 1991. Геоложка карта на България М 1:100000. Картен лист Перник. ВТС.

Загорчев, И., Р. Мартинова, Д. Чунев, П. Чумаченко, И. Сапунов, С. Янев. 1994. Обяснителна записка към Геоложка карта на България М 1:100000. Картен лист Перник. ГИ БАН, Геол. и Геоф. АД, София, 92 с.

Коцев, Ц., Колев, С., Христов, В. 2018. Моделиране на замърсяването на водоносния пласт в резултат на различната минерализация на замърсените и пресните подземни води (на примера на долината на Вълче дере, след хвостохранилище „Елешница"). – Сп. Инженерна геология и хидрогеология, бр. 32, 3-12.

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

Стоянов, Н., С. Стойнев, Ч. Гюров. 2004. Детайлизиране на инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия посредством геоелектрични модели – Сп. "Геол. и минер. рес.", бр. 10, стр. 8-12.

Тоцев, А. 2020. Почвени анкери. Колбис, София, 138 с.

Шанов, С., А. Бендерев, А. Митев, Б. Михайлова, И. Илиева. 2009. Геофизични изследвания за откриване на подземни карстови форми в района на с. Румянцево, Ловешка област , Юбилейна конференция „50 години СПК Академик", 24.10.2008, 135-147.

Daniels, F., Alberty, R. 1975. Physical chemistry. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 687 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.

Dimovski, S., N. Stoyanov, A. Kisyov, M. Yankova. 2013. Detection of zones characterized by different degree of water-saturation and mapping of landslide surfaces by application. - Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophysical Society – Tirana, Albania. 7-10 October 2013, Paper № 18504.

Dimovski, S., N. Stoyanov, C. Tzankov, A. Kisyov. 2017a. A geophysic approach for mapping of abandoned mining workings and unconsolidated zones in coal mining areas. – J. of Mining and Geol. Sciences, Vol. 60, Part I, Geol. and Geoph., pp. 99-103.

Dimovski, S., N. Stoyanov, C. Tzankov, A. Kisyov. 2017b. Application of electrical resistivity tomography for studying fissure-karst water-bearing complexes. – Proc. 9th Congress of the Balkan Geophysical Society, 5-9 Nov., Antalya, Turkey, Paper 44018.

Georgieva, G., A. Kisyov, C. Tzankov, B. Shtirkova, V. Gourev, Y. Ivanov. 2019. Evaluation of geophysical methods for studying snowfields in Pirin Mountain, 10th Congress of the Balkan Geophysical Society, Bulgaria, 2019, Paper BGS2019-ST1.1-N41O2, 5 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.

Grigorova, M. & Koprev, I. 3D model of limestone inclusions in Maritsa Iztok mine based on electrical resistivity tomography, Acta Geobalcanica, vol. 3 (2), pp.51-56, 2017.

Grigorova, M. & Koprev, I. Application of electrical resistivity tomography for sand underwater extraction, 4th International Scientific Conference GEOBALCANICA, North Macedonia, 2018, pp15-20.

Grigorova, M. & Koprev, I. Geophysical investigations of "Starite kolibi" marble deposit in Central Southern Bulgaria, 5th International Scientific Conference GEOBALCANICA, Bulgaria, 2019, pp 37-42.

Ivanov, Y. A. Kisyov, C. Tzankov, S. Nikolov. 2017. Application of electrical resistivity tomography for investigation of landslides. Сборник научных трудов: Международный форум-конкурс молодых ученых "Проблемы недропользования", 19-21 апреля 2017, Санкт-Петербург, Часть II, 62 – 65.

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

Loke, M. 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, 129 p.

Shanov, S., A. Mitev, A. Benderev, K. Kostov, B. Mihailova. 2009. Electrical survey for detailed characterizing of underground karst: Example from Iskar River (Western Bulgaria). 5th Congress of Balkan Geoph. Society – Belgrade, Serbia, Geophiscs the cross road. EAGE, 10 – 16 May 2009, (on CD).

Shanov, S., I. Vasilev, A. Mitev, V. Hristov, B. Mihailova. 2011. Electrical Tomography for Studies of the Inner Structure of Dumps (Open-pit "Ellatzite", Bulgaria), 6th Congress of Balkan Geophysical Society, Hungary, 2011.