



Application of the ERT method at a landslide site characterized by presence of high TDS levels in groundwater

Stefan Dimovski¹, Nikolay Stoyanov²

¹-University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Department of Applied Geophysics, e-mail: dimovski@mgu.bg

²-University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Department of Hydrogeology and Engineering Geology, e-mail: nts@mgu.bg

Keywords: geophysical surveying, ERT method, landslides, high TDS levels in groundwater

Abstract:

Most often the geological section of a landslide site is well differentiated according to electrical resistivity. For this reason geoelectrical techniques are applied for obtaining high-resolution images of the underground resistivity. The main efforts are directed towards determining the landslide surfaces and the contact zones, along which is performed the rock mass movement, as well as establishing the shape, the dimensions, and the spatial situation of the landslide body.

In this study are presented results obtained from the application of ERT method for investigation of a landslide site characterized by presence of high TDS levels in groundwater.

Приложение на метода ERT в свлачищен участък при наличие на подземни води с повишена минерализация

Стефан Димовски¹, Николай Стоянов²

1-Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", Катедра „Приложна геофика“, e-mail: dimovski@mgu.bg

2-Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", Катедра „Хидрогеология и инженерна геология“, e-mail: nts@mgu.bg

Ключови думи: геофизично проучване, ERT метод, свлачище, подземни води с повишена минерализация

Резюме:

Обикновено, свлачищните терени се диференцират много добре по електрични свойства. Поради тази причина, геоелектричните методи успешно се прилагат за получаване на детайлна представа за разпределението на съпротивлението в приповърхностното пространство. Основните цели на подобни проучвания са определяне на свлачищните повърхности и контактните зони, по които се осъществява движението на скалната маса, както и установяване на формата, размерите и пространственото положение на свлачищното тяло.

В това изследване са представени резултатите, получени от прилагането на метода ERT за изследване на свлачищен участък при наличие на подземни води с повишена минерализация.

Въведение

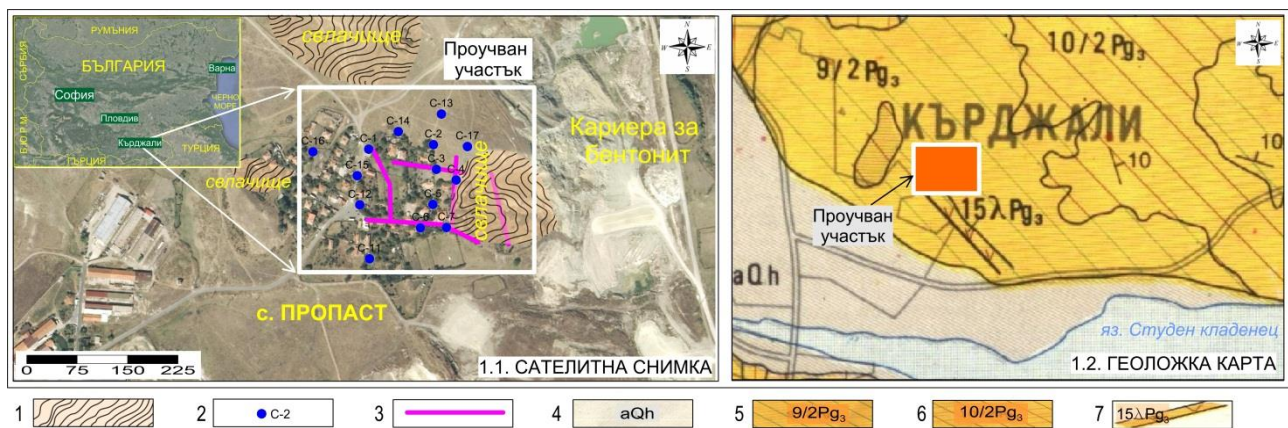
Геофизичните проучвания по метода ERT (Electrical Resistivity Tomography) имат много голямо приложение при картиране на приповърхностния разрез. Ефективността на метода се обуславя от добрата диференциация на отделните компоненти на изследваната среда по специфично електрично съпротивление. За конкретен геоелектричен разрез това свойство на средата зависи от различни предпоставки за изявяване на йонна електропроводност – литоложка характеристика, минерален и зърнометричен състав, степен на вторична промяна, водонаситеност, състав на течната фаза и др. Оттук следва и нееднозначността на решенията при трансформиране на геоелектрични модели в геоложки, хидрогеоложки и други природни или техногенни модели. Затова резултатите от електротомографията е полезно да се интерпретират при отчитане на данните от проведените на обекта сондажни и хидрохимични проучвания.

През последните две-три десетилетия метод ERT намира широко приложение в редица области - геология, хидрогеология, инженерната геология, екология, археология и др. (Димовски и др., 2007, 2012, 2013, 2016; Димовски, 2010; Димовски и Стоянов, 2010, 2011, 2015, 2016; Стоянов и Гюров, 2004; Стоянов и др., 2004; Шанов и др., 2009; Dimovski et al., 2008, 2017; Shanov et al., 2009). С него е възможно да се проучват и свлачищни терени, а резултатите показват висока точност при пространственото детерминиране на хлъзгателни повърхнини и зони с различна водонаситеност в

свлачищните тела (Dimovski et al., 2008; Dimovski et al., 2013; Димовски и др., 2015; Ivanov et al., 2017). Всички досегашни изследвания са свързани с обекти, където регистрираните електрични съпротивления са обусловени от характеристиките на твърдата фаза, както и от степента на наситеност с пресни води. Тук ще представим резултатите от наше проучване по метод ERT на свлачищен участък във вулканогенно-седиментен комплекс с наличие на подземните води с повишена обща минерализация и високи концентрации на сулфатни, хлоридни и натриеви йони. Проучването обхваща приповърхностния разрез до дълбочина около 20-25 m, а теренните измервания са проведени по пет профила с обща дължина 620 m. По време на проучването в част от изградените проучвателни сондажи и в някои от съществуващите в селото кладенци са проведени филтрационни тестове и е изследван химическия състав на подземните води. При интерпретацията са използвани резултати от проучвателно сондиране и данни за състава на подземните води.

Характеристика на изследвания обект

Изследваният обект е на територията на с. Пропаст, разположено в непосредствена близост на изток от гр. Кърджали (Фигура 1). Теренът е нископланински и хълмист. Селото е ситуирано между два хълма с характерна конусовидна вулканска форма. Склоновете им са почти симетрични, малко полегати в източна посока.



Фигура 1. Местоположение на проучвания участък. Сателитна снимка* и геоложка карта** в района на с. Пропаст, гр. Кърджали: 1 – Свлачищни циркуси; 2 – Проучвателен сондаж или кладенец; 3 – Геофизичен профил; 4 – Алувиални образувания на р. Арда - чакъли, пясъци и глини (aQh); 5 – Пачка на среднокисели туфи, туфити, органогенни (рифови) варовици от Задругата на втори среднокисел вулканизъм (9/2Pg₃); 6 – Пачка на риолитови и риодацитови туфи и туфити от Задругата на втори кисел вулканизъм (10/2Pg₃); 7 – Субвулкански тела от латитити, андезити, андезитобазалти и шошонити (15λPg₃).

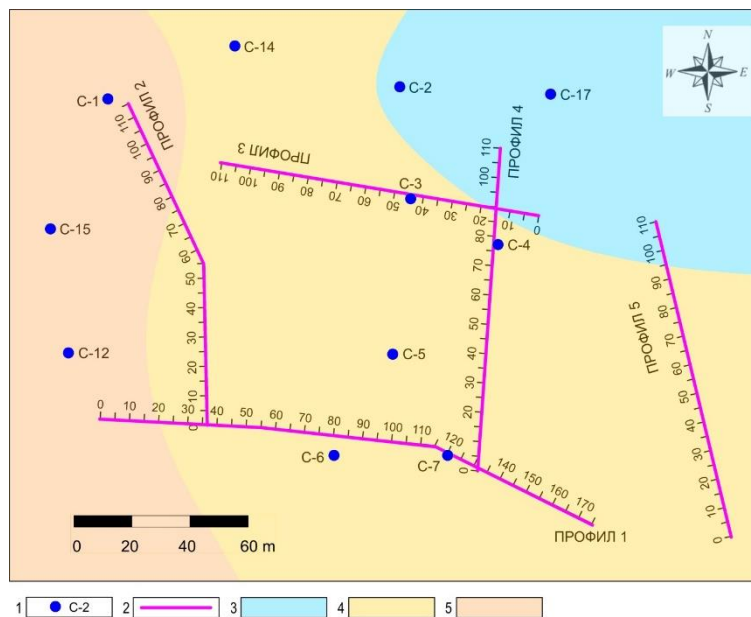
Забележки: * Снимка от Google Earth; ** По Геоложката карта на България, к.л. Кърджали (Кожухаров и др., 1988).

Регионално в геоложкия строеж участват палеогенски вулкански и вулканогенно-седиментни скали от състава на три формации, чието повърхностно разпространение е представено на Фигура 1. На изток от гр. Кърджали според (Кожухаров и др., 1995) разрезът е представен основно от бентонитови глини (хидротермално променени среднокисели витрокластични туфи) с дебелина около 50 m, глинясали среднокисели туфобрекчи на места с много вулкански бомби - 10-20 m и глинясали среднокисели псамитови туфи - до 20 m. В землището на с. Пропаст, респ. в границите на проучвания участък са установени три литоложки хоризонта: (1) туфи, изграждащи горните конусовидни части на хълмовете, а също и отделни сектори в южната част на селото; (2) бентонитни глини, жълтозелени, пластични до твърди, имащи повсеместно разпространение в по-ниските части на терена като добре издържан пласт с дебелина около 9-10 m; (3) бентонитни глини, сивосинкави, твърди, в слоеве до частично споени, залягащи под жълтозелените като добре издържан пласт с дебелина до 40 m. Глинестите хоризонти формират горния и долния продуктивен пласт в изградената на изток под с. Пропаст кариера за добив на бентонит. Подложка на бентонитните глини е вулканогенно-седиментен комплекс от туфи, туфо-андезити, туфоваровици и мергели. В ниските части на терена приповърхностният разрез е изграден от тъмнокафяви и сивочерни органични глини с дебелина до 3

m. Между тях и бентонитните глини се разкрива тънък слой от елувиални сивокафяви и сивозелени пластични глини. В района са околнени няколко древни свлачищни циркуса (участъка), от които съвременни активни процеси са изяви единствено в обсега на циркуса на изток от с. Пропасть, развит до кариерата за бентонит. Древният му произход е свързан с изява на специфични екзогенни и съпътстващи колебателни процеси. Активни свлачищни процеси са регистрирани и по бордовете на кариерата за бентонит, като произходът им е изцяло техногенен. Обект на изследване по метод ERT е застрашената от свлачищните процеси източна половина на с. Пропасть и западните високи части от циркуса.

Формираните в приповърхностните части на геоложки разрез подземни води са инфилтrogenни, с плитка циркулация, безнапорни до слабонапорни. Те са привързани основно към туфите от първия литоложки хоризонт, които са относително водопроникливи с коефициент на филтрация $8E-2$ m/d. Пресни са, с доста ниска минерализация (около и под 0.5 g/l), като на места имат питейни качества. Тези води се инфилтрират в дълбочина и насищат бентонитните жълтозелени глини от втория литоложки хоризонт. Водопроникливостта на тези глини е ниска (най-често от $1E-3$ до $1E-4$ m/d), което предполага много бавен водообмен. На по-голяма дълбочина, в третия литоложки хоризонт водопроникливостта е изключително ниска (под $1E-4$ m/d), т.е. сивозелените глини представляват практически водоупор. В резултат на активен масообмен с твърдата фаза и смесване подземните води в бентонитовия комплекс са с повишена обща минерализация (от 1 до около 6 g/l) и високи концентрации на сулфатни, хлоридни и натриеви йони.

По данни от хидрохимичното опробване на проучвателните сондажи и съществуващите кладенци е съставена хидрохимична карта по обща минерализация и тип на подземните води, която е допълнена и верифицирана с резултатите от проведеното геоелектрично проучване (Фигура 2).



Фигура 2. Ситуационен план с разположението на геофизичните профили. Хидрохимична карта по обща минерализация и тип на подземните води. 1 – проучвателен сондаж; 2 – геофизичен профил; 3 – пресни подземни води (под 1 g/l), тип $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$; 4 – слабо солени до солени подземни води ($1\text{-}5$ g/l), тип $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$; 5 – солени подземни води (над 5 g/l), тип $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ и $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$.

На територията на изследвания обект са отделени три зони. В **Зона 1** подземните води са привързани към туфите в първия (горния) литоложки хоризонт. Те са пресни, с общата минерализация под 1 g/l, по тип $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$. В **Зона 2** подземните води, акумулирани в бентонитните глини, в геоложкото време са претърпели постепенно опресняване в резултат на водонасищане с пресни води от туфите и от инфилтрация на валежни води. Те са слабо солени до солени, с обща минерализация между 1 и 5 g/l, по тип $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$. В **Зона 3** водите са капсулирани в бентонитните глини затворена, без възможности за активен водообмен, трудно се оттичат и опресняват. Те са запазили в максимална степен първичния си химичен състав, свързан с образуването на вулканските материали



в полусолена морска среда. Тук подземните води са солени, с обща минерализация над 5 g/l, по тип SO₄-Cl-Na и Cl-SO₄-Na.

Методика и инструменти

Използваният метод ERT е подходящ за двумерно картиране на приповърхностния разрез във вертикални разрези по профили. Теренните измервания са проведени по 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 В, производство на шведската фирма АВЕМ.

Измерванията са изпълнени по пет профила с обща дължина 620 m. Първият профил е с дължина 175 m, вторият профил - с дължина 115 m, останалите три профила са с дължини по 110 m. Точното местоположение на петте профила с разположението на електродите по всеки един от тях е представено на Фигура 2.

При обработката на полевите данни е използвана компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001), с която са получени разрез на реалното разпределение на електричните съпротивления по петте профила. Преходът от геоелектричен разрез в геоложки, инженерногеоложки или хидрогеоложки модел се прави като при последващата интерпретация на получените с програмата геоелектрична картина се корелира с: (1) обща информация за конкретните геолого-тектонски условия в района; (2) литературни данни за специфичните електрични съпротивления на различните типове скали (Daniels and Alberty, 1966; Keller and Frischknecht, 1966); (3) данни от проучвателно сондиране и хидрохимичното опробване.

Анализ и интерпретация на получените резултати

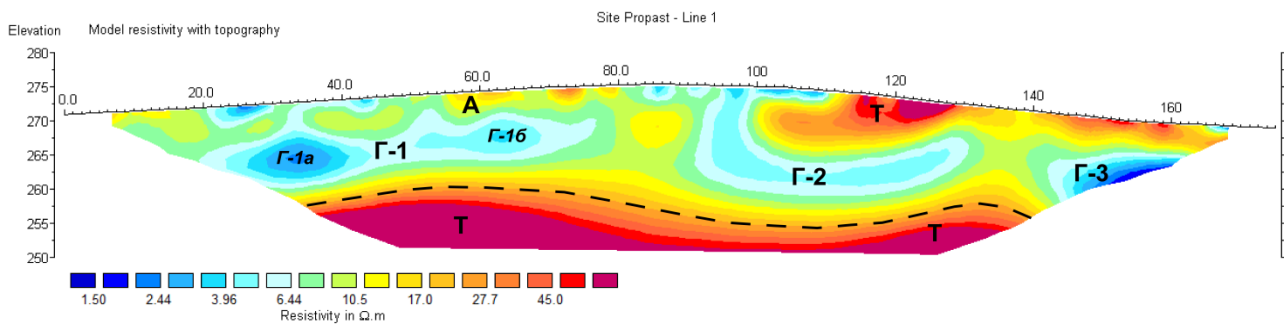
Полученото с програма RES2DINV разпределение на действителните съпротивления в разрезите по петте профила, са представени на Фигура 3, Фигура 4, Фигура 5, Фигура 6 и Фигура 7. Комплексният анализ на геоелектричните разрези, резултатите от сондажното проучване и данните за наличието на подземни води с повишена обща минерализация дава основание да направим следните по-важни констатации и изводи:

- (1) Електричното съпротивление на разновидностите, които изграждат изследвания геоложки разрез са много ниски и варират в относително тесен диапазон – от 1.5 Ωm до 50 Ωm, като преобладават ниските стойности. Установените специфични съпротивления не корелират тясно с табличните стойности за документираните в проучвателните сондажи литоложки разновидности – глини, туфи и преходите между тях. Това е свързано не толкова с вторичната промяна и степента на водонасищане на скалите, а главно с доминиращото присъствие на слабо солени и солени подземни води с обща минерализация най-често между 1.5 и 5.5 g/l.
- (2) Регистрираните електрични съпротивления на литоложките разновидности в наситения геоложки комплекс с води 3 до 10 пъти по-солени от пресните подземни води, са с около 1 порядък по-ниски от табличните им стойности.
- (3) Най-обобщено, отчитайки наличието на слабосолени и солени води, в подповърхностното пространство се отделят еднозначно три електросъпротивителни среди, картиращи три литоложки пласта (зони).
 - Приповърхностен пласт, представен от ненаситени хумусни глини, насипи и изветрели туфи с електрично съпротивление в интервала от 12 до 24 Ωm и с много променлива дебелина – **Зона А**. Установените няколко по-високоомни зони маркират няколко участъка с изветрели порьозни туфи (сухи).
 - Пласт от глини, бентонитни, с много висока йонна електропроводност и много ниско електрично съпротивление (от 1.5 до 6.0 Ωm) – **Зона Г**. Има повсеместно разпространение, оформя поредица от нискоомни верижно свързани лещовидни образувания – подзони от първи ранг (Г-1, Г-2, Г-3) и подзони от втори ранг (Г-1а, Г-1б). Големите оси на елиптичните сечения на тези лещи са почти успоредни на терена. Глините в ненаситената зона (над нивото на подземните води) се

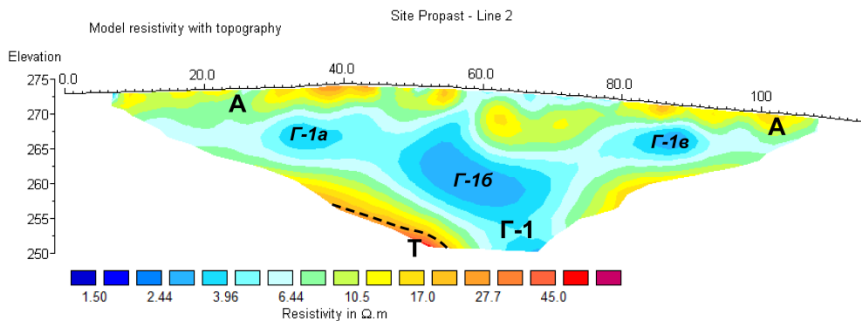
характеризират с намалена йонна електропроводност и електрично съпротивление, съизмеримо с това на хумусните глини, насипите и изветрелите туфи.

- Подложен пласт с относително по-ниска йонна електропроводност и по-високо електрично съпротивление (от 30 до 45 Ωm и повече) - **Зона Т**. Представен е от твърди глини с привидно брекчовидна структура, в някои интервали прослоени с по-здрави (полуспоени) слоеве. Възможно е и присъствието на туфи. По профил 1 подложният пласт е много добре издържан, изграден е най-вероятно от туфи, които в дълбочина се уплътняват. По другите четири профила този пласт е много слабо изразен за достигнатата дълбочина на проучване и най-вероятно е представен основно от твърдите глини с привидно брекчовидна структура.

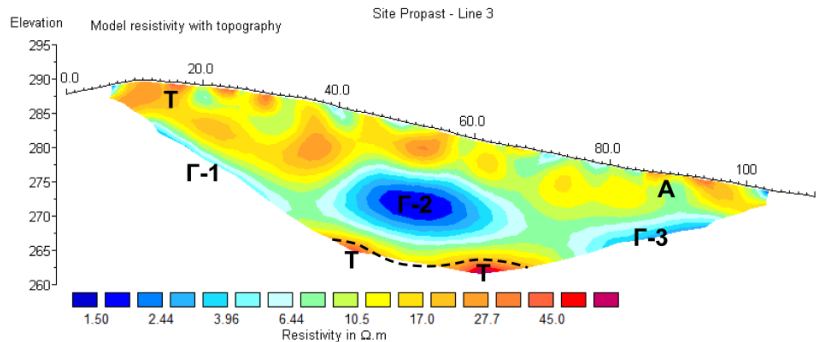
(4) Еднозначно картираната отчетлива електросъпротивителна граница между пласта глини (**Зона Г**) и подложния пласт (**Зона Т**) дава основание тя да се идентифицира със свлачищна повърхнина. Тази повърхнина съществува и при естествено пластово налягане и вероятно е допринесла за разпокъсване на слоя от глини в поредица от лещообразни образувания, които отразяват поведението на терена. Нарушаването на естествените условия от кариерата за добив на бентонит активира свлачищния процес.



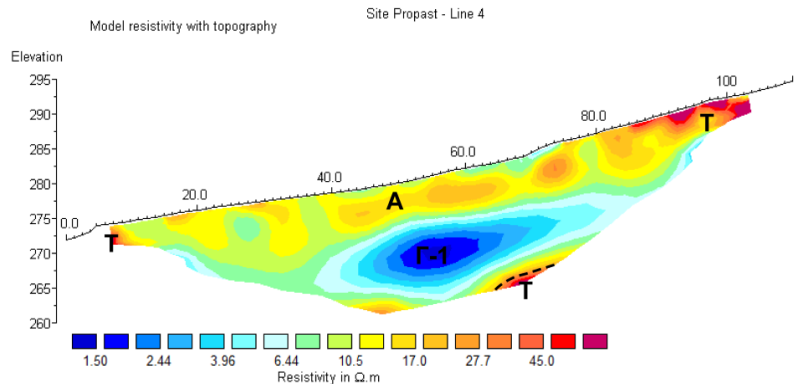
Фигура 3. Разпределение на електричното съпротивление по Профил 1



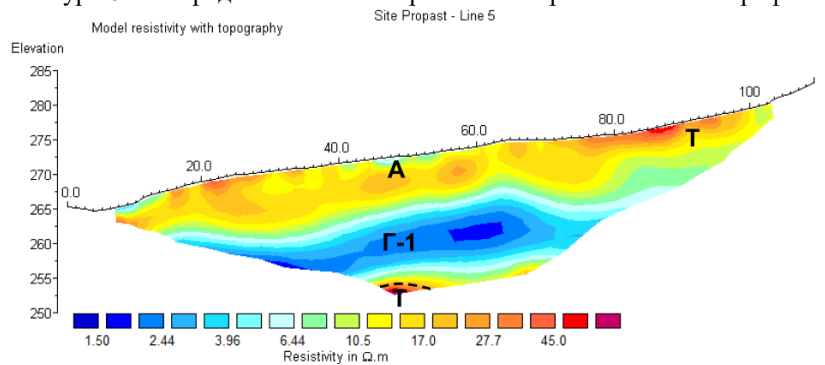
Фигура 4. Разпределение на електричното съпротивление по Профил 2



Фигура 5. Разпределение на електричното съпротивление по Профил 3



Фигура 6. Разпределение на електричното съпротивление по Профил 4



Фигура 7. Разпределение на електричното съпротивление по Профил 5

Благодарности

В изследването са използвани данни, предоставени от фонда на фирма „Геотехника АБС“ ООД – К. Кузманов. Доклад за инженерногеоложко проучване в района на с. Пропаст, общ. Кърджали. Изследване геотехническите свойства на земната основа и оценка на факторите предизвикали деформации на сградите.

Заклучение

Представеното геофизично проучване по метод ERT демонстрира ефективността от прилагането на комплексен подход при интерпретацията на геоелектрични модели, получени при изследване на свлачищни терени в сложни геоложки комплекси и наличие на подземни с повишена минерализация. Същият подход успешно може да се използва за прилагане на този и други геоелектрични методи при изследване и/или изучаване на различни феномени в сходни геоложки и хидрогеохимични условия.

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, Ст., Н. Стоянов, Хр. Цанков, Ат. Кисъов. 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, Ст., Н. Стоянов, Ат. Кисъов. 2013. Приложение на електротомографията за картиране на суфозионни зони. – Год. МГУ “Св. Ив.Рилски”, т.55, св. I, Геол. геоф., 96-101.
- Димовски, Ст., Н. Стоянов, М. Янкова, Ат. Кисъов. 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, Ст., Н. Стоянов. 2015. Локализиране на подходящи места за изграждане на мониторингови кладенци в слабодоносен скален комплекс. – Год. МГУ “Св. Ив.Рилски”, т.58, св. I, Геол. геоф., 140-145.
- Димовски, Ст., 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, Ст., Н. Стоянов, Ив. 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)
- Кожухаров, Д., И. Боянов, А. Горанов, Й. Янев, Ж. Шиляфова, М. Русева. 1989. Геоложка карта на България М 1:100000. Картен лист Кърджали. ВТС
- Кожухаров, Д., А. Горанов, И. Боянов, Е. Кожухарова, Ж. Шиляфова, М. Русева. 1995. Обяснителна записка към Геоложка карта на България М 1:100000. Картен лист Кърджали. КГМР, ГИ БАН, Геол. и Геоф. АД, София, 87 с.
- Стоянов, Н., Ч. Гюров. 2004. Оценка на замърсяването на подземните води по метода на 2D електросъпротивително проучване по схемата полюс-дипол – Год. МГУ “Св. Ив.Рилски”, т.47, св. I, Геол. геоф., 219-224.
- Стоянов, Н., Ст. Стойнев, Ч. Гюров. 2004. Детайлизиране на инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия посредством геоелектрични модели – Сп. “Геол. и минер. рес.”, бр. 10, стр. 8-12.
- Шанов, Ст., 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., R. A. Alberty. 1966. Physical chemistry. John Wiley and Sons, Inc.
- Daniels F., Alberty, R. A. 1966. Physical chemistry. John Wiley and Sons, Inc., 674 p.
- Dimovski, S., N. Stoyanov, S. Kostyanov. 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, Ch. Tzankov, A. Kisyov. 2017. 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, Ch. Tzankov, A. Kisyov. 2017. 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.
- 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.
- Ivanov, Y. At. Kisyov, Ch. 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.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, 129 p.
- Shanov S., Mitev A., Benderev A., Kostov K., Mihailova B. 2009. Electrical survey for detailed characterizing of underground karst: Example from Iskar River (Western Bulgaria). 5th Congress of Balkan Geoph. Society – Belgrade, Serbia, Geophysics the cross road. EAGE, 10 – 16 May 2009, (on CD).