

КОМПЛЕКСЕН ГЕОФИЗИЧЕН ПОДХОД ЗА ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ВОДОПРОПУСКЛИВИ ЗОНИ В ЗЕМНОНАСИПНА СТЕНА НА ПОВЪРХНОСТЕН ВОДОЕМ

Стефан Димовски, Николай Стоянов, Християн Цанков, Атанас Кисьов

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

РЕЗЮМЕ. Наличието на разуплътнени и водопроникуеми зони в стените на повърхностните водоеми нарушава тяхното нормално функциониране, а би могло да доведе и до компрометиране (разрушаване) на тези съоръжения. Предложеният комплексен геофизичен подход за локализиране на проблемните участъци включва прилагането на два геоелектрични метода - георадар и електротомография. Възможностите за картиране на водопроникуеми зони и ефективността от прилагане на подхода е илюстрирана с резултатите от проведеното георадарно и електротомографско проучване на земнонасипната стена на изравнителен водоем „Кричим“. Представените резултати потвърждават приложимостта на използваната методика на измерване, анализ и интерпретация на данните.

AN INTEGRATED GEOPHYSICAL APPROACH FOR LOCATING WATER-PERMEABLE ZONES IN THE EMBANKMENT WALL OF A SURFACE WATER BODY

Stefan Dimovski, Nikolay Stoyanov, Hristian Tsankov, Atanas Kisiov

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

ABSTRACT. The presence of non-compacted and water-permeable zones in the walls of surface water bodies violates their normal functioning and could lead to a compromising (destruction) of these facilities. The proposed integrated geophysical approach for locating the problematic areas include the application of two geoelectrical methods – GPR and resistivity tomography. The possibilities for mapping of water-permeable zones and the efficiency of the proposed approach implementation is illustrated by the results of the performed GPR and electrical tomography surveying of the embankment wall of the equalizing dam "Krichim". The presented results confirm the applicability of the employed methodology for measurement, analysis and interpretation of data.

Въведение

Важен въпрос, свързан с безопасната експлоатация на изкуствените повърхностни водоеми (язовирите), е организирането и провеждането на системни наблюдения с цел установяване на течове през язовирните стени (бентове). Възникването и развитието на подобни процеси е вследствие формиране на напукани, разуплътнени и водопроникуеми зони в стените на водоемите, които нарушават нормалното им функциониране, а е възможно да доведат и до разрушаване на тези съоръжения. Ето защо, след регистриране на течове, силно овлажнени или видимо нарушени участъци в сухия откос на язовирните стени, е необходимо в кратък срок да се направи проучване за локализиране и количествена оценка на зони с повишена водопроникуемост. Проучването трябва да засегне и генезиса на разуплътнените зони, с което ще помогне за по-ефективното и трайно решаване на проблема с техническата изправност на съоръжението.

Най-общо първият етап на проучването включва преглед на наличната документация за изграждане и/или реконструкция на стената, за експлоатацията на водоема, в това число данните от мониторинга, и детайлен оглед на проблемните участъци. Вторият етап включва специализирани изследвания за установяване и определяне на размерите и пространствените граници на разуплътнените

зони. Тази задача може да се изпълни посредством различни косвени и/или преки методи и техники за изследване. В групата на косвените попадат геофизичните методи, които имат предимствата: бързина на изследването, не нарушават целостта на стената, подробно картиране на пространствените граници, ниски финансови разходи. Към групата на преките методи се отнасят сондажните проучвания, полевите филтрационни тестове, лабораторните изпитвания на взети от стената проби и др. Главното предимство на тази група методи е, че дават възможност за количествена оценка на степента на разуплътненост и водопроникуемост в изследваните участъци. Косвените методи са много ефективни и могат да се използват като единствено средство за изследване на проблемни бентове, особено за по-малки водоеми. При големи и с много важно значение технически съоръжения, обаче, наред с косвените методи е наложително да се прилагат и преки методи за оценка.

За картиране на разуплътнени и водопроникуеми зони в язовирните стени с успех могат да се използват различни геофизични методи – вертикално електрическо сондиране (ВЕС), електротомографско 2D проучване (електротомография), георадарно проучване, сеизмично профилиране и др. Предложеният от нашия екип комплексен подход включва прилагане на два метода – електротомография и георадар. Неговите възможности за картиране на раз-

уплътнени и водопрпускливи зони са илюстрирани с резултатите от проведеното проучване на земнонасипната стена на изравнителен водоем „Кричим“.

Кратка информация за изследвания обект. Описание на проблема

Обект на изследване е част от земнонасипната стена (дигата) на изравнителен водоем „Кричим“ (фиг. 1). По-конкретно, измерванията *in situ* са изпълнени в участъка на новоизградените водовземна шахта и тръбопровод за МВЕЦ „Лозята-1“ по проект на „Стройексперт инженеринг“ ЕООД. При изпълнението на този проект, североизточната част от стената в участък с дължина около 35-40 m е разрушена. След изграждане на водовземната шахта и напорния водопровод стената е възстановена. Впоследствие, при напълване на водоема до проектното ниво, са възникнали течове в петата на сухия откос в новия (възстановения) участък на стената.

Изследването за локализиране на неуплътнени и водопрпускливи зони в обхвата на възстановения участък на стената на водоема и под нейната основа е изпълнено при съвместно прилагане електротомография и георадар.

Измерванията по всеки от използваните методи са изпълнени по 2 профила с обща дължина 200 m. Точното разположение на профилите е представено на фиг. 2.



Фиг. 1. Местоположение на изследвания обект

Методи и техника на изследването

За локализиране на водопрпускливи зони в новоизградения участък на стената на изравнител „Кричим“ са използвани два геофизични метода:

- Електротомографско 2D проучване;
- Георадарно проучване.

Съвместното прилагане на двата метода дава по-голяма увереност при анализа и интерпретацията на резултатите от геофизичното проучване.

Електротомографско 2D проучване. Методът се прилага

за картиране на приповърхностния разрез във вертикални разрези по профили. Измерванията се изпълняват чрез свързани към многожилен кабел електроди (Griffiths et al., 1990) по 4-електродна схема Schlumberger и апаратура Terrameter SAS 1000 В. Използват се две коси от 12 жилен кабел с разстояние между електродите 3,5 m. За обработка на полевите данни се използва компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001). Програмата дава двумерното (в разрез) разпределение на действителните електрични съпротивления. Полученият геоелектричен модел се трансформира в хидрогеоложки модел на изследваната техногенна среда (стената) и нейната земна основа въз основа на:

- обща информация за геоложките, хидрогеоложките и техногенните условия в изследвания район;
- литературни данни за специфичните електрични съпротивления на различните типове скали (Keller and Frischknecht, 1966; Daniels and Albery, 1966 и др.);
- информация за строежа на геоложката основа, нивото на подземните води и нивото във водоема;
- данни за конструктивните параметри на стената и преминаващите през нея съоръжения.

Георадарно проучване. Приложимостта на георадара в практиката се обуславя от наличието на контраст в диелектричните свойства на проучваната среда и/или търсените обекти. Методът се състои в излъчване на електромагнитни вълни в изследваната среда, приемане на отразените от елементите на средата вълни и анализ на получените данни. Полученото, в резултат на проведените измервания и допълнителна обработка, изображение дава представа за размерите и пространственото разпределение на скритите обекти и/или структури.

Георадарът се състои от командно устройство, антена (предавател и приемник) и захранване. В командното устройство се генерира правоъгълен импулс, който се подава към антената предавател. В нея всеки правоъгълен импулс се трансформира във високочестотен биполярен импулс и се излъчва към изследваната част от подповърхностното пространство. Проникващият импулс контактува с обекти с различни специфична електропроводимост и диелектрична константа. На границата между две среди с различни електрични параметри част от сигнала се отразява (отразена вълна), а останалата част преминава във втората среда. Отразените сигнали достигат до приемната антена и се изпращат в командното устройство, което записва двойния път на времето на разпространение на отразените вълни. Георадарното изображение (радарграмата) се наблюдава в реално време на дисплей. След прехвърлянето на данните в мощен компютър, полевите данни подлежат на допълнителна обработка със специализиран софтуер.

При измерванията се ползват георадар модел SIR-3000 на Geophysical Survey Systems Inc., USA, средночестотна антена GSSI модел 5104A с дълбочина на проникване 6 m и нискочестотна антена модел SUBECHO-150 с дълбочина на проникване до 25 m. Апаратурата е предназначена за решаване на инженерно-геоложки, геотехнически, хидрогеоложки и археоложки задачи. Данните от полевите измервания се обработват с програмата ReflexW.

Обем на теренните измервания

Електротомографски измервания. Проведените електротомографски измервания са изпълнени по два геофизични профила с обща дължина 203 m – вж. фиг. 2. Първият електротомографски профил (ЕТП 1) преминава по короната на стената и е с дължина по 122.5 m. Вторият електротомографски профил (ЕТП 2) в по-голямата си част се разполага по бермата в сухия откос на стената. Неговата дължина е 80,5 m. Теренните измервания са направени по 4-електродна схема Schlumberger с помощта на две коси от 12 жилин кабел и разстояние между електродите е 3,5 m.

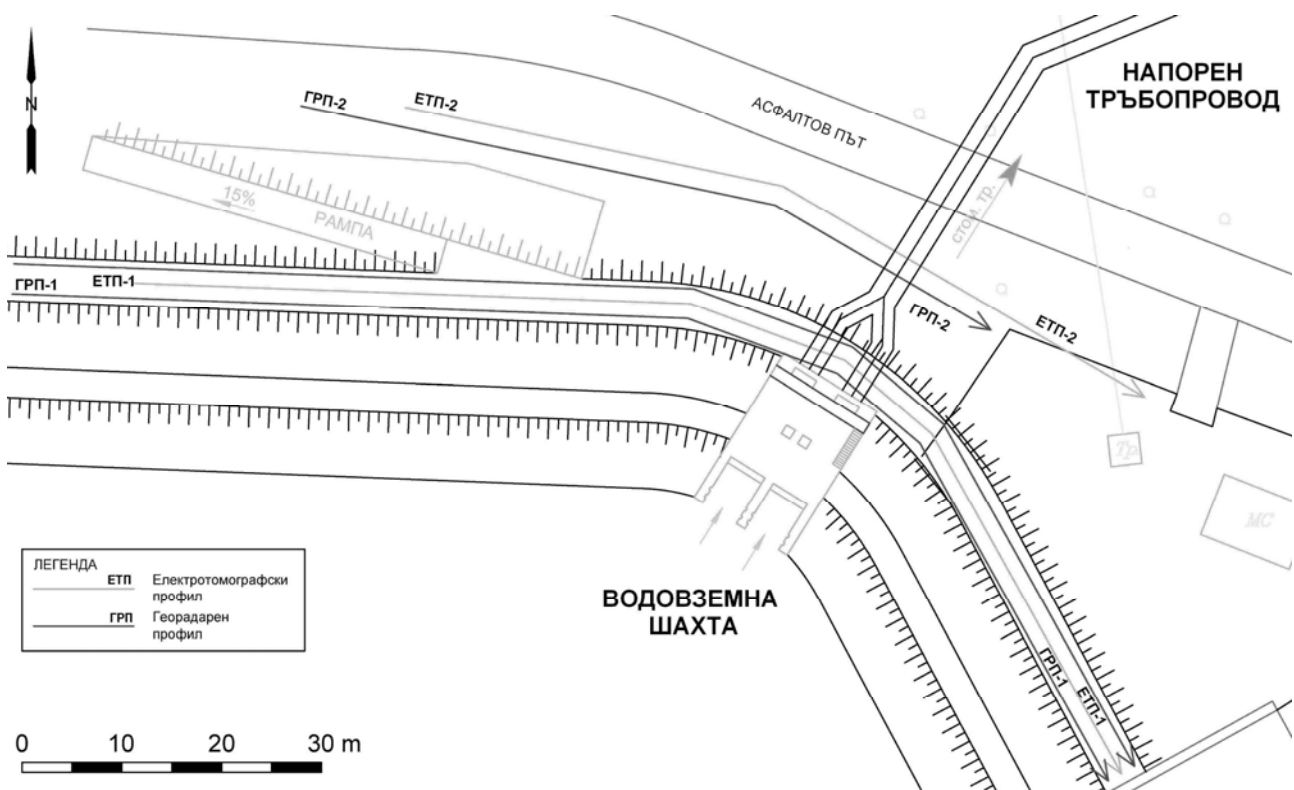
Георадарни измервания. Георадарните измервания са проведени по два основни профила с обща дължина 209,4 m, които в основната си част припокриват електротомографските профили (фиг. 2). Първият георадарен профил (ГРП-1) е разположен по короната на стената, а вторият (ГРП-2) на бермата над шосето за гр. Кричим. Всички профили се намират в североизточния край на участъка от стената в непосредствена близост до новоизградените водоземна шахта и напорен тръбопровод (фиг. 2). За гарантиране качеството на събраните георадарни данни, профилите са повторени няколкократно с минимален отстъп един от друг. По време на измерването са използвани два вида антени с различна разделителна способност и дълбочина на проникване представени по-горе. Придвижването по профилите е осъществено с количка за пресечен терен модел 643, снабдена с електронноизмервателно колело, към която се прикрепват георадарът и измервателната антена. Данните от

георадарните изследвания са натрупани в 16 bit *.dzt (RADAN) формат и прехвърлени на работна станция за постпроцесинг.

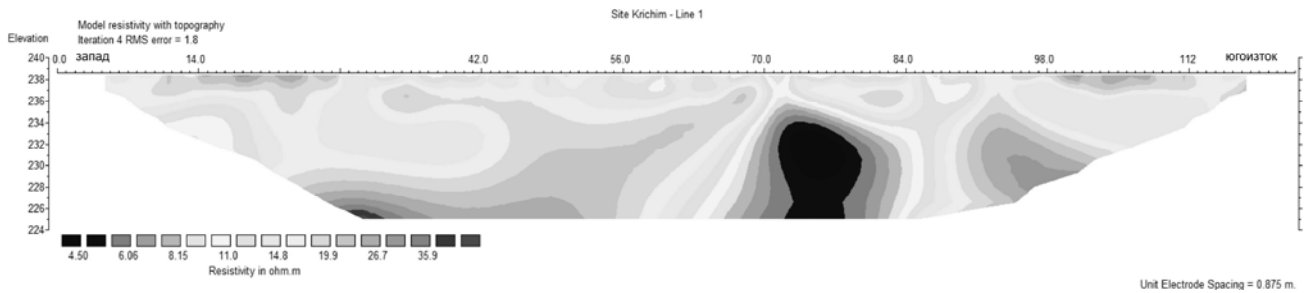
Обработка на данните от теренните измервания. Резултати

Обработка и резултати от електротомографията. Данните от полевите електротомографски измервания са интерпретирани с компютърна програма RES2DINV и е детерминирано разпределението на действителните съпротивления в подповърхностното пространство. Получените по двата профила геоелектрични разрези (ЕТП-1 и ЕТП-2) са илюстрирани на фиг. 3 и фиг. 4. Анализът на съставените геоелектрични разрези позволява да се направят следните по-важни изводи:

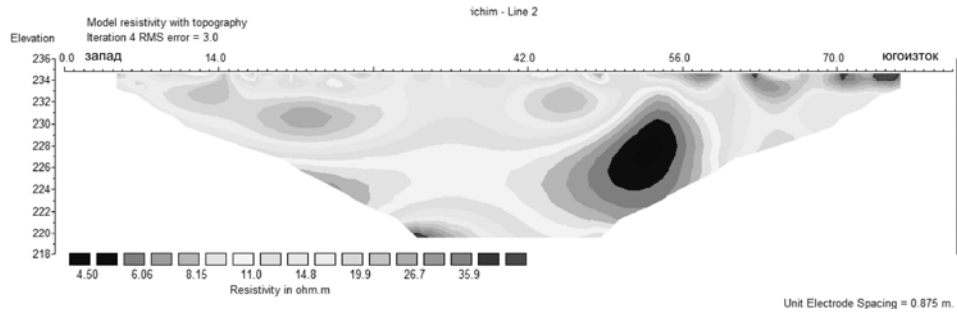
- Геоелектричният разрез по двата профила е добре издържан по разпределението на електричното съпротивление в дълбочина.
- Електричното съпротивление на разновидностите (средите), които изграждат изследвания разрез свидетелства за присъствие на подчертано изразена йонна проводимост. Стойностите на електричното съпротивление са ниски и варират в относително тесни граници – от 4 Ω m до около 50 Ω m и повече.
- Най-обобщено изследваният геоелектричен разрез се представя от няколко електросъпротивителни среди, маркиращи зони с различен състав, степен на водоненситеност и водопропускливост.



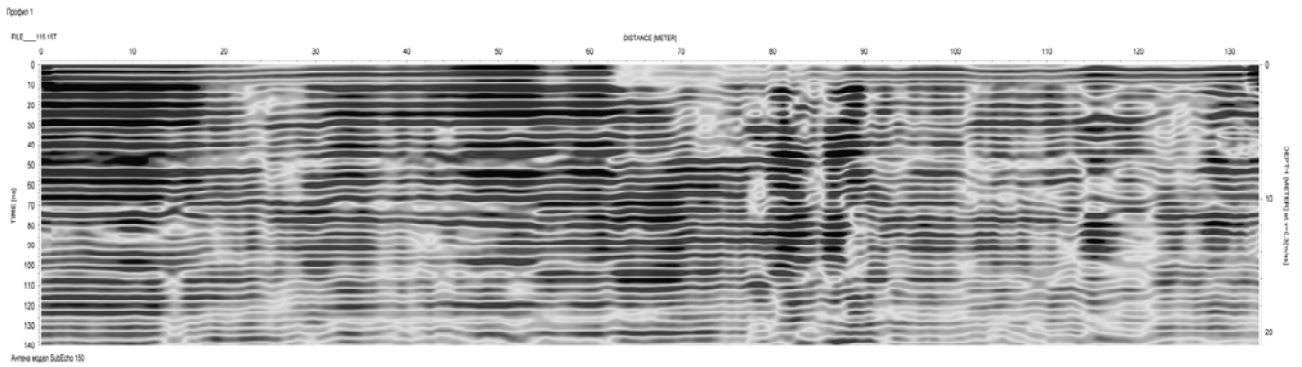
Фиг. 2. Местоположение на геофизичните профили



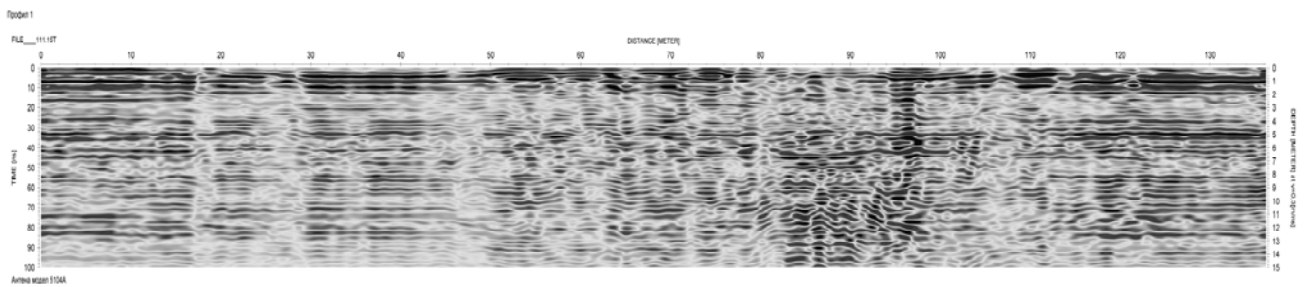
Фиг. 3. Разпределение на електричното съпротивление по ЕТП 1 (ситуационният план е представен на фиг. 2)



Фиг. 4. Разпределение на електричното съпротивление по ЕТП 2 (ситуационният план е представен на фиг. 2)

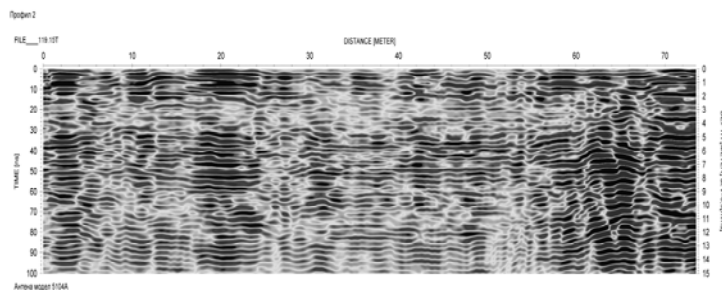


(а) по данни от измерванията с георадарна антена модел SUBECHO-150



(б) по данни от измерванията с георадарна антена модел 5104A

Фиг. 5. Радарграми по ГРП 1 (ситуационният план е представен на фиг. 2)



Фиг. 6. Радарграма по ГРП 2 (ситуационният план е представен на фиг. 2)

- *Първата електросъпротивителна среда* има най-ниски стойности на електричното съпротивление – най-често в границите от 4 Ω м до 8 Ω м. Тази среда вероятно картира най-водопроникливите части от подповърхностното пространство или зони, в които финнодисперсните и глинестите фракции имат доминиращо присъствие. В обхвата ѝ естествено попадат и електропроводящите стоманени тръби на напорния водопровод;
- *Втората електросъпротивителна среда* очертава зони с електрично съпротивление в обхват от 8 Ω м до 15 Ω м. Тези зони най-вероятно са водонаситени, водопроникливи или са изградени от дребнозърнести и финодисперсни материали;
- *Третата електросъпротивителна среда* притежава най-високи стойности на електричното съпротивление – над 15-20 Ω м. Тази среда вероятно картира сухи, слабо водонаситени или много слабо водопроникливи части от стената или зони и пластове от геоложката основа, в които преобладават по-едри фракции (пясъци и чакъли).
- Изразените градиентни преходи маркират границата между ненаситената и водонаситената зона (водното ниво) в стената и нивото на подземните води.

Обработка и резултати от георадара. Теренните георадарни данни са набрани в RADAN формат (*.dzt), след което са обработени в ReflexW. Стандартно са извършени следните процедури: (00) преориентиране на всички георадарни профили в една посока (запад-изток); (01) премахване на изкуствените пикове на амплитудите на отделните трасета; (02) коригиране на несиметричността на сигнала; (03) фиксиране нивото на земната повърхност в данните по времената на встъпление; (04) добавяне на стандартен ниско/високофреkwотен филтър, съгласуван с централната честота на използваните антени; (05) премахване на автоматичното усилване на сигнала; (06) ръчно въвеждане на усилване на сигнала; (07) премахване на линейния фон от радарграмите; (08) нормиране силата на сигнала на отделните радарграми; (09) ръчно конструиране и прилагане на времево-пространствени филтри за допълнително изчистване на шума от данните; (10) коригиране на енергийните нива на сигнала. При отделни радарграми е извършена допълнителна обработка за постигане максимална чистота на сигнала, надеждност на интерпретацията и съвместимост между отделните профили.

За правилна интерпретация на георадарните данни е необходимо да се определи скоростта на преминаване на електромагнитната вълна през изследваната среда. За целта е използван участък от тестов профил, преминаващ над напорния водопровод с диаметър 300 см. Дълбочината на горницето му под земната повърхност в профилирания участък е около 3,5 м. Скоростта на георадарните електромагнитни вълни е определена чрез последователни ръчно въведени промени в стойностите ѝ. По този начин е намерено възможно най-добро съвпадение на първото встъпление на вълната на границата между вместващата среда и тръбата като същевременно дълбочината по вертикалната ос отговаря на реалната. Получената скорост $v = 0,15$ m/ns е близка до табличната скорост за плътни сухи глинести почви, която е $v = 0.173$

m/s. Тази стойност може да се приеме за достоверна, тъй като земнонаситената стена е изградена от глина. На радарграмите скоростта по вертикалната ос (вдясно) има два пъти по-големи стойности, защото се отчита двойният път на времето, т.е. от предавателя до отражателната повърхност и обратно – от отражателната повърхност до приемника.

Георадарните профили картират достатъчно плътно изследваната площ. На фиг. 5 и фиг. 6 са представени радарграмите, получени след обработката на данните и въвеждането на скоростите. На тях ясно се вижда наличието на нееднородности в структурата на стената на водоема и геоложката основа.

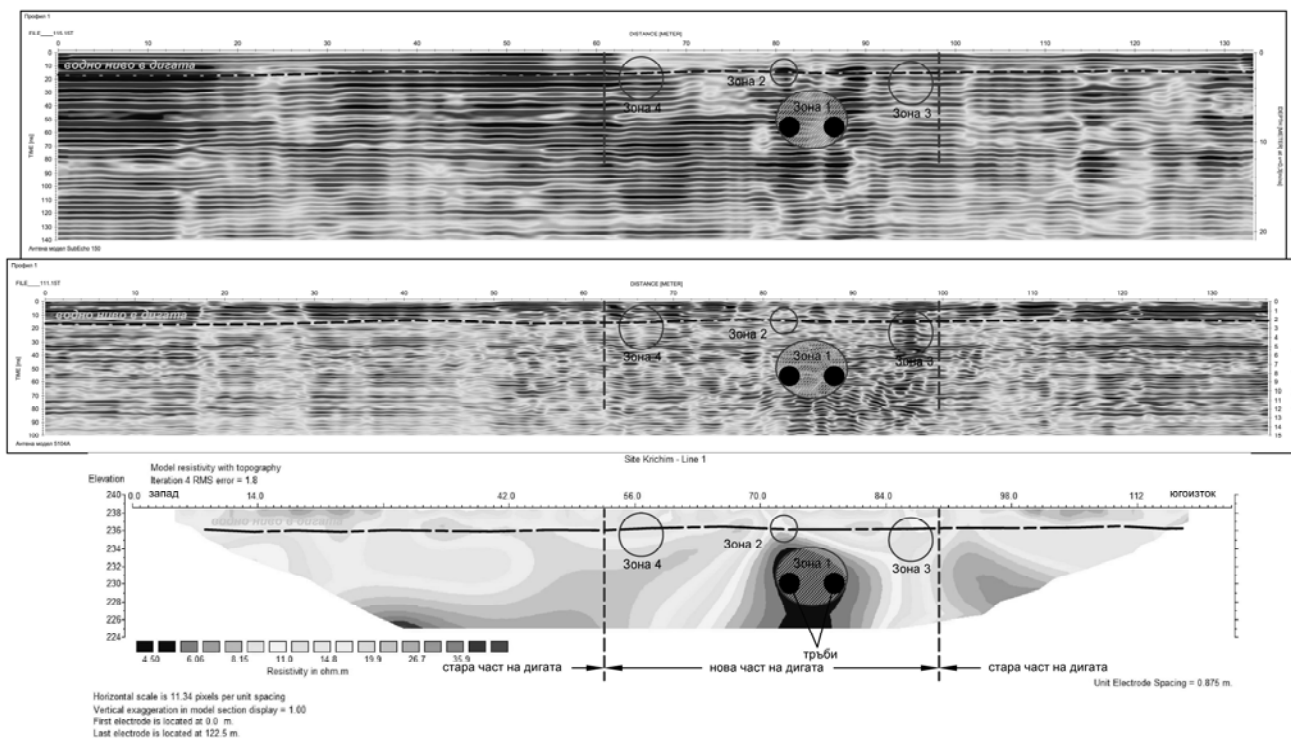
Анализ на резултатите и изводи

Комплексният анализ на резултатите от проведените електротомографски и георадарни проучвания и в съответствие с проектните параметри на водовземната шахта и тръбопровода за МВЕЦ „Лозята-1“ дава основание да се направят следните по-важни констатации.

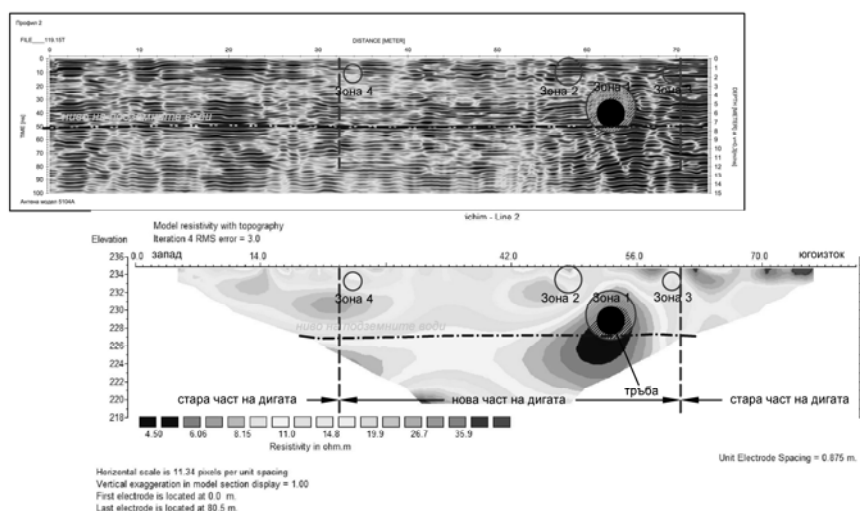
- (1) В новоизградения участък на стената на изравнителен водоем „Кричим“ се установяват четири зони с по-голяма водопроникливост:
 - *Зона-1* – очертава пространството около и над тръбите на напорния водопровод;
 - *Зона-2* – обхваща приповърхностната част на разреза до дълбочина 2-3 м и на около 1-4 м западно от оста на напорния водопровод;
 - *Зона-3* – развита е в най-източната част на новоизградения участък на площ с ширина 5-6 м и до дълбочина 3-4 м, в непосредствена близост до границата със старата част на стената;
 - *Зона-4* – заема западната приповърхностна част на новоизградения участък до дълбочина 2-3 м, в близост до границата със старата стена.
- (2) Водното ниво в стената се установява на дълбочина 2,3 – 2,5 м.
- (3) Нивото на подземните води е на дълбочина 7-8 м от земната повърхност.

Разположението на детерминирани зони с повишена водопроникливост, водното ниво в стената и нивото на подземните води е представено на фиг. 7 и фиг. 8.

Установените по-силно водопроникливи зони в новия участък на стената на изравнителен водоем „Кричим“ са предпоставка за възникване на течове в сухия откос при повишаване на водното ниво до проектната максимална кота. Това обстоятелство значително стеснява възможностите за нормалната работа на съоръжението и може да доведе до тежки аварийни ситуации, в това число и до нарушаване на цялостта на стената. За повишаване на безопасната и по-ефективна експлоатация на водоема е наложително да се предприемат спешни действия за уплътняване на насипа в установените рискови зони с цел намаляване на тяхната водопроникливост.



Фиг. 7. Зониране по водопропусливост в разрезите по ГРП-1 и ЕТП-1 (ситуационният план е представен на фиг. 2)



Фиг. 8. Зониране по водопропусливост в разрезите по ГРП-2 и ЕТП-2 (ситуационният план е представен на фиг. 2)

Литература

- Димовски, С., Н. Стоянов, Ч. Гюров. 2007. Ефективност на електротомографията за детайлно геоелектрично картиране на приповърхностния геоложки разрез. – *BULAQUA (БУЛАКВА)*, 4, 47-55.
- Христов, Хр., Е. Алтимирски. 1990. *Радиотехническа електродинамика и разпространение на електромагнитните вълни*. С., Техника.
- Conyers, L. B. 2012. *Interpreting Ground-Penetrating Radar For Archaeology*. Left Coast Press Inc.
- Daniels, F., R.A. Alberty. 1966. *Physical chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- 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.

- Jol, H. M. 2008. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier.
- Keller, G.V., F.C. Frischknecht. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Loke, M. H. 2001. *A practical guide to RES2DINV ver. 3.4; Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method*. Geotomo Software, Penang, Malaysia, p. 96.
- 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.

Статията е рецензирана от проф. д-р Ради Радичев и препоръчана за публикуване от кат. „Приложна геофизика“.