

ЕЛЕКТРОТОМОГРАФСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОЦЕНКА СЪСТОЯНИЕТО НА РЕКУЛТИВИРАНИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Стефан Димовски, Александър Цветков

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

РЕЗЮМЕ. В редица случаи се налага получаването на представа за състоянието на рекултивирани хвостохранилища. За целта успешно могат да се използват електрични геофизични методи. Приложени са електротомографски изследвания за изясняване на геоелектричната характеристика на приповърхностния разрез в обхвата на рекултивираното хвостохранилище "Устрем-3" с цел оценка на възможността за надграждане на основната стена на хвостохранилище "Устрем-2001". Получените резултати от измерванията по 7 проучвателни профила много добре диференцират състоянието на приповърхностния геоелектричен строеж на рекултивираното хвостохранилище. Отделят се три среди с различни електрични съпротивления. Първата електросъпротивителна среда се идентифицира с материалите, които запълват хвостохранилището, втората – с неговата основа и третата с непроменените коренни скали. Върху съставените геоелектрични разрези и карти не са получени аномалии от нееднородности в приповърхностния разрез на рекултивираното хвостохранилище, които биха нарушили неговата здравина.

ELECTRICAL TOMOGRAPHY SURVEYING FOR STUDYING THE CONDITION OF RECULTIVATED TAILINGS PONDS

Stefan Dimovski, Alexander Tsvetkov

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

ABSTRACT. In many cases is necessary to acquire information for the present condition of recultivated tailings ponds. Electrical geophysical techniques can be successfully applied for this purpose. Electrical tomography surveying is performed for studying the geoelectrical characteristics of the near-surface section in the area of recultivated tailings pond "Ustrem-3". Estimated are the possibilities for increasing the height of the main wall of tailings pond "Ustrem-2001". The results obtained along the seven surveyed lines differentiate very well the near-surface geoelectrical section of the recultivated tailings pond. Three zones characterized by different values of electrical resistivity are well-distinguished. The first zone maps the spread of tailing materials, the second – the extent of the pond foundation, and the third – the unaltered bedrocks. On the composed geoelectrical sections and maps are observed no anomalies caused by non-uniformities in the near-surface section in the area of recultivated tailings pond.

Въведение

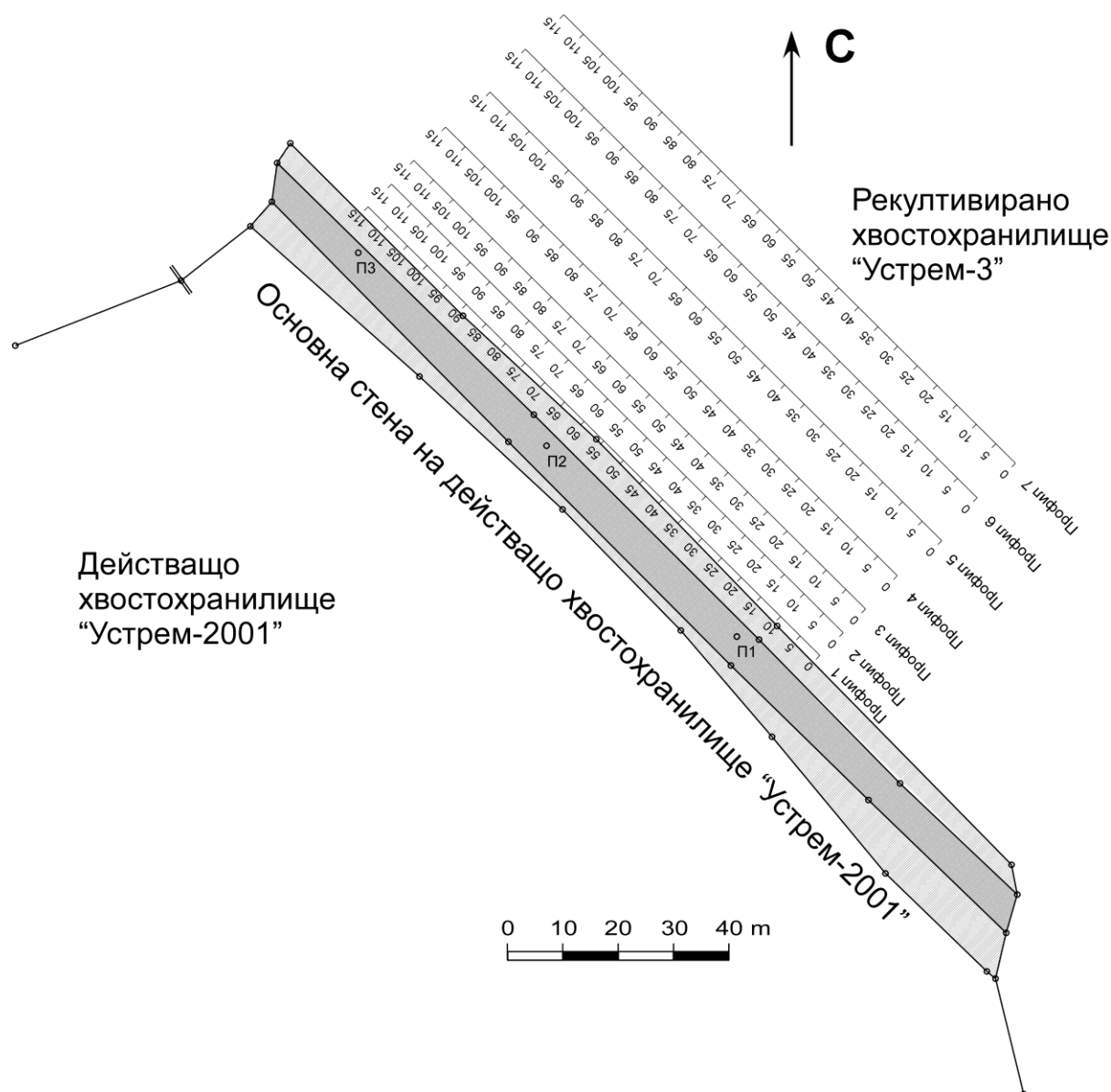
Хвостохранилищата са последното звено от веригата рудници – преработвателни заводи. В редица случаи се налага получаването на представа за състоянието на рекултивирани хвостохранилища. За целта успешно могат да се използват електрични геофизични методи. Ефективността на тези методи се илюстрира от резултатите, получени от електротомографските изследвания на състоянието на хвостохранилище "Устрем-3". Получените електросъпротивителни разрези от измерванията по 7 проучвателни профила много добре диференцират състоянието на приповърхностния геоелектричен строеж в обхвата на хвостохранилището. Отделят се три среди с различни електрични съпротивления. Първата електросъпротивителна среда се идентифицира с материалите, които запълват хвостохранилището, втората – с неговата основа и третата с непроменените коренни скали. Върху съставените геоелектрични разрези и карти не са получени аномалии, които да показват наличие на кухини в хвоста и предпоставки за замърсяване на околната среда.

Геофизичните изследвания в обхвата на хвостохранилище "Устрем-3" са проведени с цел изучаване на приповърхностния разрез в района на опашката на хвостохранилището. Полевите геофизични измервания обхващат участък с размери около 115x50 m в непосредствена близост до стъпката на въздушния откос на основната стена на хвостохранилище "Устрем-2001". Основните задачи на геофизичните проучвания се изразяват в следното: изясняване на геоелектричната характеристика на приповърхностния разрез в обхванатата площ, необходима за оценка на възможността за надграждане на основната стена на хвостохранилище "Устрем-2001"; локализиране на евентуални празнини в хвоста от изследваната площ на хвостохранилище "Устрем-3", на дълбочини до около 15 m от повърхността с относително по-големи размери, които биха застрашили сигурността на бъдещото съоръжение.

Приложен е методът на двумерното (2D) електропроучване – електротомография. Измерванията са

проведени по седем профила с направление югоизток – северозапад с обща дължина 805 m, като всичките са с една и съща дължина – 115 m. По всеки един от

профилите е получен геоелектричен разрез. Разположението на профилите в района на изследване е представено на фиг. 1.



Фиг. 1. Разположение на геоелектричните профили в района на въздушния откос на хвостохранилище "Устрем-2001"

При проведените електротомографски изследвания в района на хвостохранилище "Устрем-3" измерванията са проведени по 3 електродна схема полюс-дипол (Димовски и др., 2007; Димовски и др., 2008). Използвани две коси от 12 жилен кабел с разстояние между електродите 5 m (общо 24 електрода на разстановка) по профилите, всеки един от които е с дължина 115 m. Избраното разстояние между диполите е съобразено с постигането на достатъчна дълбочинност на изследванията, която достига над 40 m в средата на профилите, като е осигурено надеждно изследване на нееднородностите на дълбочина поне 15 m за почти цялата дължина на профилите, без около 5-10 m от двата края на всеки профил.

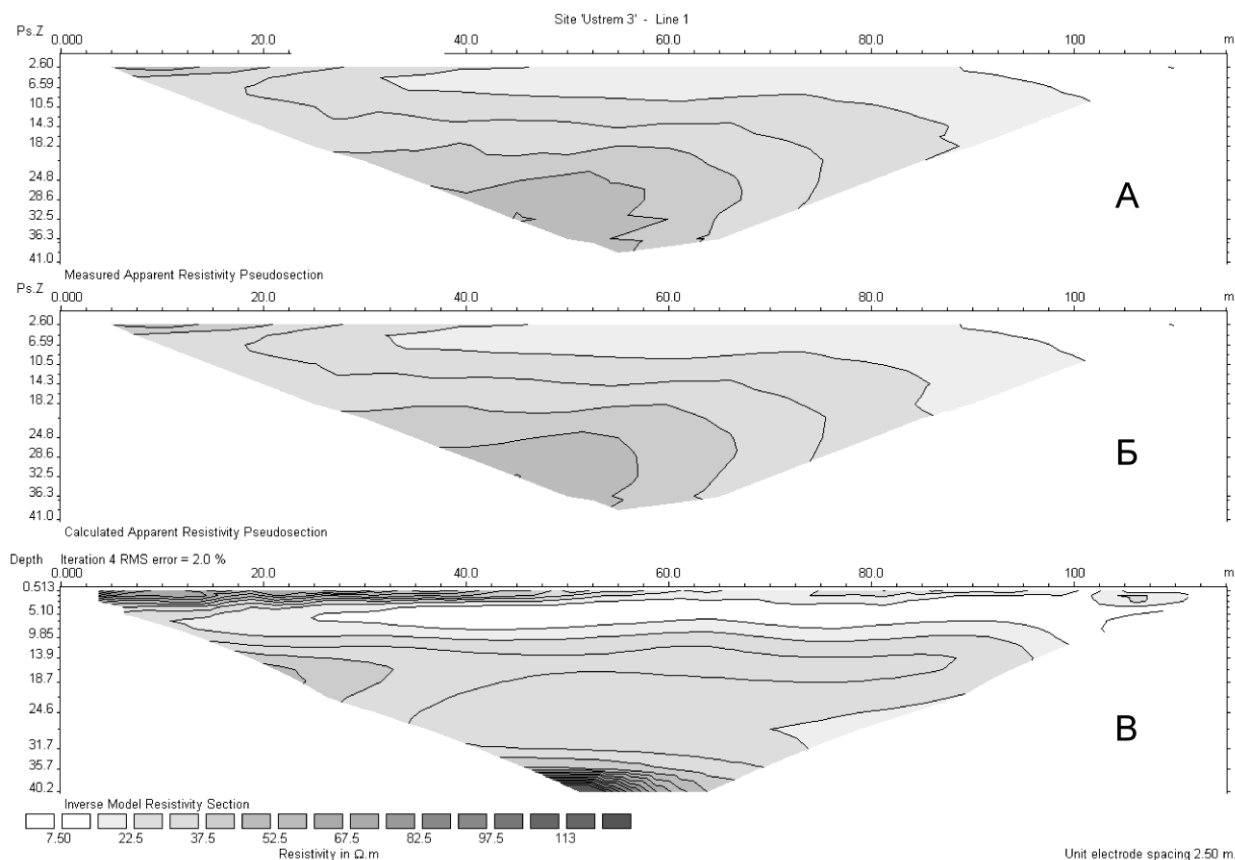
Регистрацията е извършена с помощта на апаратура Terrameter SAS 1000, производство на шведската фирма ABEM. Тя работи с изходно напрежение 400 V и

максимален изходен ток 1000 mA. Състои се от предавател, приемник и микропроцесор, обединени в едно тяло. Принципет 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.

Данните от полевите измервания са интерпретирани с компютърна програма RES2DINV (Griffiths, Barker, 1993; Loke, 2001), която определя разпределението на действителните съпротивления в подповърхностното пространство. Като входни данни в програмата е въведена информация за координатите на електродите и за

стойностите на привидното съпротивление във всяка точка от псевдоразреза, получени след предварително преизчисляване на измерените с полевата апаратура съпротивления. Програмата поделва подповърхностното пространство на определен брой блокове и по метода на най-малките квадрати определя съпротивлението на всеки

блок така, че изчисленото привидно съпротивление от модела да съвпада възможно най-добре с измереното електрично поле. Като краен резултат от обработката на първичните данни посредством програмата RES2DINV се получават по 3 вертикални карти – А, Б и В (фиг. 2).



Фиг. 2. Илюстрация на резултатите, получени в резултат от обработката на първичните данни по профил 1 посредством програмата RES2DINV : (А) – псевдоразрез на измерените в полеви условия привидни съпротивления; (Б) – псевдоразрез на изчислените чрез модела привидни съпротивления; (В) – разрез на изчислените посредством модела истински съпротивления

Първата карта (А) представлява псевдоразрез на измерените в полеви условия привидни съпротивления, втората карта (Б) е псевдоразрез на изчислените чрез модела привидни съпротивления, а третата карта (В) дава разреза на изчислените посредством модела истински съпротивления. Достоверността на моделното решение се илюстрира чрез сравнение на псевдоразрезите (А и Б) и се определя количествено посредством изчислената от програмата средно-квадратичната грешка RMS. Сравняването на получените псевдоразрези показва една добра съпоставимост между измерените и изчислените привидни съпротивления, което гарантира надеждността на интерпретацията.

Резултати от измерванията. Анализ и интерпретация

Анализът на получените резултати от електро-томографията по седемте профила (виж Фигура 3) позволява да се направят следните по-важни изводи:

1. Електричното съпротивление на средите, които изграждат изследвания приповърхностен разрез, варира в относително широки граници – от около 10 Ωm до около 150 Ωm и повече.
2. Най-обобщено изследваният геоелектричен разрез се представя от три разновидности (три електросъпротивителни среди):
 - Първата електросъпротивителна среда (зона 1) обхваща горната част на разреза и се привързва към обема на отложения хвост. Като цяло тази среда се характеризира с ниски стойности на електрично съпротивление – в диапазона на 7.5-15 Ωm , тъй като оводненият хвост притежава много добре изразена йонна електропроводност. Големи вариации в изменението на електричното съпротивление се наблюдават в най-горна част на тази среда. Това се дължи на разликите в степента на нейната водонаситеност. За сухите участъци (подзона 1а) електричното съпротивление има относително високи стойности в диапазона на 50-150 Ωm .

- Втората електросъпротивителна среда (зона 2) се характеризира със стойности на електрично съпротивление в диапазона от 20 до 50 Ωm . Тази зона се привързва към скалите, върху които е изградено хвостохранилището. По геоложки данни те представляват изветрели, отчасти грусирани на пясък гранитогнайси с аплитови и кварцови прожилки.
- Третата електросъпротивителна среда (зона 3) се характеризира с относително високи стойности на електрично съпротивление – над 100 Ωm . Тя се привързва към свежата част на гранитогнайсите и оформя най-добре изразената геоелектрична граница в изучената с настоящите изследвания част на разреза в изследвания район.
- Резултатите от електротомографията по отделните профили могат да се анализират в съответствие с направените обобщения за спецификата на геоелектричния разрез и дефинираните базови предпоставки за диференциране на разреза.

Получените резултати от проведените електротомографски проучвания по профил 1 са представени на фиг. 3а.

Профил 1 е прокаран в непосредствена близост до стената на хвостохранилище “Устрем-2001” и съответно до мястото на предвиденото надграждане на стената. По време на измерванията голяма част от североизточната половина на този и почти всички останали профили (в интервала от 70-80 до 115 m) беше силно оводнена, което очевидно се отрази върху разпределението на електричното съпротивление в най-приповърхностната част от разреза. На всички съставени разрезни граници на коментираните по-горе среди с различно електрично съпротивление са прокарани с пунктирни линии, като само предполагаемата долна граница на хвостохранилище “Устрем-3” е маркирана с плътна черна линия.

В съответствие с получените данни, по профил 1 дъното на хвоста е средно на кота 158 m, което отговаря на дебелината около 7-8 m. Вижда се, че материалите, изграждащи хвостохранилището, се отделят с най-ниските електрични съпротивления в целия разрез и попадат в обхвата 7.5-15 Ωm . Изключение прави най-югозападната част от профила (първите 30 m). Открояващата се тук среда с по-високо съпротивление ни дава основание да отделим в хвостохранилището подслоя 1а, който считаме за много по-сух. По профил 1 той е с дебелина не повече от 2 m.

С най-голяма дебелина (около 30 m) по този профил се отделя втората среда, която разглеждаме като подстираща материалите на хвостохранилището. Тя завършва с контрастна граница на кота 127.5 m дълбочина. По профила не се забелязват признаци за наличие на празнини с относително по-големи размери в хвостохранилище “Устрем-3”. Този извод е еднозначен за сухата част на хвоста в югоизточната част от профила, но ако празнините са изцяло запълнени с вода отделянето им

може да се окаже силно затруднено поради липса на достатъчно различие по електрично съпротивление.

Електротомографският разрез по профил 2, отдалечен на 5.5 m от профил 1, е представен на фиг. 3б.

Разрезите по първите два профила са доста сходни, поради което основните изводи при описанието на разрезите по тях са аналогични. Единственото по-съществено различие е, че на профил 2 сухата част на хвоста се отделя много по-контрастно и обхваща вече около 40 m от югоизточната част на профила. В края на геоелектричния разрез по профил 2 се наблюдава ситуация, която би могла да се тълкува като затъване на среда 1, но според нас това се дължи на краевни ефекти, които са наблюдавани и в други условия. Същата особеност се набелязва и в северозападния край на профил 1, но тук закривяването на изолиниите е по-слабо изразено.

Резултатите от електротомографските проучвания по профили 3 и 4 са показани на фиг. 3в и 3г. Разстоянието между профил 2 и профил 3 е 6.5 m, а между профил 3 и профил 4 е 8 m.

На тези профили дъното на хвостохранилището по геофизични данни е малко по-дълбоко в сравнение с първите два профила, като на профил 4 то достига средно до кота 155-157 m, което отговаря на дебелина на хвоста около 10 m. Постепенно нараства дебелината на сухата му част, която в началото на профил 4 достига до 3-3.5 m. Обезводняването на най-горната част от разреза обхваща все по-големи части от двата профила, като на профил 4 то включва 65 m от началото на профила.

По тези два профила се наблюдава слабо издигане на контрастната граница, бележеща горницето на свежите гранитогнайси с около 1-1.5 m. И тук не можем да предполагаме наличие на по-големи кухини сред хвоста.

Резултатите за профилите 5, 6 и 7 са представени на фиг. 3д, 3е и 3ж. Трите профила са прокарани през 10 m. По тези три профила все по-ясно се проследяват набелязаните тенденции в пространственото положение на отделените три среди с различни електрични съпротивления. Продължава плавно увеличаване на дълбочината на дъното на хвостохранилището, като по профил 5 то е средно на кота 155 m, на профил 6 – на кота 152.5 m и на профил 7 – на кота 149 m. По този начин на разстояние около 50 m от основната стена на хвостохранилище “Устрем 2001”, дебелината на хвостохранилище “Устрем-3” се увеличава с около 9 m спрямо профил 1, зададен в непосредствена близост до нея.

Трябва да се отбележи, че в най-северозападната част на профили 6 и 7 се наблюдава намаляване мощността на хвоста. Продължава увеличаването на размерите на обезводнената част на хвоста както по хоризонтала, така и по вертикала. В началото на профил 7 тя става дебела около 6 m и обхваща над 80 m от профила. Както и на останалите профили дебелината на слой 1а постепенно изплитнява на северозапад. И на тези разрезни се

наблюдава слабо издигане на границата на свежите коренни скали, като на профил 7 тя е на около 30 m от повърхността.

Многобройните комбинации от измервания между разположените по всеки профил 24 електрода позволяват да се изчислят стойностите на привидните съпротивления ($\rho_{пр}$), измерени с някои 1D схеми на електрично профилиране и електрично сондиране.

Подходяща за изследване на вертикални нееднородности е триелектродната схема на електрично профилиране. По тази причина бяха извършени съответните преизчисления за да се построят карти на привидното електрично съпротивление с три различни полудължини на захранващата линия – $AO=27.5$ m, $AO=37.5$ m и $AO=47.5$ m с една и съща дължина на приемната линия $MN=5$ m. Те дават възможност да се проследи изменението на този параметър в план на три различни дълбочини които по общи съображения се оценяват приблизително на около 7-8 m за първата, 9–10 m за втората и 12-13 m за третата схема.

За разлика от електротомографските разрези, по разпределението на привидното съпротивление в картите могат да се направят изводи за промените на този параметър в хоризонтална посока до посочените дълбочини, без да се разчита на точни количествени данни.

На фиг. 4 са показани карти на разпределение на привидното съпротивление за различна дължина на захранващата линия.

Характерна особеност на съставените карти е сравнително малката промяна на привидното съпротивление в площта, обхваната с геоелектрични измервания. В конкретния случай това става в диапазона от 15 до 36 Ωm и за да се отговори на методичните изисквания са прокарани само няколко изолинии, които дават сравнително схематична представа за измененията в хоризонтално направление на електричните съпротивления. Вижда се, че най-оводнената част на хвостохранилището в приповърхностната част от разреза

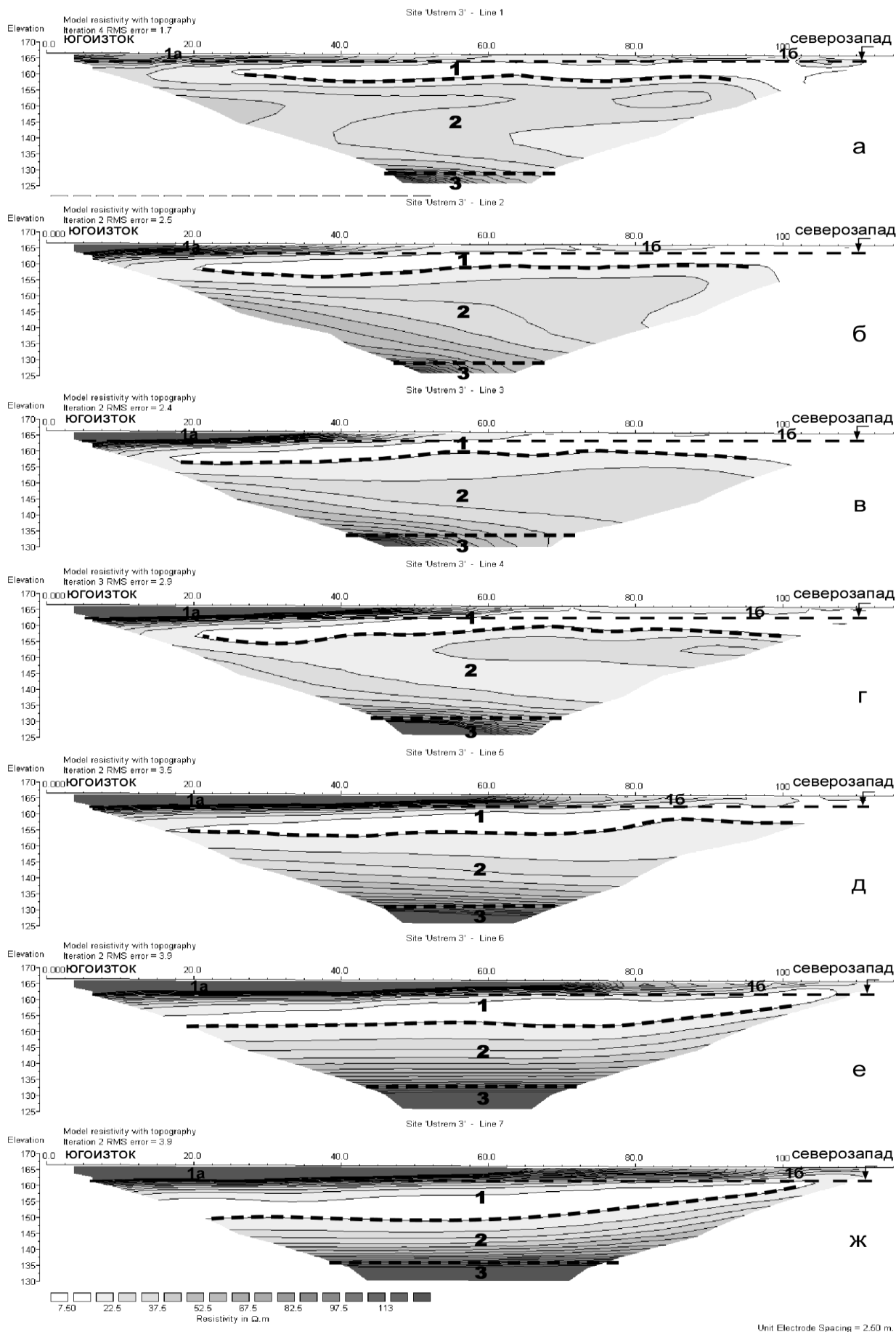
обхваща най-северозападната част на профилите – от 95 до 115 m. По профили 6 и 7 оводняването е по-слабо изразено. В посока към североизток се наблюдава плавно повишение на привидното съпротивление, което се дължи на набелязаната по разрезите тенденция за увеличаване дълбочината на сухата част от хвоста.

Трябва да обърнем внимание на локалната аномалия на понижено съпротивление по профил 6, защото е регистрирана в близост до установеното на 70-ия метър от началото на профила пропадане с диаметър около 2 m на дълбочина около 40 cm. Аномалията се оформя само по една стойност, което поражда съмнение за нейната достоверност.

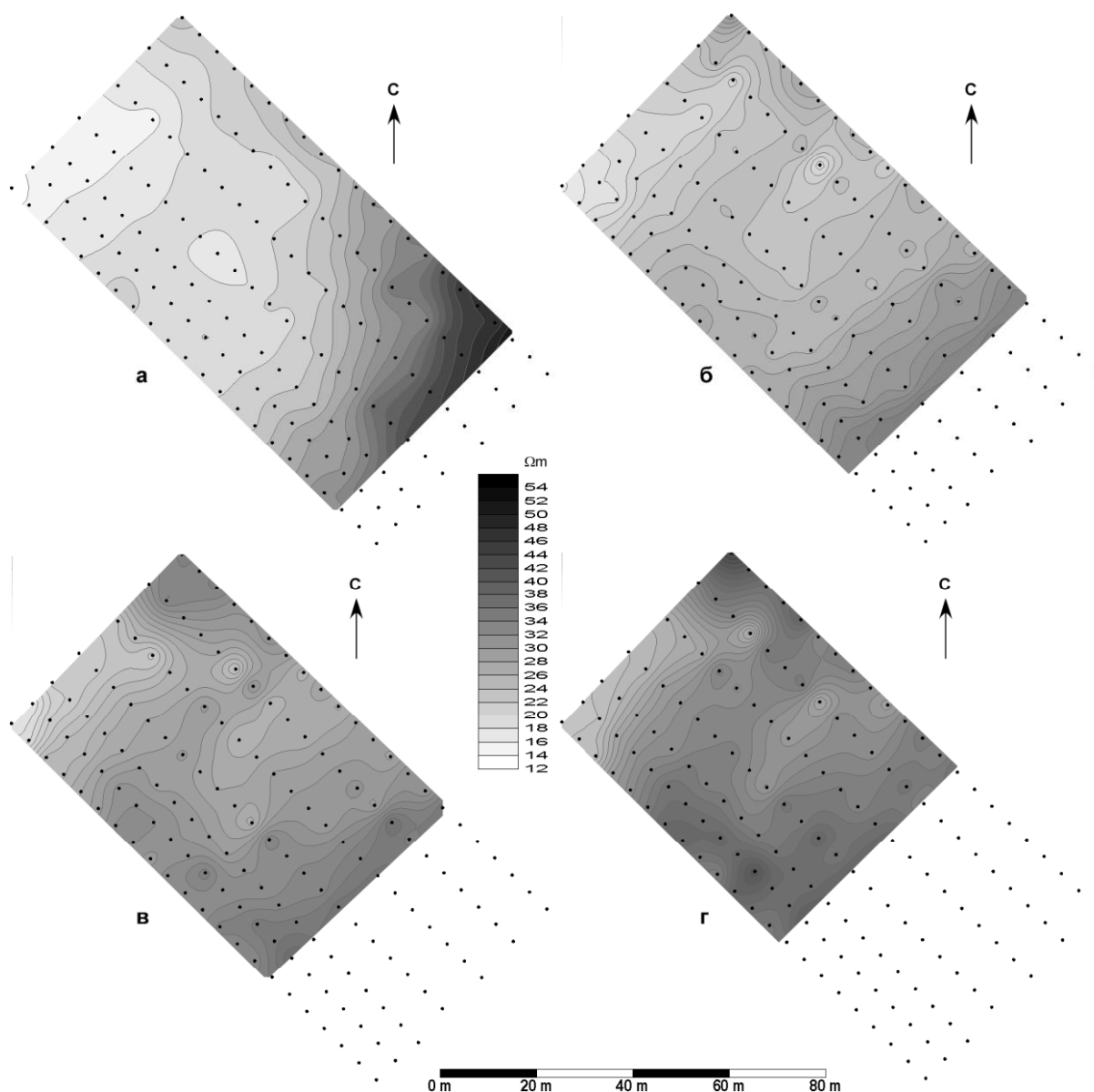
В съответствие с теорията, при триелектродната схема вертикалните или стръмно наклонени нееднородности се отбелязват с максимум и минимум, а мястото на обекта е между двата екстремума. В случая е регистриран само минимум на привидното съпротивление, поради което не може да се твърди уверено, че е регистрирано пропадане в хвоста.

От тези картите на привидното съпротивление с $AO=37.5$ m и с $AO=47.5$ m се вижда, че на малко по-големи дълбочини размерите на силно оводнената част на хвоста бързо намаляват и по-съществено насищане на хвоста с вода се регистрира само в най-северозападната част на профили 1÷5 (след 100-я метър на тези профили).

Прави впечатление, че разискваната по-горе аномалия на привидното съпротивление в близост до пропадането по профил 6 се наблюдава и на тези карти, като интензитетът на минимума отслабва, а размерите му нарастват и обхващат вече и пети и даже четвърти профил. Това дава основание да се смята, че по-вероятно става дума за влияние на локален участък с относително по-силно оводняване, чиято дълбочина достига поне 12-13 m. Местоположението му може да се оцени приблизително по отделените минимума на $\rho_{пр}$ върху картите, съставени с $AO=37,5$ m и $AO=47,5$ m (фиг. 4в и 4г).



Фиг. 3. Схеми на разпределение на електричното съпротивление във вертикалните равнини на профил 1 (а), профил 2 (б), профил 3 (в), профил 4 (г), профил 5 (д), профил 6 (е) и профил 7 (ж); разположението на профилите е показано на фиг. 1



Фиг. 4. Схеми на разпределение на привидното съпротивление за триелектродна схема при $AO = 17,5 \text{ m}$, $MN = 5 \text{ m}$ (а), $AO = 27,5 \text{ m}$, $MN = 5 \text{ m}$ (б), $AO = 37,5 \text{ m}$, $MN = 5 \text{ m}$ (в) и $AO = 47,5 \text{ m}$, $MN = 5 \text{ m}$ (г); разположението на профилите е показано на фиг. 1

Заклучение

За решаване на поставените задачи за изучаване на приповърхностния строеж на хвостохранилище "Устрем 2001" беше избран методът на електричната томография. Това е съвременен метод, който напоследък намира все по-широко приложение в практиката за картиране на разрези, както и за прецизна оценка на конкретната хидрогеоложка обстановка. Върху съставяните разрези по електрично съпротивление ясно се различават пространствените нееднородности в изучаваната среда – зони с различна водонситеност, празнини, замърсени зони във водоносните структури, пространствени хетерогенности на геоложката среда.

За да се осигури необходимата ефективност на електротомографските изследвания се използват специални програми за изчисляване на действителните съпротивления в подповърхностното пространство. В

конкретния случай е използвана компютърна програма RES2DINV, която дава много добри резултати при обработка и интерпретация на данните от полевите измервания.

Многобройните измервания по профилите дават възможност чрез подходящо преизчисляване да се получат резултати от измервания с различни схеми на електрично профилиране и сондиране. В случая тази възможност е използвана за да се изчислят четири карти на привидното съпротивление при профилиране с триелектродна схема с различна дълбочинност в диапазона от 2-5 до 12-13 m.

Изследванията обхващат участък с размери 115x50 m. Максимална дълбочинност е постигната върху част от него с размери 100x50 m. Измерени са 7 профила, разположени успоредно на основната стена на хвостохранилище "Устрем 2001". Средата на профилите е съобразена да

попадне най-близко до пиезометричен сондаж П2. Първите три профила са сгъстени с оглед по-детайлно изучаване на пространството в близост до основната стена, а последните три профила са през 10 m.

Анализът на получените резултати по седемте профила показва, че в изследвания приповърхностен разрез се отделят три среди с различни специфични електрични съпротивления.

Първата електросъпротивителна среда (зона 1) обхваща най-горната част на разреза и отразява според нас ефекта от материалите на хвостохранилището. Тя се характеризира с ниски стойности на електрично съпротивление – наситени с вода тези материали притежават добре изразена йонна електропроводност. Техните съпротивления в разрезите най-често попадат в диапазона от 7.5 до 15 Ωm . В съответствие със съставените разрези долната граница на зона 1, която според нас съвпада с долнището на хвоста, постепенно затъва – от кота 158 на профил 1 (непосредствено до подпорната стена) до кота 149 на профил 7, разположен на 50 m на североизток от профил 1.

В горната част на среда 1 се наблюдават големи вариации в изменението на електричното съпротивление. Това се дължи на разликите в степента на нейната водонаситеност. В сухите участъци, които отделяме като подзона 1а, електричното съпротивление рязко се различава и достига относително високи стойности в диапазона 50-150 Ωm . Фактически долната граница на подзона 1а показва положението на водното огледало в изследвания участък. Прави впечатление, че по време на измерванията водното огледало е много близо до земната повърхност, а в близките до основната стена на хвостохранилище “Устрем 2001” профили практически излиза на повърхността. Този факт би следвало да се отчете при проектирането на заплануваното надграждане на стената. Сухата част на хвоста е разположена в югоизточната част на проучваната площ. Нейното положение лесно може да се проследи в най-горните части на съставените разрези, тъй като се откроява ясно по съпротивление. Тя заема все по-големи части върху отдалечените от стената профили, където закономерно се увеличава и нейната дебелина, достигайки максимална стойност около 6 m в югоизточната част на профил 7.

Както се вижда от приложените карти на привидното електрично съпротивление с различна дълбочинност, на по-големи дълбочини размерите на силно оводнената част бързо намаляват и на практика само в диапазона от 100 до 115 m на профили 1÷4 могат да се очакват по-сериозни оводнявания на хвоста на дълбочини от порядъка на десетина метра.

Втората електросъпротивителна среда (зона 2) се характеризира със стойности на електрично съпротивление в диапазона от 20 до 50 Ωm . Тази зона се привързва към скалите, подстилящи хвостохранилището.

По геоложки данни те представляват изветрели, отчасти грусирани на пясък гранитогнайси с аплитови и кварцови прожилки. Тези скали не се открояват много контрастно по съпротивление от материалите на хвоста, но разликата все пак е достатъчна за да проследим тази среда по всички профили. Нейната дълбочина в близост до стената е около 30 m, но с отдалечаването от нея намалява до около 15 m на профил 7. Тези промени се дължат на обратните тенденции в поведението на дебелината на хвостохранилището и границата на коренните скали в североизточна посока.

Третата електросъпротивителна среда (зона 3) се характеризира с относително високи стойности на електрично съпротивление – над 100 Ωm . Тя се привързва към свежата част на гранитогнайсите и представлява най-добре изразената геоелектрична граница в изучената с настоящите изследвания част на разреза. Според получените данни тя постепенно се издига в североизточна посока от кота 128.5 на профил 1 до кота 135 на профил 7.

Върху всички съставени разрези и карти не са получени аномалии, които да показват наличие на кухини в хвоста с относително по-големи размери. Това може да се твърди еднозначно в границите на подслоя 1а по всички профили. В силно оводнените участъци на хвостохранилище “Устрем-3” геофизичните данни не дават категоричен отговор на въпроса за тяхното наличие, поради очакваните малки разлики в съпротивленията на евентуални запълнени с вода кухини и силно оводнената част на хвоста. По-сигурни можем да бъдем ако се проведат геофизични изследвания в друга климатична обстановка, при която оводняването на материалите на хвоста не е толкова повсеместно.

Литература

- Димовски, С., Н. Стоянов, Ч. Гюров. 2007. Ефективност на електротомографията за детайлно геоелектрично картиране на приповърхностния геоложки разрез. – *BULACUA*, 4, 47-55.
- Димовски, С., Р. Радичев, Ч. Гюров. 2008. Електротомографски изследвания на площадка за изграждане на депо за битови отпадъци. – *Минно дело и геология*, 2, 42-46.
- Griffiths, D. H., R. D. Barker. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. – *J. Appl. Geophysics*, 29, 211-226.
- 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 2D & 3D*. Geotomo Software, Penang, Malaysia.

Препоръчана за публикуване от
Катедра “Приложна геофизика”, ГПФ