

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-5-12

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 550.837.31

### ПОСТРОЕНИЕ РЕЛЬЕФА ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРООТВАЛА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

### RECONSTRUCTION OF THE FLOOR LANDSCAPE OF THE HYDRAULIC WASTE DISPOSAL ON THE BASIS OF THE ELECTROTOMOGRAPHY APPLICATION

Тайлаков Олег Владимирович<sup>1, 2</sup>

доктор техн. наук, профессор, e-mail: [tailakov@uglemetan.ru](mailto:tailakov@uglemetan.ru)

Tailakov Oleg V.<sup>1, 2</sup>, Doctor of Technical Sciences, professor

Макеев Максим Павлович<sup>2</sup>

к.т.н., ст. научный сотрудник, e-mail: [makeev@uglemetan.ru](mailto:makeev@uglemetan.ru)

Makeev Maxim P.<sup>2</sup>, Senior Researcher, Ph.d.

Салтымаков Евгений Алексеевич<sup>2</sup>

старший инженер, e-mail: [saltymakov@uglemetan.ru](mailto:saltymakov@uglemetan.ru)

Saltymakov Evgeny A.<sup>2</sup>, Senior Engineer

Смыслов Алексей Игоревич<sup>2</sup>

младший научный сотрудник, e-mail: [asmislov@uglemetan.ru](mailto:asmislov@uglemetan.ru)

Smyslov Alexey I.<sup>2</sup>, Junior Researcher

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук», г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10.

<sup>2</sup> Federal Research Center of Coal and Coal chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 650065, Russian Federation, Kemerovo, Ave. Leningradskiy, 10

**Аннотация.** Рассмотрено применение электротомографии с целью оценки возможности гидрогеологической связи гидроотвала с нижележащим массивом для разработки комплекса мероприятий по обеспечению безопасного ведения горных работ. Исследования выполнены с поверхности воды при помощи многоэлектродной электроразведочной станции и комплекта электроразведочных кос. В качестве вспомогательного оборудования использовались самоходное маломерное судно с подвесным мотором и GPS-приемник. Использована нагоняющая расстановка сегментов электроразведочных кос с целью изменения протяженности геофизического профиля. Обоснована схема геофизических профилей на основе анализа горно-геологической и горнотехнической документации и согласована с руководством подразделений угледобывающего предприятия. Разработаны специализированные поплавки, обеспечивающие защиту контакта между электродом и электроразведочной косой от воды. Проведены дополнительные измерения глубины гидроотвала прямыми методами вне геофизических профилей. Приведены результаты полевых исследований гидрогеологических условий участка углепородного массива и оценки геометрических параметров гидротехнического сооружения на основе использования электроразведки и построения усредненного геоэлектрического разреза. Зависимость влажности грунтов от электрических свойств определена в соответствии с нормативными документами в области электроразведки. Построена 3D-модель гидротехнического сооружения и определен объем накопленной воды гидроотвала.

**Abstract.** The application of electro tomography for the purpose of assessing the possibility of hydrogeological connection between hydraulic waste disposal and underlying massif for the development of a set of measures to ensure the safe conditions of the mining operations is considered. The research was performed from the surface

of water using a multi-electrode electroprospecting station and a set of electroprospecting cables. As auxiliary equipment, a small boat with an outboard motor and a GPS receiver were used. The approaching arrangement of segments of electro-reconnaissance scythes was used to change the extent of the geophysical profile. The scheme of geophysical profiles based on the analysis of mining-geological and mining documentation is substantiated and coordinated with the management of the coal-mining enterprise subdivisions. Specialized floats have been designed to protect the contact between the electrode and the electrical lines from water have been developed. Additional measurements of the depth of the hydraulic waste disposal by direct methods outside geophysical profiles have been carried out. The results of field studies of hydrogeological conditions of a section of a coal-bearing massif and estimation of geometric parameters of a hydraulic structure based on the use of electrical prospecting and the construction of an average geoelectric section are presented. Dependence of soil moisture content on electrical properties is determined in accordance with the normative documents in the field of electrical prospecting. A 3D model of the hydraulic structure has been constructed and the volume of accumulated water in the hydraulic waste disposal has been determined.

**Ключевые слова:** электротомография, нагоняющая расстановка, гидротехническое сооружение, геоэлектрический разрез, береговая линия.

**Keywords:** electrical resistivity tomography, roll along, hydraulic architecture, geoelectric section, bank line.

Для ведения вскрышных работ при разработке угольных месторождений открытым способом применяется гидромеханизация, результатом которой является образование гидротехнических сооружений. Гидроотвалы сложены разрушенными вскрышными породами, свойства которых изменяются во времени и характеризуются низкой несущей способностью. Физико-механические свойства и устойчивость слагающих пород, объем

Поставлена задача – определить геометрические параметры гидроотвала, расположенного в южной части Ленинского геолого-экономического района Кузбасса, с целью получения информации о возможности гидрогеологической связи с нижележащим массивом горных пород, для разработки мероприятий по безопасному ведению горных работ. Методом электротомографии с применением многоэлектродной электrorазведочной станции

Таблица 1. Основные характеристики электроразведочных профилей

Table 1. The main characteristics of electroprospecting profiles

№ профиля	Направление	Протяженность по акватории, м	Протяженность по земной поверхности, м	Общая протяженность, м
1	З-В	718	222	940
2	С-Ю	136	334	470
3	С-Ю	140	330	470
4	С3-ЮВ	137	333	470
<b>ИТОГО</b>		<b>1 131</b>	<b>1 219</b>	<b>2 350</b>

накопленной воды, рельеф донной поверхности имеют существенное значение при разработке и реализации мероприятий по безопасному ведению горных работ в районе гидроотвала и снижению техногенной нагрузки на окружающую среду. Поэтому одним из наиболее эффективных путей определения основным параметров гидроотвала является использование оперативных геофизических методов исследований.

«Скала-48» [1] проведены исследования 4 геофизических профилей, общей протяженностью 2350 м (табл. 1) для инженерно-гидрогеологического картирования и определения геометрических параметров гидроотвала.

Электроразведочные исследования выполнены на основе 4-х электродной установки Шлюмберже с использованием нагоняющей расстановки электродов (рис. 1) [3-6]. Для проведения на акватории

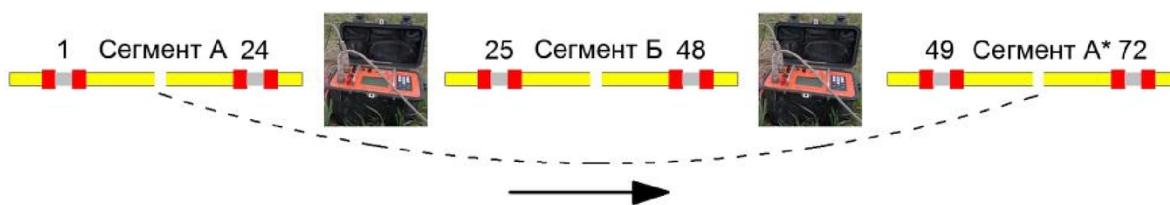


Рис. 1. Расположение сегментов 24x-электродных кос с последующим переносом первого сегмента для продолжения профиля

Fig. 1. Arrangement of segments of 24-electrode braids with subsequent transfer of the first segment to continue the profile

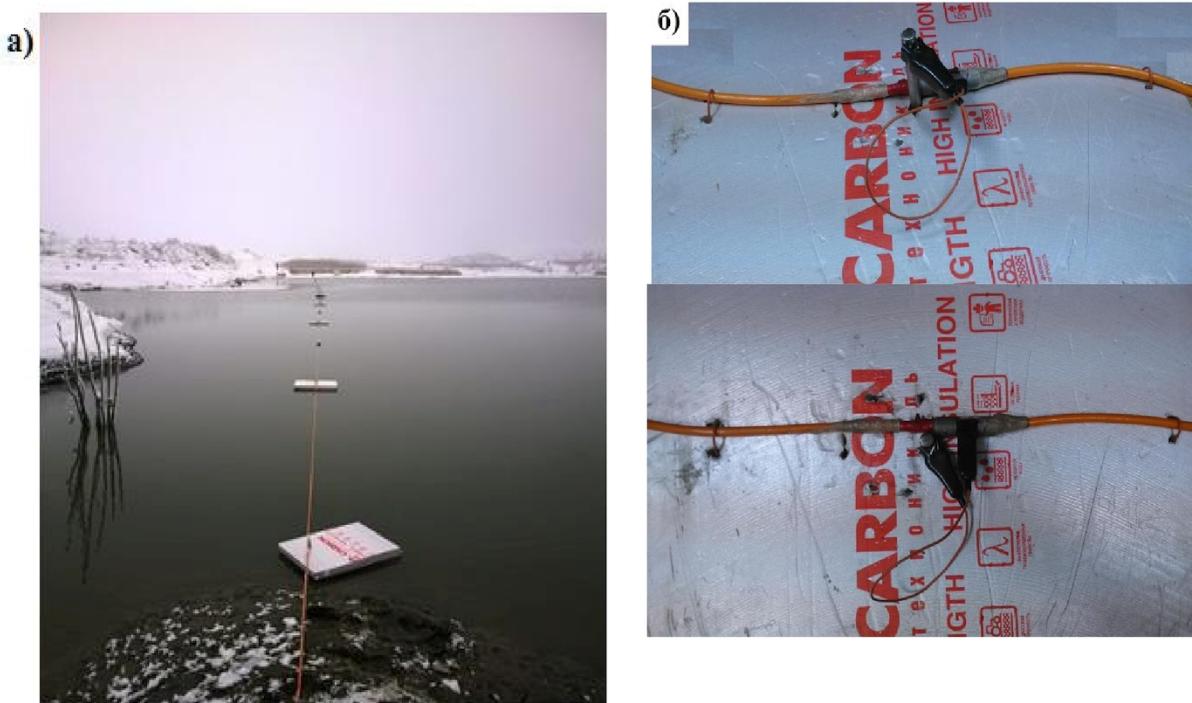


Рис. 2. Электроразведочный профиль и конструкция поплавка:  
а) - размещение электроразведочных кос на акватории гидроотвала; б) - поплавок для защиты контакта между электродом и электроразведочной косой

Fig. 2. Electro-exploration profile and construction of the float:

- a) - placement of electro-exploration braids in the water area of the hydrotail;
- b) - a float to protect the contact between the electrode and the electroprospecting cable

гидроотвала электроразведочных работ разработаны и изготовлены специализированные поплавки, которые обеспечивали защиту гальванической связи между электродом и электроразведочной косой от воды и удерживали измерительную систему на поверхности воды (рис. 2) [7, 8]. Электроразведочная станция располагалась непосредственно по центру измерительной системы на маломерном судне. Координатная привязка на акватории гидроотвала осуществлялась при помощи GPS-приемника.

В ходе проведенных электроразведочных работ зафиксировано более 2932 геофизических наблюдений. При сопоставлении инженерно-геологической информации и результатов электроразведочных работ определена мощность почвенно-растительного слоя на участке исследований 0,4-0,5 м. Далее залегают четвертичные отложения, сложенные суглинками от легких лессовидных до тяжелых иловатых, в основном, влажных, а на отдельных участках переувлажненных, общей мощностью 37-39 м. На контакте с коренными породами залегает слой серых суглинков с включениями обломков коренных пород, гальки и песка. Всего в основании отстойника отмечено 13 слоев суглинков, обладающих различными физико-механическими и фильтрационными свойствами. Мощность слоев весьма изменчива, как и их свойства (рис. 3).

По линии геофизического профиля №1 (рис. 3, а) определена область «I» мощностью 19,5 м. Фактическое изменение удельного электрического сопротивления составило 19-21 Ом·м. Согласно Приложению Ж «Зависимость удельных электрических сопротивлений от состава грунта» [2] породы, слагающие данную область, имеют влажность отличную от естественной (более 30%). Граница области построена вдоль контрастных участков геоэлектрического разреза. Электрические свойства данной области вдоль профиля выдержаны, однако на интервале 645-685 м (область «II») мощность выделенного участка резко уменьшается до 1-2 м. Предположительно, это объясняется наличием на данном участке неразмокаемой горной породы. В структуре массива не зарегистрированы геологические проявления.

Мощность области «I» по профилям: №2 – до 46,0 м (рис. 3, б), №3 – до 37,0 м (рис. 3, в); №4 – 42,0 м (рис. 3, г). Вдоль каждого поперечного геофизического профиля на аналогичных отметках наблюдались участки (область «III») с преобладанием суглинков большой мощности с влажностью более 50% [2]. В структуре массива не зарегистрированы геологические проявления. Удельное электрическое сопротивление массива на исследуемых глубинах имеет монотонно увеличивающийся характер, что дает основания предположить о доста-

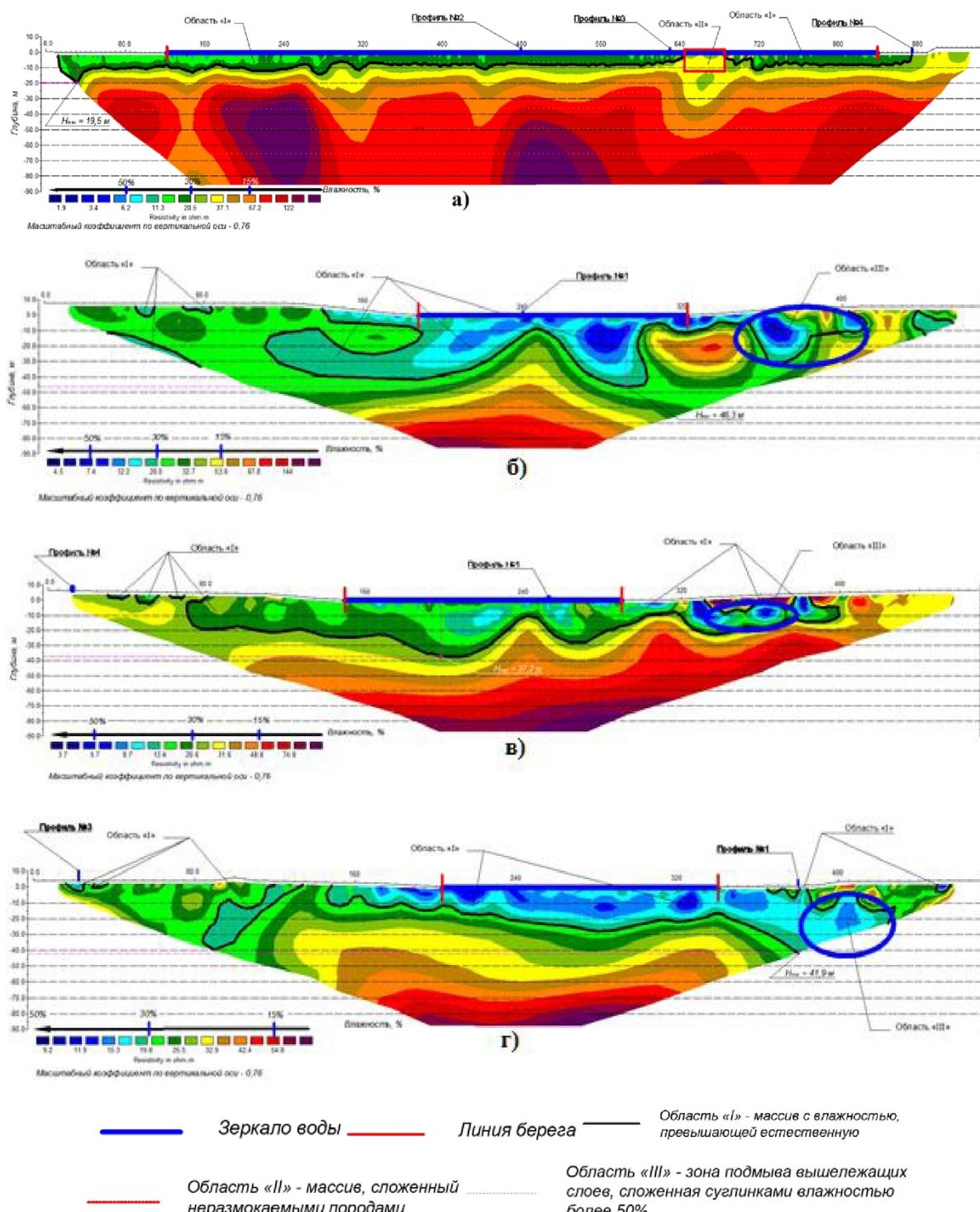


Рис. 3. Результаты интерпретации данных:  
а) - профиль №1; б) - профиль №2; в) - профиль №3; г) - профиль №4

Fig. 3. Results of data interpretation:

a) - profile # 1; b) - profile # 2; c) - profile # 3; d) - profile # 4

точно выдержанных физико-механических свойствах породного массива в пределах исследуемого профиля.

На этапе камеральной обработки данных электротомографии при определении рельефа дна при-

менен подход построения усредненного геоэлектрического разреза, который позволил повысить точность регистрации характерных границ:

$$\Sigma_{\text{ycp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\Delta x} \sum_{j=1}^{\Delta z} \rho(x_i, z_j).$$

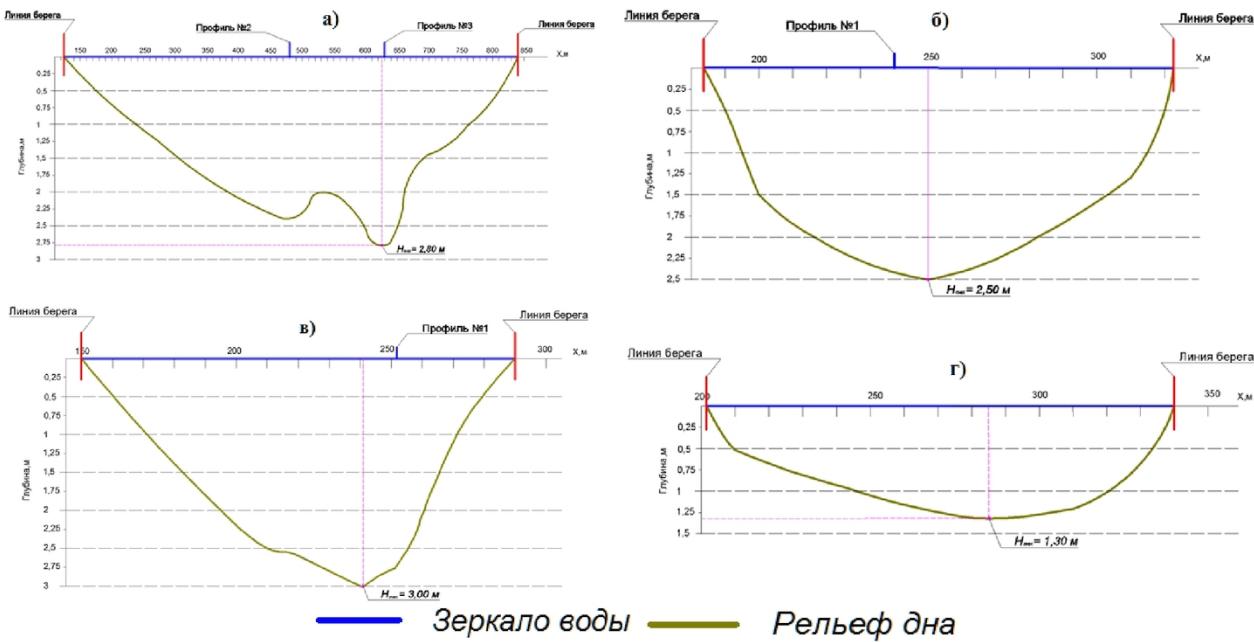


Рис. 4. Рельеф дна:  
 а) - профиль №1; б) - профиль №2; в) - профиль №3; г) - профиль №4  
 Fig. 4. Bottom relief:

а) - profile number 1; б) profile number 2; в) - Profile №3; д) - profile number 4

Здесь  $i$  и  $j$  – порядковый номер бесконечно малого элемента геоэлектрического разреза вдоль оси  $x$  и  $z$ ;  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  – координаты элементов, в пределах которых вычисляется усредненное интегрированное значение  $\Sigma_{ysr}$ , м;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $n$  – количество бесконечно малых элементов в области ( $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ).

Для уточнения рельефа донной поверхности и оценки объема накопленной воды в гидроотвале дополнительны выполнены прямые измерения глубины вдоль каждого геофизического профиля в непосредственной близости от электродов с шагом 10 м (рис. 4).

По полученным значениям глубин средствами лицензионного продукта AutoCAD® 2009 построена 3D-модель гидроотвала и определен объем

накопленной воды в гидроотвале, который составил  $102\,000 \text{ м}^3 \pm 20\,000 \text{ м}^3$  (рис. 5). В результате полевого этапа исследований получен массив данных глубин гидроотвала – 269 замеров. По полученным значениям методом профилей построены изолинии донной поверхности гидроотвала, актуальные на момент выполненных измерений, а также определена береговая линия (рис. 6).

Устойчивость участка зависит от физико-механического состояния четвертичных отложений. Динамическое изменение уровня воды в гидроотвале и уровня подземных вод за счет изменения дебита подпитывающих источников и периодического изменения погодных условий может негативно сказаться на устойчивости данного участка при ведении горных работ. В том числе области предположительного подмыва вышележащих

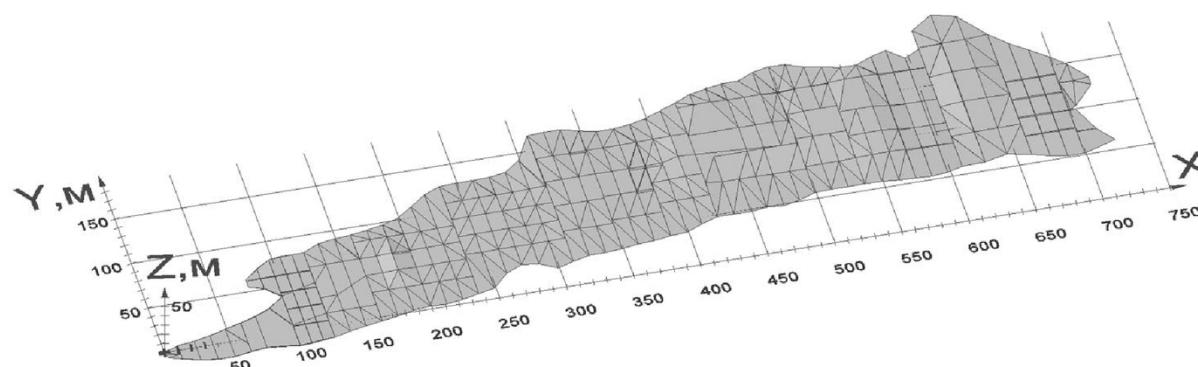


Рис. 5. 3D-модель гидроотвала для расчета объема накопленной воды  
 Fig. 5. 3D-model of the hydro-dump for calculating the volume of accumulated water

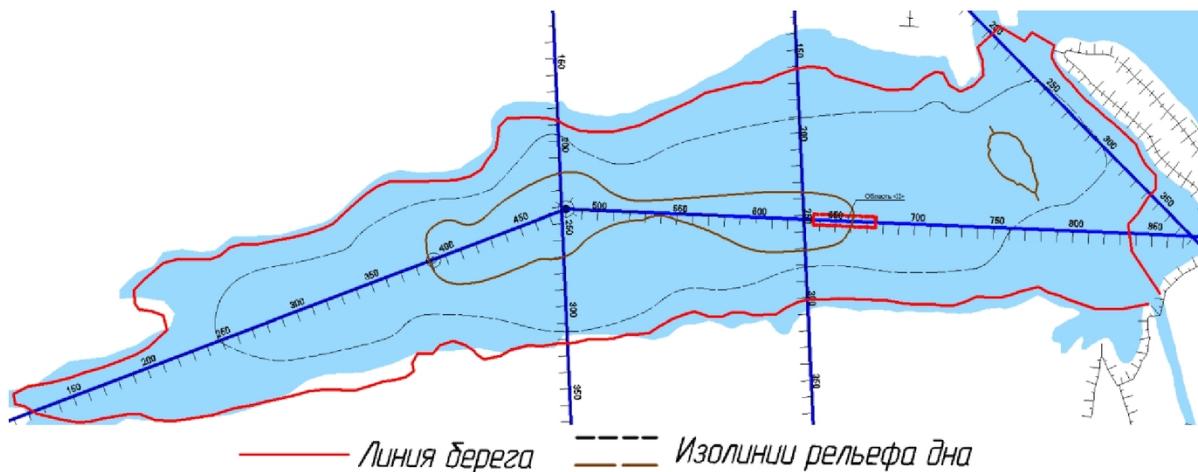


Рис. 6. План поверхности с нанесенными изолиниями дна гидроотвала  
 Fig. 6. The plan of the surface with applied isolines of the bottom of the hydropump

слоев «III» требуют более детального исследования геологического строения с помощью прямых методов изысканий, что позволит оценить устойчивость этих участков. Таким образом, для безопасного ведения горных работ необходимо контролировать уровень воды в гидроотвале, уровень подземных вод и физико-механическое состояние четвертичных отложений, а также разработать мероприятия по обеспечению устойчивости массива.

Полученные результаты инженерно-геологических изысканий на акватории техногенного водоема использованы для нужд угледобывающего предприятия в рамках разработки и реализации мероприятий по безопасному ведению горных работ в районе гидроотвала. Отметим, что при решении

подобных задач для повышения достоверности измерений на акваториях гидроотвалов методом электротомографии, необходимо предварительно определять электрофизические свойства донных отложений гидроотвалов для подбора параметров питающей линии, а также обеспечивать сопровождение изысканий геодезической съемкой с целью привязки геофизических данных к рельефу местности. Зависимость удельного электрического сопротивления от газодинамических характеристик углепородного массива позволяет рассматривать электротомографию как инструмент оценки газонасности и фильтрационных свойств углепородного массива [9-16].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балков Е.В. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е. В. Балков, Г. Л. Панин, Ю. А. Манштейн, А. К. Манштейн, В. А. Белобородов // Геофизика, г. Кемерово, – 2012. – №6. – С. 54
- «Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерно-геологические изыскания для строительства СП 11-105-97, часть IV «Правила производства геофизических исследований».
- Салтымаков Е.А. Применение электротомографии для оценки условий залегания угольных пластов на разрезах Кузбасса / Е.А. Салтымаков, В.Ю. Киселев, О.В. Тайлаков // И 66 Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»: материалы Инновационного конвента. – 15.10.2015. – С. 20-22.
- Тайлаков О.В., Салтымаков Е.А., Застрелов Д.Н., Соколов С.В., Макеев М.П., Ярош А.С. Определение глубин залегания водоносных горизонтов методом электротомографии в условиях Кузбасса // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, Кемерово, 2016. – №1. – С. 30 – 34.
- Karin Y.G., Balkov E.V., Panin G.L., Tsukanov K.G. A study of sediments oz.Teletskoe by electrical resistivity tomography / 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016. С. 243-247.
- Соколов С.В. Применение сейсмической разведки для уточнения горно-геологических условий разработки угольных месторождений // Горняцкая смена. - Сб. трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2013». Т. 3 – 2013. – С. 153-155.
- Аузин А.А., С.А. Зацепин. Инженерно-геофизические исследования на пресноводных акваториях // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2014. № 2.

8. Балков Е.В. Результаты применения малоглубинного электромагнитного профилирования на электрометрическом полигоне института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН / Е.В. Балков, Т.А. Стойкин, А.К. Манштейн, Ю.Г. Карин // Геофизические исследования. Т. 14. № 3. – 2013 – С. 55-63.
9. Manstein Yu.A., Manstein A.K., Balkov E., Panin G., Scozzari A. Non-invasive measurements for shallow depth soil exploration: development and application of an electromagnetic induction instrument. / Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference The "Measurable" of Tomorrow: Providing a Better Perspective on Complex Systems. Cep. "2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference - The "Measurable" of Tomorrow: Providing a Better Perspective on Complex Systems, I2MTC 2015 - Proceedings" 2015. С. 1395-1399.
10. Кормин А.Н. Оценка фактической природной газоносности угольных пластов при ведении горных работ // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2009. – № ОВ7. – С. 150-154.
11. Кормин А.Н. Определение газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ / А.Н. Кормин, Д.Н. Застрелов, В.О. Тайлаков // Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня. – 2013. – № ОВ 6. – С. 155-160.
12. Кормин А.Н. Сопоставительный анализ прямых методов определения газоносности угольных пластов // Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена -2013». Том 3. – 2013. – С. 260-263.
13. Уткаев Е. А. О влиянии нарушения призабойной зоны скважины на фильтрационные характеристики угольного пласта // Метан: Сборник научных трудов по материалам симпозиума «Неделя горняка-2009». Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня. – 2009. – № ОВ11. – С. 301–305.
14. Уткаев Е. А. К определению геометрических размеров прискважинной зоны угольного пласта с нарушенной проницаемостью // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных с элементами научной школы. «Горняцкая смена – 2013». Новосибирск. 2013. С. 239 – 242.
15. Уткаев Е. А. Оценка фильтрационных свойств в призабойной зоне скважины при извлечении метана из угольных пластов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово, 2012. 18 с.
16. Shaparenko I., Manstein Y., Balkov E. Geophysical surveys of ash disposal using electrical resistivity tomography and electromagnetic profiling / Geophysics 2014 - 10th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 10. 2014.

## REFERENCES

1. Balkov E.V. Jelektrotomografija: apparatura, metodika i opyt primenenija / E. V. Balkov, G. L. Panin, Ju. A. Manshtejn, A. K. Manshtejn, V. A. Beloborodov // Geo-fizika, g. Kemerovo, – 2012. – №6. – S. 54
2. «Svod pravil po inzhenernym izyskanijam dlja stroitel'stva. Inzhenerno-geologicheskie izyskanija dlja stroitel'stva SP 11-105-97, chast' IV «Pravila proiz-vodstva geofizicheskikh issledovanij».
3. Saltymakov E.A. Primerenie jelektrotomografii dlja ocenki uslovij zale-ganija ugol'nyh plastov na razrezah Kuzbassa / E.A. Saltymakov, V.Ju. Kiselev, O.V. Tajlakov // I 66 Innovacionnyj konvent «Kuzbass: obrazovanie, nauka, innovacii»: materialy Innovacionnogo konventa. – 15.10.2015. – S. 20-22.
4. Tajlakov O.V., Saltymakov E.A., Zastrelov D.N., Sokolov S.V., Makeev M.P., Jarosh A.S. Opredelenie glubin zaledaniya vodonosnyh gorizontov metodom jelektrotomografii v usloviyah Kuzbassa // Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti, Kemerovo, 2016. – №1. – С. 30 – 34.
5. Karin Y.G., Balkov E.V., Panin G.L., Tsukanov K.G. A study of sediments oz. Teletskoe by electrical resistivity tomography / 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016. С. 243-247.
6. Sokolov S.V. Primerenie sejsmicheskoy razvedki dlja utochnenija gorno-geologicheskikh uslovij razrabotki ugol'nyh mestorozhdenij / S.V. Sokolov // Gornjackaja smena. - Sb. trudov Vserossijskoj nauchnoj konferencii dlja studentov, aspiran-tov i molodyh uchenyh s jelementami nauchnoj shkoly «Gornjackaja smena – 2013». Т. 3 – 2013. – С. 153-155.
7. Auzin A.A., S.A. Zacepin. Inzhenerno-geofizicheskie issledovanija na presnovodnyh akvatorijah // Vestnik VGU. Serija: Geologija. 2014. № 2.
8. Balkov E.V. Rezul'taty primenenija maloglubinnogo jelektromagnitnogo profilirovaniya na jeklektrometricheskem poligone instituta neftegazovoj geologii i geofiziki SO RAN / E.V. Balkov, T.A. Stojkin, A.K. Manshtejn, Ju.G. Karin // Geofizicheskie issledovanija. Т. 14. № 3. – 2013 – S. 55-63.
9. Manstein Yu.A., Manstein A.K., Balkov E., Panin G., Scozzari A. Non-invasive measurements for shallow depth soil exploration: development and application of an electromagnetic induction instrument. / Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference The "Measurable" of Tomorrow:

Providing a Better Perspective on Complex Systems. Cep. "2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference - The "Measurable" of Tomorrow: Providing a Better Perspective on Complex Systems, I2MTC 2015 - Proceedings" 2015. C. 1395-1399.

10. Kormin, A.N. Ocenna fakticheskoy prirodnoy gazonosnosti ugol'nyh plastov pri vedenii gornyh rabot / A.N. Kormin // Otdel'nyj vypusk Gornogo informacionno-analiticheskogo bjulletenja. – 2009. – № OV7. – S. 150-154.

11. Kormin, A.N. Opredelenie gazonosnosti ugol'nyh plastov v processe vedenija gornyh rabot / A.N. Kormin, D.N. Zastrelov, V.O. Tajlakov // Otdel'nyj vy-pusk Gornogo Informacionno-analiticheskogo bjulletenja. – 2013. – № OV 6. – S. 155-160.

12. Kormin, A.N. Sopostavitel'nyj analiz prjamyh metodov opredelenija gazonosnosti ugol'nyh plastov / A.N. Kormin // Sbornik trudov Vserossijskoj nauchnoj konferencii dlja studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s elementami nauchnoj shkoly «Gornjackaja smena -2013». Tom 3. – 2013. – S. 260-263.

13. Utkaev, E. A. O vlijanii narushenija prizabojnoj zony skvazhiny na fil'tracionnye harakteristiki ugol'nogo plasta / Utkaev E.A. // Metan: Sbornik nauchnyh trudov po materialam simpoziuma «Nedelja gornjaka-2009». Otdel'nyj vypusk Gornogo Informacionno-analiticheskogo bjulletenja. – 2009. – № OV11. – S. 301–305.

14. Utkaev, E. A. K opredeleniju geometriceskikh razmerov priskvazhinnoj zony ugol'nogo plasta s narushennoj pronicaemost'ju / Utkaev E.A. // Vserossijskaja nauchnaja konferencija studentov, aspirantov i molodyh uch-jonyh s jelementami nauchnoj shkoly. «Gornjackaja smena – 2013». Novosibirsk. 2013. S. 239 – 242.

15. Utkaev E. A. Ocenna fil'tracionnyh svojstv v prizabojnoj zone skva-zhiny pri izvlechenii metana iz ugol'nyh plastov // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskikh nauk. Kemerovo, 2012. 18 s.

16. Shaparenko I., Manstein Y., Balkov E. Geophysical surveys of ash disposal using electrical resistivity tomography and electromagnetic profiling / Geophysics 2014 - 10th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 10. 2014.

Поступило в редакцию 01.11.2017  
Received 01.11.2017