

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 550.372: 550.837

Н. А. Смирнов, С. М. Простов

### ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ ГИДРООТВАЛОВ

Для производства вскрышных работ на угольных разрезах Кузбасса используется технология гидромеханизации. На данный момент гидромониторный смыв пород с размещением их на гидроотвалы является неотъемлемой частью открытой геотехнологии в Кузбассе, где суммарное количество гидроотвалов превышает 50 при общей площади более 7000 га.\*

В последние годы в ряде случаев возникла необходимость повторной разработки намывных массивов. Такие массивы характеризуются неоднородностью механических свойств намывных пород, связанной с наличием зон остаточной влагонасыщенности. Неправильные проектные решения, принятые в условиях недостатка информации о свойствах намывных пород могут стать причиной нарушений устойчивости откосов. Необходимость безопасной отработки намывных пород требует знания особенности свойств массивов песчано-глинистых грунтов гидроотвалов. Поскольку гидроотвалы имеют значительные площади, прямые инженерно-геологические изыскания не могут обеспечить требуемой детальности и информативности прогноза состояния и свойств намывного массива. Целесообразно проводить геофизи-

более важных свойств горных пород.

Разработана методика комплексного геолого-геофизического мониторинга, основные положения которой приведены ниже.

На гидроотвале №3 филиала ОАО УК «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез» длительное время проводятся геолого-маркшейдерские исследования различными организациями. С целью изучения гидрогеологических условий намывного массива и изменчивости физико-механических свойств грунтов по глубине в марте 2004 г. ООО «Геотехника» на всю мощность намывных отложений проведены инженерно-геологические изыскания, в результате которых установлено, что пляжная зона гидроотвала сложена насыпными (элемент 1) и намывными (элементы 1 б и 1 в) грунтами, залегающими на аллювиальных и элювиальных суглинках четвертичного возраста, подстилаемых скальными грунтами пермского возраста. В таблице приведены механические свойства грунтов (плотность  $\gamma$ , угол внутреннего трения  $\phi$ , сцепление  $C$ , консистенция  $I_L$ ), слагающих намывной массив.

Вскрытые отложения «сухих» (элемент 1) отвалов свидетельствуют о развитии при отвалооб-

Характеристика и свойства инженерно-геологических элементов

Наименование	Вид грунта	Мощность	Свойства
Элемент 1 (1 Q <sub>IV</sub> )	Насыпной грунт, представленный суглинком дресвянистым бурового цвета	22,5 м в районе скважины С2-2004	$\gamma = 1,97-2,08 \text{ т/м}^3$ $\phi = 23-27^\circ$ $C = 0,022-0,050 \text{ МПа}$ $I_L = (-0,33)-(-0,14)$
Элемент 1 б (1 Q <sub>IV</sub> ).	Намывной грунт, представленный суглинком бурым	17,5 м в районе скважины С2-2004	$\gamma = 1,85-1,96 \text{ т/м}^3$ $\phi = 10-19^\circ$ $C = 0,014-0,023 \text{ МПа}$ $I_L = 0,4-0,59$
Элемент 1 в (1 Q <sub>IV</sub> )	Намывной грунт, представленный суглинком, реже глиной, бурый	39,5 м в районе скважины С3-2004	$\gamma = 1,79-1,83 \text{ т/м}^3$ $\phi = 14-20^\circ$ $C = 0,006-0,009 \text{ МПа}$ $I_L = 0,72-1,71$

ческие зондирования массива на межскважинных интервалах по основным профилям для детализации пространственно-временных изменений наи-

разовании на гидроотвалах оползневых деформаций подпошвенного типа, когда деформирование сопровождается выдавливанием пород основания отвала – намывных пород и замещением их насыпными отложениями из смежного отвала.

На рис. 1 представлены зависимости физико-механических параметров намывных пород гидроотвала от глубины залегания  $h$  в различные мо-

\*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

менты времени консолидации. При этом для сравнения использованы результаты инженерно-геологических изысканий, проведенных отделом инженерных изысканий ПО «Кузбассгипрошахт» вблизи скважины С2-2004 в 1993 г.

Из приведенных зависимостей следует, что за период с 1993 до 2004 гг. в пределах намывного слоя произошло изменение почти всех физико-механических свойств, причем характерным является увеличение диапазонов изменения свойств массива с глубиной  $h$ .

В ходе инженерно-геологических изысканий по поверхности намывного массива гидроотвала в

пор, приводящим к передаче давления на поронасыщающую жидкость. Эти процессы, присущие большинству гидроотвалов, осложнены оползневыми деформациями подпошвенного типа, результатом которых стало частичное замещение намывных пород насыпными грунтами. При таких условиях в массиве формируется избыточное поровое давление, изменяющее жесткость скелета породы, его напряженное состояние и устойчивость.

Геологические особенности намеченного к отработке техногенного массива, указанные выше, определяют необходимость постоянного мо-

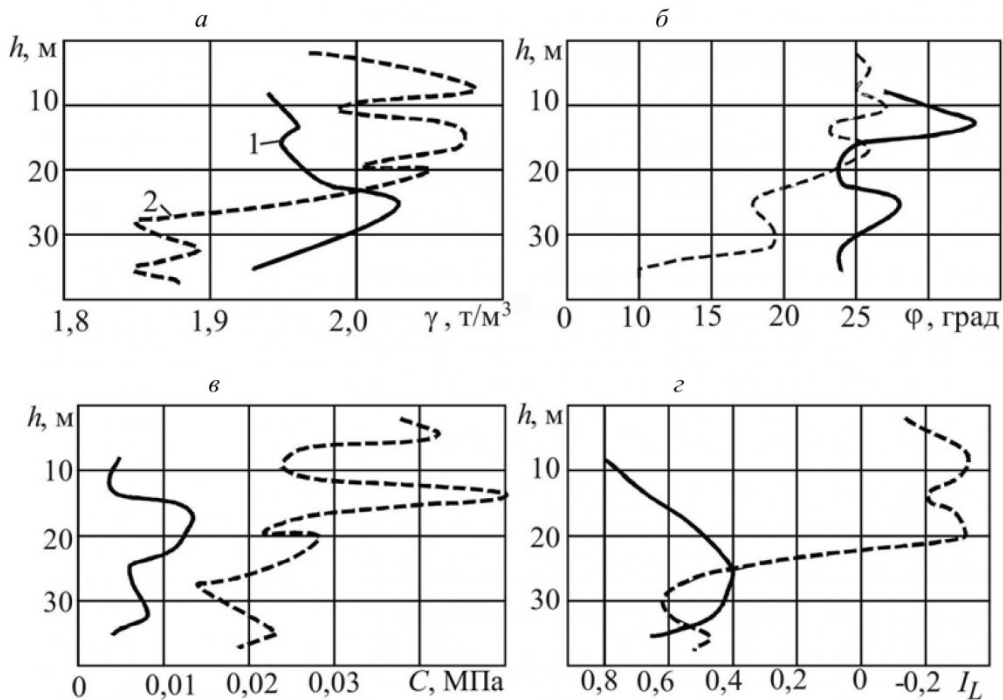


Рис. 1. Графики зависимостей плотности  $\gamma$  (а), угла внутреннего трения  $\phi$  (б), сцепления  $C$  (в), консистенции  $I_L$  (г) намывных пород от глубины залегания  $h$  и времени консолидации грунтов: 1 – скв. С4-1993; 2 – скв. С2-2004

2004 году вскрыт техногенный водоносный горизонт, приуроченный к намывным грунтам. Кровля водоносного горизонта залегает на глубине от 0,3 м до 22,5 м, что обусловлено фильтрационной неоднородностью грунтов, слагающих данный массив. Подземные воды являются напорными, что вызвано наличием избыточного порового давления в намывном массиве в результате воздействия на него нагрузок слабопроницаемых вышележащих слоев. Уровень воды установился на глубине от поверхности: 1,5 м в скважине С2-2004 и 0,0 м в скважине С3-2004.

Таким образом, инженерно-геологические изыскания показали, что в техногенном грунтовом массиве, сформированном с применением технологии селективного намыва при периодическом отдыхе гидроотвала, происходят сложные геомеханические и гидродинамические процессы, связанные с консолидацией пористой среды под действием гравитационных сил, объемным сжатием

ниторинга физико-механических свойств с целью выявления динамики изменения состояния и свойств исследуемого массива. При этом прямые инженерно-геологические изыскания не смогут обеспечить требуемую плотность наблюдений. Оптимальным с точки зрения эффективности и экономической целесообразности является сочетание прямых (скважинных) и косвенных (геофизических) методов исследования грунтовых массивов [1].

Для глинистых горных пород механические свойства во многом определяются влажностью, причем зачастую зависимости сцепления и угла внутреннего трения от влажности пород близки к линейным [2]. Следовательно, установив статистические связи между влажностью и механическими свойствами грунтов, необходимыми для проектирования откосов, возможно по изменению влажности контролировать изменение основных механических свойств. Для большинства горных

пород удельное электрическое сопротивление (УЭС) определяется пористостью и степенью водонасыщенности [1, 3]. Отсюда следует, что весьма перспективным методом для исследования структуры и свойств намывного массива является метод УЭС. Большинство измерений этим методом выполняется по схемам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофиллирования (ЭП), служащим соответственно для вертикальной стратификации грунтовых массивов и для исследования параметров геологического разреза вдоль определенного направления при относительно постоянной глубине [1, 3, 4].

На рис. 2 показана в графической форме методика прогноза относительного изменения влажности массива электрофизическим методом, основанная на сочетании прямых методов исследования и косвенных, включающих ВЭЗ и ЭП.

На первом этапе необходимо провести измерения по схеме ВЭЗ вблизи скважин, то есть над массивом с известным геологическим строением. Результатами измерений методами ВЭЗ и ЭП являются зависимости эффективного (кажущегося) УЭС от разносов установки  $AB$  и координат центра установки.

Эффективное УЭС является весьма интегральным параметром, зависящим как от параметров среды, так и от схем измерений разности потенциалов. Чтобы определить истинные УЭС слоев, слагающих массив, необходимо выполнить количественную интерпретацию [1, 3, 4]. Кривые

ВЭЗ, измеренные над массивом с известными мощностями слоев называют параметрическими. Интерпретация таких данных необходима, чтобы определить истинные УЭС слоев. Количественная интерпретация данных ВЭЗ обычно реализуется методом подбора, который сводится к сопоставлению теоретической кривой, рассчитанной для горизонтально-слоистой среды с известными параметрами мощности  $h_i$  и УЭС  $\rho_i$  слоев, с экспериментальной кривой ВЭЗ, полученной в результате измерения разности потенциалов на поверхности среды.

Подбор теоретических кривых обычно реализуется посредством минимизации функционала невязки, в качестве которой берется среднее квадратичное отклонение сравниваемых функций:

$$F(\vec{p}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{\rho_{kj}^{\text{э}}(AB) - \rho_{kj}^{\text{т}}(AB)}{\rho_{kj}^{\text{т}}(AB)} \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $\rho_{kj}^{\text{э}}(AB)$  – наблюдаемая кривая зондирования;  $\rho_{kj}^{\text{т}}(AB)$  – теоретическая кривая зондирования;  $\vec{p} = \{h_1, h_2, \rho_1, \rho_2, \rho_3\}$  – вектор параметров трехслойного разреза;  $N$  – число разносов питающей линии установки.

Далее по данным ВЭЗ необходимо выбрать разнос установки (расстояние между питающими электродами), соответствующий исследуемому

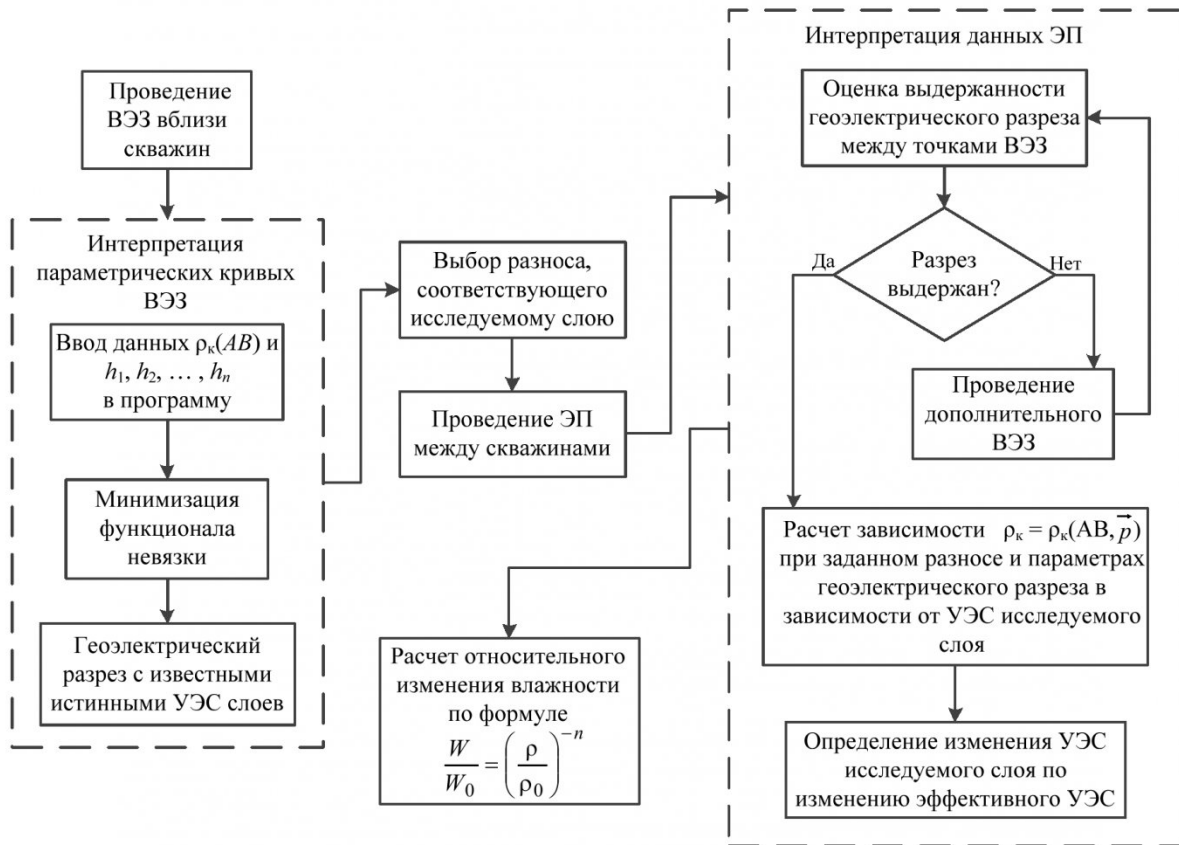


Рис. 2. Методика прогноза изменения влажности между скважинами электрофизическим методом

слою и провести измерения по схеме ЭП по профилю между скважинами.

Поскольку прогноз влажности исследуемого массива возможен только на основе данных об изменении истинного УЭС исследуемого слоя, необходимо выполнить количественную интерпретацию данных ЭП. На настоящий момент отсутствуют надежные методы количественной интерпретации данных ЭП для многослойных геоэлектрических разрезов. Это связано с тем, что даже при оптимальном разnose установки (исследуемый слой оказывает наибольшее влияние на измеряемый параметр) в большинстве случаев параметры других слоев оказывают значительное влияние на измеряемый параметр. Таким образом, количественная интерпретация данных ЭП без надежных сведений о параметрах других слоев будет недостаточно точной. Однако в некоторых случаях, когда в пределах исследуемого участка слои достаточно выдержаны по мощности и УЭС, возможно в первом приближении оценить изменение УЭС исследуемого слоя. При этом возможность количественной интерпретации данных ЭП оценивается на основе анализа единичных ВЭЗ на исследуемом участке и априорной информация о структуре массива. Следовательно, перед интерпретацией данных ЭП необходимо убедиться в выдержанности параметров геоэлектрического разреза в пределах изучаемого участка.

Интерпретация данных ЭП представляет собой определение УЭС исследуемого слоя при известных значениях эффективного УЭС, разноса установки и принятых параметрах геоэлектрического разреза. Для многослойных разрезов в целях упрощения расчетов разумно производить замену исходного разреза на эквивалентный трехслойный разрез с истинным сопротивлением второго (исследуемого) слоя и эквивалентными значениями параметров других слоев, определенных по ВЭЗ.

Теоретическая кривая эффективного сопротивления для трехслойного разреза рассчитывается по формуле [5]

$$\rho_k(AB) = \frac{\rho_1 AB(a^2 - 1)}{4a} \left( \int_0^\infty R_N^0(k) J_0 \left( k \left( \frac{AB}{2} - \frac{AB}{2a} \right) \right) dk - \int_0^\infty R_N^0(k) J_0 \left( k \left( \frac{AB}{2} + \frac{AB}{2a} \right) \right) dk \right) \quad (2)$$

где  $AB$  – разнос установки, м;  $a = AB / MN$  – параметр, характеризующий тип установки ( $a = 3$  – для установки Веннера,  $a > 3$  – для установки Шлюмберже), м;  $R_N^0$  – приведенный импеданс

слоистой среды, для трехслойной среды

$$R_N^0(k) = \text{cth} \left\{ kh_1 + \text{arcth} \left[ \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{cth} \left( kh_2 + \text{arcth} \left( \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \right) \right] \right\}$$

$\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – УЭС слоев, Ом·м;  $h_1, h_2$  – мощности слоев, м;  $J_0(kr)$  – функция Бесселя.

Получить аналитическую зависимость  $\rho_2$  в зависимости от  $\rho_k$ , типа установки установки и параметров геоэлектрического разреза весьма трудно. Поэтому целесообразно рассчитать палетку  $\rho_k$  от  $\rho_2$  при заданных параметрах геоэлектрического разреза и разnose установки. Далее по палетке, характерной для изучаемого участка, определяется изменение УЭС исследуемого слоя.

В теории электроразведки приводятся полуэмпирические зависимости для трехкомпонентной среды, которую представляет собой трещиновато-пористая порода с частично заполненными пустотами [6,7]:

$$\rho = \frac{\alpha_m \alpha_n}{k_\pi^m k_B^n} P_\rho \rho_0, \quad (3)$$

$P_\rho$  – параметр, учитывающий образование проводящих пленок в порах при глинистых растворах;  $\rho_0$  – УЭС поровой влаги;  $\alpha_m, \alpha_n$  – эмпирические постоянные, изменяющиеся в диапазоне 0,4–1,6;  $k_\pi$  – коэффициент пористости породы;  $k_B$  – коэффициент водонасыщенности породы;  $m$  – постоянная, зависящая от структуры порового пространства,  $m = 1,3-2,2$ ;  $n$  – постоянная, зависящая от степени гидрофобности пород (смачиваемости породы раствором), для глинистых гидрофильных коллекторов  $n < 1,6$ .

Из уравнения (3) следует, что изменение УЭС глинистых грунтов в пределах геологически однородного слоя (при постоянной пористости) определяется, в основном, изменением коэффициента водонасыщенности. Поскольку глинистые породы характеризуются сравнительно постоянной пористостью, из уравнения (3) можно получить следующую зависимость

$$\frac{W}{W_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-n}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  и  $W_0$  – значения УЭС и влажности изучаемого слоя в начальной точке профиля (у скважины);  $\rho$  и  $W$  – определяемые по результатам ЭП значения УЭС и влажности слоя.

Результаты реализации изложенной методики будут приведены в следующей работе авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Огильви, А. А.* Основы инженерной геофизики / Под ред. В. А. Богословского. – М. : Недра, 1990. – 501 с.
2. *Попов, В. Н.* Управление устойчивостью карьерных откосов / В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – М. : Изд-во МГГУ 2008, – 683 с.



3. Хмелевской, В. К. Основной курс электроразведки. Часть 1 – М. : Изд-во Московского университета, 1970. – 300 с.
4. Якубовский, Ю. В. Электроразведка: учеб. для вузов / Ю. В. Якубовский, И. В. Ренард – М. : Недра, 1991. – 359 с.
5. Светов, Б. С. Основы геоэлектрики. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 656 с.
6. Кобранова, В. Н. Петрофизика. – М. : Недра, 1986. – 392 с.
7. Латышева, М. Г. Практическое руководство по интерпретации данных ГИС / Латышева М. Г., Мартынов В. Г., Соколова Т. Ф. . – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 327 с.

□ Авторы статьи:

Смирнов Николай Александрович, аспирант ГУ КузГТУ. Email: <a href="mailto:SmirnovNick@yandex.ru">SmirnovNick@yandex.ru</a> ;	Простов Сергей Михайлович, докт.техн. наук; профессор каф.теоретической и геотехнической механики КузГТУ. Тел. 89050757924
---	---

УДК 550.372: 550.837

Н. А. Смирнов, С. М. Простов

### ПРОГНОЗ ВЛАГОНАСЫЩЕННОСТИ НАМЫВНОГО МАССИВА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе\* рассмотрены результаты применения методики, изложенной в статье [1], на гидротвале №3 филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез». Опытный участок располагался ниже ограждающей перемычки 4 по тальвегу лога в районе опытных скважин С2-2004 и С3-2004 (рис. 1).

Цель исследований состояла в прогнозе структуры намывного массива и изменения влажности водоносного горизонта по наиболее опас-

массива, соответствующие указанным профилям, представлены на рис. 2.

Результаты ВЭЗ приведены на рис. 3. Результаты ЭП по профилям  $x$ ,  $y_1$  и  $y_2$  приведены на рис. 4. Повторные измерения показали уменьшение на большинстве интервалов исследования на 10-20% уровня кажущегося УЭС, вызванное увеличением влажности грунтового массива. Из графиков ЭП следует, что на профиле  $x$  возникла отрицательная аномалия в зоне влияния водоема, природа кото-

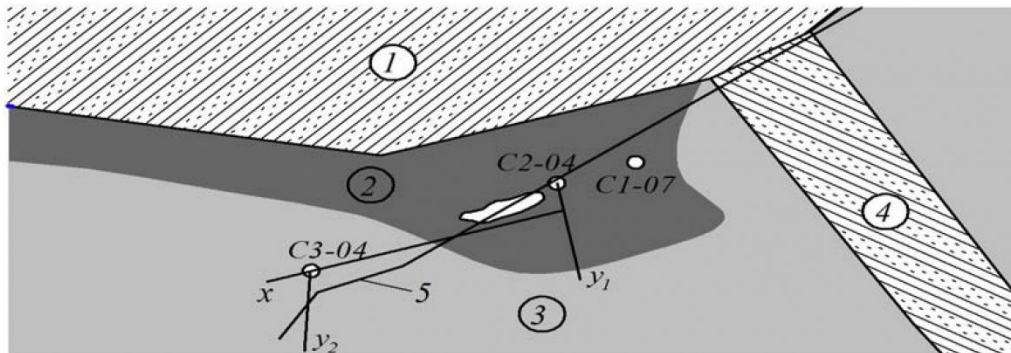


Рис. 1. План исследуемого участка: 1 – Пихтовский ж.д. отвал; 2 – зона замещения намывных пород насыпными; 3 – гидротвал; 4 – ограждающая перемычка; 5 – тальвег лога; С1-С3 – геологические скважины;  $x$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  –  $n$  родольный и поперечные профили

ному сечению. Для этого на исследуемом участке в 2005 году было проведено 2 вертикальных электрических зондирования (ВЭЗ) в районе опытных скважин С2-2004 и С3-2004 и электропрофилирование (ЭП) по профилям  $x$ ,  $y_1$  и  $y_2$ . В 2010 г. были проведены повторные измерения. Поперечное и продольное вертикальные сечения намывного

рого связана с фильтрацией жидкости через ж.д. отвал (рис. 4). На профиле  $y_1$  выявлено уменьшение УЭС по всей длине профиля, что связано с интенсификацией процессов фильтрации через ограждающую перемычку.

Обработка кривых ВЭЗ выполнялась в программе IP2Win. В качестве априорной информации были введены значения мощностей слоев, известные из геологических скважин. Результаты количественной интерпретации кривых ВЭЗ (инверсии) показаны на рис. 5, 6. В районе скважины

\*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы