

УДК 624.131:550.837

**ПРОГНОЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАМЫВНОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

С. М. Простов¹, Н. А. Смирнов², С. П. Бахаева¹

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: psm.kem@mail.ru, ул. Весенняя, 26, 650000, г. Кемерово, Россия

²Новационная фирма "КУЗБАСС-НИИОГР",
Пионерский бульвар, 4а, 650054, г. Кемерово, Россия

Приведена методика прогноза физико-механических свойств техногенного массива на основе геолого-геофизических исследований, включающая анализ данных электротомографии, установление взаимосвязей между комплексом физических свойств грунтов. На примере намывного массива гидроотвала угольного разреза дан прогноз изменения физико-механических свойств намывных грунтов, расположенных под отвальной насыпью.

Намывной массив, физико-механические свойства, регрессионный анализ, электротомография, удельное электросопротивление, геофизический прогноз

Для обеспечения безопасного ведения горных работ при открытой геотехнологии необходимо прогнозировать устойчивость откосных сооружений (уступов бортов, отвалов, насыпей, элементов гидротехнических сооружений). Этот прогноз невозможен без знания геологической структуры массива и физико-механических свойств (плотность, пористость, сцепление, угол внутреннего трения) горных пород. Получение требуемого объема инженерно-геологической информации за счет прямых методов изысканий (бурение скважин с отбором монолитов и испытанием их в лабораторных условиях) во многих случаях не представляется возможным из-за высокой стоимости, поэтому актуальным остается развитие методического обеспечения метода бесскважинного электрического зондирования.

На основе установленных диапазонов изменения структурных параметров, определяющих взаимосвязь пористости и влажности с удельным электросопротивлением (УЭС), в работе [1] предложено усредненно оценивать по данным зондирования (ВЭЗ) и профилирования (ЭП) относительные значения площади увлажненных зон и степень влагонасыщенности грунтов дамб. Использование методик количественной интерпретации данных ВЭЗ дает возможность контролировать относительное изменение влажности промежуточного влагонасыщенного слоя техногенного грунтового массива по величине его истинного УЭС [2]. Применение георадиолокационной аппаратуры для подповерхностного электромагнитного зондирования позволяет значительно повысить оперативность измерений при диагностировании расположения и размеров аномальных зон (пустот, ослабленных и просадочных слоев), а также оценивать изменение прочности закрепленных грунтов за счет использования специальных интегральных параметров радарограмм [3 – 5].

Одним из наиболее перспективных методов бесскважинного зондирования является метод электрической томографии (электротомографии), сочетающий производительность и плотность измерений с высокой разрешающей способностью. В частности, в работе [6] на основе решения прямых задач для моделей с наклонными границами слоев и локальными аномалиями в форме сфероида развита методика построения геолого-геофизических разрезов в условиях сложно-структурных месторождений. Данная методика реализована при прогнозе опасности оползнеобразования при разработке бурого угольного месторождения путем дифференцирования по величине УЭС ослабленных контактов слоев мягкопластичных глин и водонасыщенных песчано-глинистых пород [7].

Представляет интерес изучение взаимосвязей между физико-механическими и электрическими параметрами горных пород, позволяющее перейти к усредненным количественным параметрам, которые можно непосредственно использовать при расчете коэффициентов запаса устойчивости откосных сооружений. В качестве объекта исследования рассмотрен намывной массив гидроотвала песчано-глинистых грунтов, который характеризуется повышенной сложностью при изучении, поскольку свойства грунтов весьма дифференцированы в пространстве и изменяются во времени вследствие водоотдачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика геолого-геофизического контроля намывного массива включает четыре основных этапа:

- измерения методом электротомографии на исследуемом участке;
- определение мест бурения скважин на основе анализа распределения УЭС в намывном массиве;
- обоснование прогнозной модели массива путем установления регрессионных зависимостей между свойствами грунтов;
- прогноз изменения исследуемых параметров намывного массива по изменению УЭС.

Детализированный алгоритм прогноза представлен на рис. 1.

В рамках геофизических изысканий необходимо провести измерения по системе профилей на исследуемом участке в местах, где планируется бурение скважин, или между существующими скважинами. Это необходимо для того, чтобы получить практически непрерывное распределение УЭС в намывном массиве на межскважинных интервалах. При количественной интерпретации данных электротомографии следует учитывать данные о высотных отметках основания гидроотвала, что в некоторых случаях позволит повысить точность интерпретации.

Места для бурения скважин желательно выбирать таким образом, чтобы значения УЭС намывных грунтов в местах бурения отличались максимально. Анализ данных, полученных из этих скважин, позволит определить причины изменения УЭС намывного массива в пределах исследуемого участка. Кроме того, при выборе мест для бурения скважин желательно обеспечить возможность отбора как можно большего количества образцов исследуемого грунта путем бурения скважин в местах с наибольшей мощностью намывного слоя.

При установлении прогнозных зависимостей необходимо выявить параметр, изменение которого в большей степени определяет изменение УЭС, что в дальнейшем позволит дать прогноз изменения этого параметра по всему массиву.

При обосновании прогнозной модели, основанной на использовании регрессионных зависимостей между свойствами грунтов, следует учитывать особенности, характерные для определенных типов грунтов. Например, в глинистых породах наблюдается резкое изменение их свойств в

зависимости от степени влажности [8]. Сухие глинистые породы ведут себя как твердые тела. С увеличением влажности они постепенно теряют свою первоначальную прочность, переходят в мягкое состояние, а при сильном переувлажнении отдельные их разности могут переходить в текучее состояние. Влияние влажности на прочностные свойства глинистых пород обусловлено тем, что при ее возрастании увеличиваются гидратные оболочки связанной воды, которые раздвигают частицы породы, уменьшая силы сцепления между ними. При полном насыщении водой, свойственном грунтам намывного массива, увеличение толщины гидратных оболочек приводит к увеличению объема и пористости породы (набуханию). При этом следует отметить, что для глинистой породы, залегающей на глубине, возможность дополнительного насыщения водой за счет набухания ограничена вследствие давления вышележащей толщи пород.



Рис. 1. Алгоритм геолого-геофизического прогноза физико-механических свойств техногенного массива

При увеличении нагрузки на намывной массив (намыв вышележащих слоев, отсыпка “сухих” отвалов), а также после окончания намыва под действием собственной массы слагающего грунта в намывном массиве возникают дополнительные сжимающие напряжения, изменяющие структуру грунта [9]. Часть внешнего давления воспринимается поровой водой, что приводит к возникновению избыточного порового давления. Разность напоров внутри области деформиро-

вания скелета грунта и на ее границах приводит к оттоку воды и уплотнению пород (процесс фильтрационной консолидации). То есть увеличение нагрузки на намывной массив со временем приводит к уменьшению пористости намывных пород и увеличению их прочностных свойств.

Таким образом, в условиях залегания намывных пород изменение физико-механических свойств обусловлено изменением пористости, которая, в свою очередь, определяется нагрузкой от вышележащей толщи. Неравномерность распределения свойств намывных массивов зависит от неравномерности внешней нагрузки от вышележащей толщи и связанного с этим перераспределения влаги.

Для глинистых горных пород механические свойства во многом определяются влажностью, причем зачастую регрессионные зависимости сцепления и угла внутреннего трения от влажности пород близки к линейным [10]. Следовательно, установив статистические связи между влажностью и механическими свойствами грунтов, необходимыми для проектирования откосов, возможно по изменению влажности контролировать изменение механических свойств. Следует отметить, что для намывных грунтов влажность однозначно зависит от пористости, поскольку коэффициент водонасыщенности у таких грунтов, как правило, равен 1.

В соответствии с классическими представлениями зависимость УЭС горной породы от определяющих факторов описывается эмпирической зависимостью [11; и др.]

$$\rho = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{k_{\text{п}}^m k_{\text{в}}^n} \Pi_{\text{м}} \Pi_{\text{п}} B_d P_t \rho_{\text{в}}, \quad (1)$$

где α_1, α_2 — эмпирические постоянные, изменяющиеся в диапазоне 0.4–1.6; $k_{\text{п}}$ — пористость породы; $k_{\text{в}}$ — коэффициент водонасыщенности породы; m — постоянная, зависящая от структуры порового пространства, $m = 1.3 - 2.3$; n — постоянная, зависящая от степени гидрофобности пород; $\Pi_{\text{м}}$ — параметр, учитывающий наличие электропроводящих минералов; $\Pi_{\text{п}}$ — параметр, учитывающий поверхностную проводимость (глинистость); B_d — параметр зернистости; P_t — параметр температуры; $\rho_{\text{в}}$ — УЭС поровой влаги.

В пределах геологически однородного слоя (при неизменных эмпирических коэффициентах) изменение УЭС определяется изменением коэффициента водонасыщенности и пористости. Поскольку намывные грунты характеризуются практически полным заполнением пор водой, в большинстве случаев для намывных массивов изменение УЭС обусловлено изменением пористости.

Таким образом, при известном по данным геофизических измерений распределении электросопротивления геологически однородного слоя намывных пород, а также при известном значении пористости слоя в какой-либо точке профиля электрических зондирований изменение пористости можно вычислить по формуле

$$\frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{п}0}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/m}, \quad (2)$$

где ρ_0 и $k_{\text{п}0}$ — значения УЭС и пористости исследуемого слоя в некоторой опорной точке профиля (у скважины); ρ и $k_{\text{п}}$ — значения УЭС и пористости исследуемого слоя в произвольной точке профиля.

Изменение УЭС определяется на основе анализа геоэлектрического разреза, полученного в результате интерпретации данных электротомографии. При этом сначала по геоэлектрическому разрезу выявляются границы инженерно-геологических элементов (ИГЭ), слагающих исследуемый массив. Эта задача решается путем анализа распределения УЭС с учетом априорной информации об исследуемом массиве.

При расчетах устойчивости откосных сооружений нормативное значение прочностных характеристик каждого ИГЭ принимается равным среднему значению из полученной совокупности случайных величин в разных точках ИГЭ [10]. При этом необходимо отметить, что изменения значений физико-механических свойств в пределах предварительно выделенных ИГЭ не проявляются на геоэлектрическом разрезе, установленном по данным электрических зондирований, что связано с принципиальными различиями в методах получения и обработки информации при инженерно-геологических изысканиях и геофизических измерениях. Таким образом, данные электрических зондирований характеризуют распределение усредненных в пределах ИГЭ значений УЭС, вследствие чего прогнозные значения физико-механических свойств, определенные по данным геофизических измерений, будут соответствовать их усредненным значениям.

На основе обработки банка экспериментальных данных, включающих результаты инженерно-геологических изысканий и электрических зондирований, путем обратных расчетов с использованием зависимости (1) в работах [12–14] для условий Кузбасса получены диапазоны изменения основных структурных параметров m и n массивов естественного сложения и техногенных массивов.

Описанная методика прогнозирования физических свойств приповерхностного массива по данным электрических зондирований реализована при исследовании намывного массива гидроотвала № 3 Кедровского угольного разреза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидроотвал № 3 расположен на разрезе “Кедровский” в северо-восточной части участка “Основное поле”. В результате доразведки установлено, что угольные пласты в районе гидроотвала № 3 залегают иначе, чем представлялось ранее, и для разработки новых угольных пластов возникла необходимость удаления части гидроотвала. Для формирования откоса части гидроотвала, не подлежащей отработке, на его пляжной зоне отсыпана разделительная насыпь (ограждающая перемычка), а в 2008 г. начата отсыпка автоотвала вскрышных пород в виде двух насыпей различной высоты. Основное требование к такой трехъярусной системе — обеспечение устойчивости откоса, обращенного к удаляемому участку гидроотвала.

В 2002 и 2004 гг. ООО “Геотехника” проведены инженерно-геологические изыскания на разделительной насыпи и пляжной зоне гидроотвала с целью изучения физико-механических свойств и строения намывного массива. Схема опытного участка приведена на рис. 2.

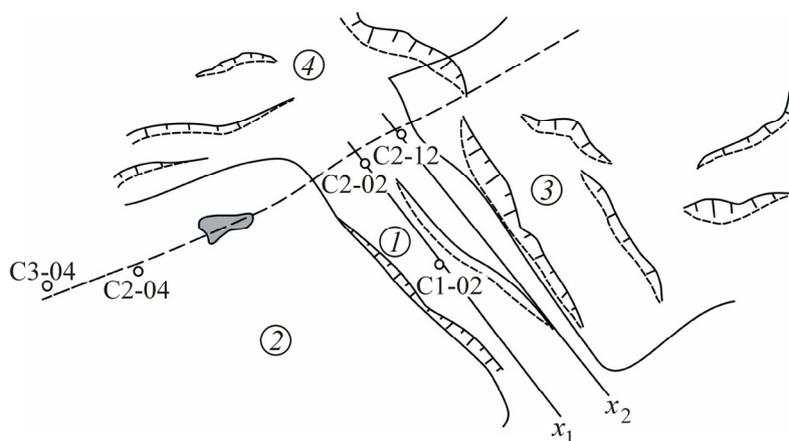


Рис. 2. Схема опытного участка гидроотвала № 3 Кедровского угольного разреза: 1 — ограждающая перемычка из смеси вскрышных пород; 2 — намывной массив глинистых пород; 3 — отвал вскрышных пород “Северный”, расположенный на намывных глинистых породах; 4 — отвал вскрышных пород “Пихтовский”, расположенный на естественных глинистых породах; C1-02 – C2-12 — геологические скважины; x_1 , x_2 — профили электрических зондирований

В рамках инженерных изысканий 2002 г. на ограждающей перемышке пробурено две скважины до грунтов естественного основания гидроотвала с отбором 14 монолитов. В результате исследований установлено, что разделительная насыпь сложена насыпными грунтами (скальные породы вскрыши). Основанием ограждающей перемышки являются намывные грунты (суглинок, образованный за счет размыва глинистых вскрышных пород) туго- и мягкопластичной консистенции, водонасыщенные. Мощность намывных грунтов составляет 12.2 м в районе скв. С1-02 и 40.9 м в районе скв. С2-02.

Инженерно-геологические изыскания 2004 г. включали бурение двух скважин на пляжной зоне гидроотвала по тальвегу лога и четыре точки статического зондирования. Для определения физико-механических свойств намывных пород отобраны 16 монолитов. В результате исследований установлено, что в районе скв. С2-04 инженерно-геологический разрез представлен насыпным грунтом (суглинок дресвянистый, твердый) мощностью 22.5 м и намывным грунтом (суглинок бурый, туго- и мягкопластичной консистенции) мощностью 17.5 м. В районе скв. С3-04 расположен намывной грунт (суглинок, реже глина) мягкопластичной и текучей консистенции, насыщенный водой. Результаты статического зондирования показали, что данный грунт распространен на всей площадке, залегает в районе тальвега лога в виде слоя мощностью до 40 м.

В качестве исходных данных приняты значения физико-механических свойств 25 монолитов, отобранных из скважин в районе исследуемого участка и соответствующих намывным грунтам туго- и мягкопластичной консистенции. Значения физико-механических свойств исследуемых грунтов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства намывных грунтов

Номер скважины	Глубина отбора монолитов, м	Пористость $k_{п}$	Число пластичности I_p	Консистенция I_L	Угол внутреннего трения φ , град	Сцепление C , кПа
С1-02	20	0.42	0.079	0.67	28	20
	23	0.53	0.236	0.53	6	10
	26	0.51	0.157	0.66	8	11
С2-02	13	0.44	0.09	0.5	25	20
	16	0.44	0.15	0.29	16	25
	19	0.4	0.074	0.45	34	15
	24	0.42	0.104	0.44	17	10
	29	0.41	0.102	0.41	21	13
	34	0.4	0.111	0.22	12	32
	39	0.44	0.144	0.33	9	40
	45	0.44	0.129	0.57	17	15
	С2-04	24	0.46	0.17	0.66	18
27		0.46	0.15	0.53	19	14
30		0.49	0.17	0.66	19	19
33		0.49	0.17	0.68	10	23
36		0.48	0.17	0.71	10	19
С3-04	30	0.54	0.2	0.79	20	6
	35	0.52	0.18	0.77	14	9
С2-12	15	0.43	0.15	0.29	6	57
	20	0.48	0.256	0.33	1.5	53
	25	0.37	0.086	0.36	38.6	33
	30	0.36	0.096	0.16	19.2	80
	35	0.37	0.073	0.11	—	—
	40	0.42	0.199	0.21	5.3	68
	45	0.4	0.153	0.39	5.1	56

Для анализа взаимосвязей между свойствами грунтов рассчитана матрица коэффициентов корреляции [15]. В табл. 2 приведены ее значения, определенные по данным инженерно-геологических изысканий.

ТАБЛИЦА 2. Матрица коэффициентов корреляции

Свойства	k_n	I_p	I_L	φ	C
k_n	1	0.75	0.75	-0.39	-0.54
I_p	0.75	1	0.3	-0.73	0.06
I_L	0.75	0.3	1	0.13	-0.74
φ	-0.39	-0.73	0.13	1	-0.33
C	-0.54	0.06	-0.74	-0.33	1

Анализ результатов математической обработки данных инженерно-геологических изысканий, представленных в табл. 2, показал, что на сцепление исследуемых грунтов наибольшим образом влияет их консистенция, а на угол внутреннего трения — число пластичности. Следует отметить, что на все свойства в большей или меньшей степени влияет пористость.

В рассматриваемом случае по изменению усредненного значения пористости слоя намывного массива с достаточной точностью можно прогнозировать только консистенцию и пластичность. Для прогноза изменения усредненных значений физических свойств грунтов между скважинами необходимо получить уравнение регрессии. Доверительный интервал для среднеожидаемых прогнозных значений, определенных по уравнению регрессии, имеет вид [10, 15]

$$(ax_0 + b) - t_{1-\alpha/2} \sqrt{S^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)} < \bar{y} < (ax_0 + b) + t_{1-\alpha/2} \sqrt{S^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)}, \quad (3)$$

где \bar{y} — предсказанное среднеожидаемое значение y при заданном x_0 ; a, b — коэффициенты уравнения регрессии (параметры прогнозной модели); $t_{1-\alpha/2}$ — t -значение распределения Стьюдента; S^2 — оценка дисперсии σ^2 ; N — количество точек замера параметра x_i .

Уравнения регрессии для консистенции и пластичности, рассчитанные по данным табл. 1, имеют вид

$$I_L = 2.965k_n - 0.850, \quad I_p = 0.742k_n - 0.186. \quad (4)$$

Линии регрессии (4), а также доверительные интервалы для среднеожидаемых значений I_L и I_p показаны на рис. 3.

Прогноз прочностных характеристик пород в данном случае целесообразно вести путем усреднения значений C и φ в пределах доверительных интервалов, вычисленных по формуле (3). Для прогноза использованы данные электротомографических измерений, выполненных в августе 2013 г. в районе ограждающей перемычки с помощью аппаратуры СКАЛА-48 по профилям x_1 и x_2 , расположенным вдоль оси перемычки (см. рис. 2). Геоэлектрические разрезы, полученные в результате электротомографических измерений и их обработки, приведены на рис. 4.

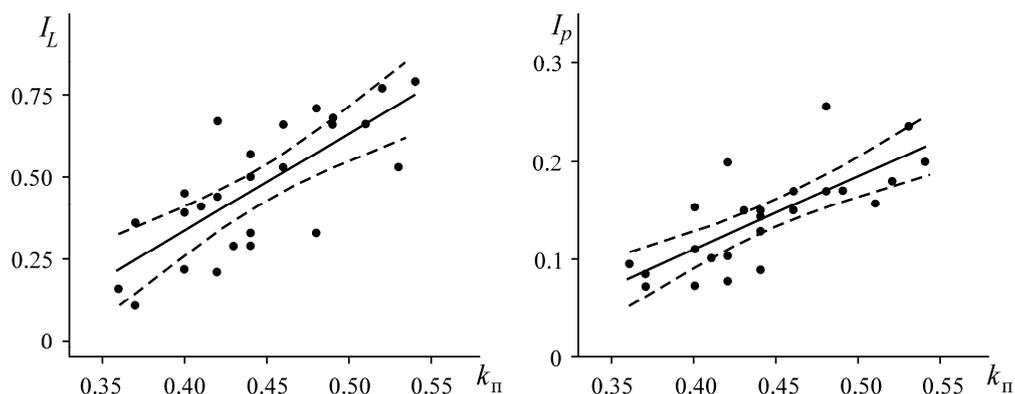


Рис. 3. Линии регрессии, построенные по данным инженерно-геологических изысканий, с указанием доверительного интервала для среднеожидаемых значений параметров

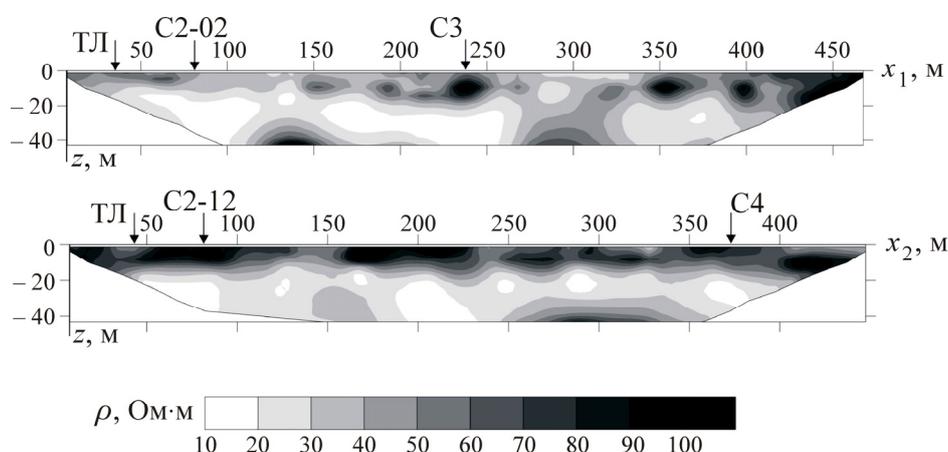


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, полученные по профилям x_1 и x_2 : ТЛ — тальвег лога; C2-02, C2-12 — существующие геологические скважины; C3, C4 — рекомендуемые места бурения скважин

На них выделяются верхний слой насыпных пород с повышенным УЭС ($\rho = 50 - 100$ Ом·м) и слой намывных пород с относительно низким УЭС ($\rho = 10 - 50$ Ом·м). На основе полученных распределений истинного сопротивления по профилям x_1 и x_2 определены среднегеометрические по глубине значения УЭС в пределах слоя намывных пород, что позволило рассчитать изменение усредненного значения УЭС по профилям. Далее в соответствии с разработанной методикой по формуле (2) рассчитано изменение среднего значения пористости по исследуемым профилям. В качестве опорной использована скважина C2-12, расположенная на профиле x_1 на расстоянии 20 м от тальвега лога (рис. 5б).

С учетом регрессионных зависимостей (4) определено изменение среднеожидаемых значений I_L и I_p по исследуемым профилям. Прогнозные значения физико-механических свойств слоя намывного массива по геофизическим профилям x_1 и x_2 представлены на рис. 5. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что слой намывных пород, расположенный под ограждающей перемычкой, неоднороден по своим физико-механическим свойствам, что связано как с неравномерностью нагрузки, оказываемой автоотвалом “Северный”, так и с изменением мощности намывного слоя. Сочетание этих факторов приводит к перераспре-

делению части влаги в наименее напряженные зоны, что способствует формированию зон размером до 100 м с относительно низкими значениями прочностных характеристик пород. Выявленные водонасыщенные зоны могут оказать негативное влияние на устойчивость откосов, в основании которых залегает слой намывных пород.

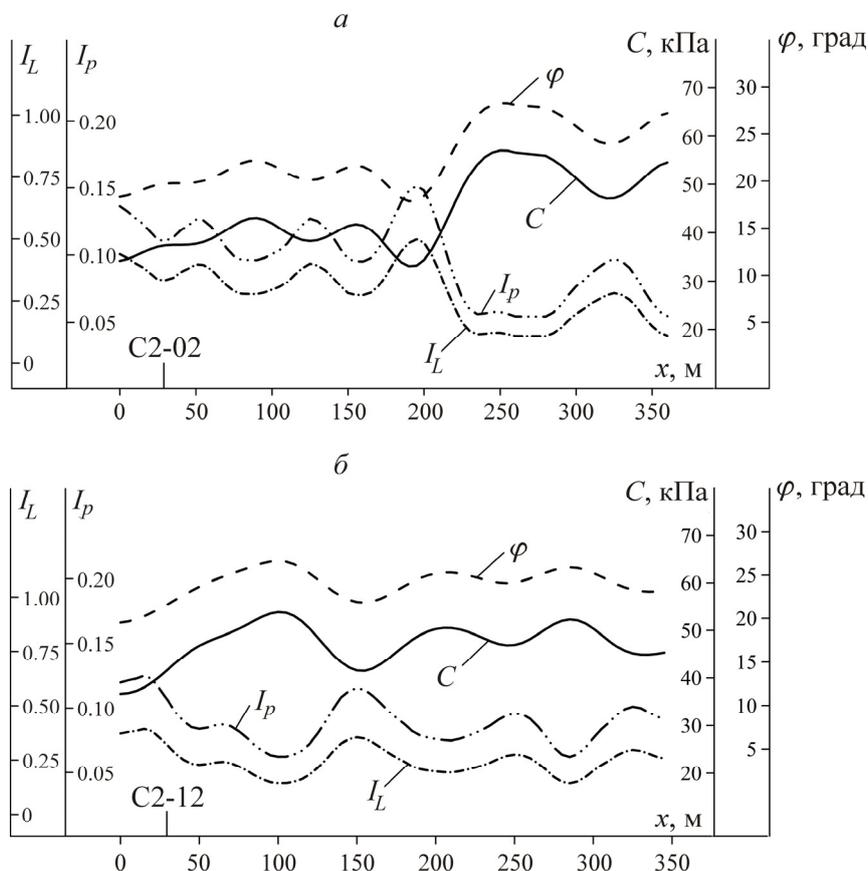


Рис. 5. Прогноз изменения усредненных физико-механических свойств слоя намывных грунтов по профилям x_1 (а) и x_2 (б)

Выполненный количественный прогноз изменения свойств намывного массива основан преимущественно на изысканиях 2004 г., дальнейший прогноз будет возможен после бурения скважин в пределах данных профилей с проведением полного комплекса исследований физико-механических свойств грунтов. Рекомендуемые места бурения скважин, определенные с учетом анализа данных геофизических измерений, приведены на рис. 3.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика прогноза физических свойств намывного массива включает построение геоэлектрического разреза по результатам измерений методом электротомографии, установление регрессионных зависимостей между комплексом физико-механических свойств грунтов, получение эмпирической взаимосвязи определяющего параметра с удельным электросопротивлением. Результатом геофизического прогноза являются графики изменения физических свойств массива по определяющим профилям, карты геолого-геофизического районирования (планы и разрезы), а также места заложения скважин для инженерно-геологических изысканий с целью последующего прогноза.

Важным параметром, обеспечивающим возможность прогноза основных физико-механических свойств (консистенция, сцепление, угол внутреннего трения) намывного массива, является пористость. Изменение пористости связано с изменением УЭС степенной зависимостью, включающей структурный параметр, который можно определить по экспериментальным данным обратным расчетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков Е. В., Простов С. М., Бахаева С. П. Исследование динамики развития фильтрационных коллекторов в теле ограждающей переемычки гидроотвала геоэлектрическим методом // Вестн. КузГТУ. — 2004. — № 3.
2. Смирнов Н. А., Простов С. М. Прогноз влагонасыщенности намывного массива электрофизическим методом // Вестн. КузГТУ. — 2011. — № 4.
3. Никулин Н. Ю. Георадиолокационный мониторинг при изучении свойств закрепленного массива // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 3.
4. Старовойтов А. В., Пятикова А. М., Шалаева Н. В., Калашников А. Ю. Выделение пустот методом георадиолокации // Инж. изыскания. — 2013. — № 13.
5. Старовойтов А. В., Романова А. М., Калашников А. Ю. Возможности георадиолокации при изучении ослабленных зон в верхней части разреза // Инж. изыскания. — 2012. — № 4.
6. Рассказов И. Ю., Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г. Развитие метода электрической томографии при исследовании месторождений со сложными горно-геологическими условиями // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
7. Рассказов, И. Ю., Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г. Исследование оползневых откосов угольных разрезов методом электрической томографии // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
8. Чаповский Е. Г. Инженерная геология. Основы инженерно-геологического изучения горных пород. — М.: Высш. шк., 1975.
9. Гальперин А. М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. — М.: Недра, 1988.
10. Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов: учебник для вузов — М.: Изд-во МГГУ. Горная книга, 2008.
11. Электроразведка методом сопротивлений / под ред. В. К. Хмелевского и В. А. Шевнина. — М.: Изд-во МГУ, 1994.
12. Простов С. М., Хмяляйнен В. А., Гуцал М. В., Бахаева С. П. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005.
13. Простов С. М., Костюков Е. В., Бахаева С. П. Прогноз устойчивости грунтовых дамб. — Кемерово; Москва: Изд. объединение “Российские университеты”: Кузбассвузиздат-АСТШ, 2006.
14. Простов, С. М., Хмяляйнен В. А., Бахаева С. П. Взаимосвязи электрофизических свойств глинистых горных пород с их пористостью и влагонасыщенностью // ФТПРПИ. — 2006. — № 4.
15. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / под ред. акад. Е. М. Сергеева. — М.: Недра, 1986.

Поступила в редакцию 10/IX 2014