УДК 622.271.333:550.837 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-36-47

Прогноз устойчивости прибортового массива в глинистых грунтах четвертичных отложений с учетом влияния фильтрационных коллекторов на примере Бачатского угольного разреза

Караблин М. М.[1]*, Сирота Д. Ю.[2], Простов С. М.[2]

[1] Кузбасский головной институт по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий «Кузбассгипрошахт», г. Кемерово, Россия

[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

e-mail: karablin.mm@gmail.com

Реферат

Введение. *При открытой геотехнологии формирование горных выработок в глинистых грунтах четвертичных отложений нередко сопровождается нарушением устойчивости. Как правило, причиной развития геомеханических процессов является несоответствие принятых геометрических параметров физико-механическим характеристикам грунтов. При тесной взаимосвязи прочностных характеристик с влажностью в условиях отсутствия источников насыщения водой откосы в течение длительных периодов сохраняют устойчивость, однако при водонасыщении грунты переходят в пластичную или текучую консистенцию и снижают прочностные свойства. В инженерной практике для предотвращения опасных геомеханических процессов применяют электорофизические методы контроля, которые позволяют за счет электрической контрастности построить границы аномальных по влажности зон. В случаях, когда по данным бурения или вертикального электрического зондирования известна глубина залегания и мощность водонасыщенного слоя, электрическое профилирование позволяет оперативно установить изменчивость данных характеристик аномалии. Авторами статьи предложен алгоритм определения изменчивости мощности рыхлого водонасыщенного слоя от координаты точки электропрофилирования.*

Цель работы *– прогноз устойчивости прибортового массива в глинистых грунтах четвертичных отложений с учетом влияния фильтрационных коллекторов за счет комплексирования баз данных инженерно-геологического изучения и результатов интерпретации геофизических измерений на основе объемной геолого-геофизической модели.*

Методология *предусматривает анализ баз данных инженерно-геологического изучения и результатов интерпретации геофизических измерений.*

Результаты. *По результатам выполненных работ построена объемная геолого-геофизическая модель прибортового массива с границами водонасыщенного слоя для прогноза устойчивости фактического положения прибортового массива. По результатам прогноза устойчивости установлено следующее: на расчетных сечениях O_3y_3–O_5y_5 после деформирования удерживающие силы значительно превышают сдвигающие (коэффициент устойчивости), что обусловлено увеличением веса призмы упора за счет оползневых масс; потенциально оползнеопасный участок приурочен к расчетному сечению O_1y_1, что объясняется плавным снижением коэффициента устойчивости с 1,38 (сечение O_3y_2) до 1,06, близкого к предельному.*

Выводы. *Для детализации изменений физико-механических свойств прибортовых массивов разрезов целесообразно использовать метод электроразведки (электрозондирования и профилирования) с выделением водонасыщенных зон по локальным отрицательным аномалиям эффективного удельного электросопротивления и определением функции изменения мощности рыхлых четвертичных отложений путем инверсии графиков электропрофилирований с использованием методов наименьших квадратов и золотого сечения. При значительной протяженности оползнеопасных участков изменение расчетных значений коэффициентов устойчивости, определенных на основе объемных геолого-геофизических моделей, может иметь*

немонотонный характер с несколькими экстремальными значениями и значительными градиентами, поэтому целесообразно выполнять автоматизированный расчет с циклической детализацией наиболее опасных участков по координате профиля и направлению расчетного сечения в плане.

Ключевые слова: *вертикальное электрическое зондирование; электрическое профилирование; прибортовой массив; фильтрационный коллектор; объемная геолого-геофизическая модель; коэффициент устойчивости.*

Введение. При открытой геотехнологии формирование горных выработок в глинистых грунтах четвертичных отложений нередко сопровождается нарушением устойчивости. Как правило, причиной развития геомеханических процессов является несоответствие принятых геометрических параметров физико-механическим характеристикам грунтов. При тесной взаимосвязи прочностных характеристик с влажностью в условиях отсутствия источников насыщения водой откосы в течение длительных периодов сохраняют устойчивость, однако при водонасыщении грунты переходят в пластичную или текучую форму и снижают прочностные свойства [1, 2].

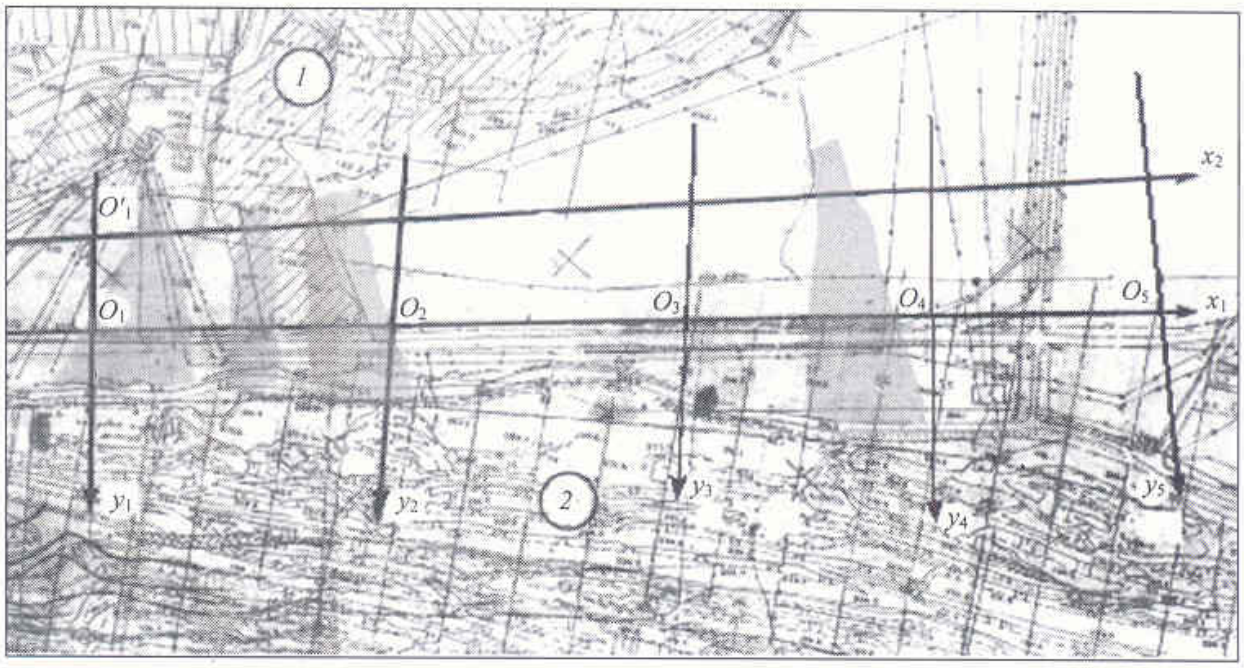

Рис. 1. План опытного участка с расположением водонасыщенных зон:
1 – гидроотвал «Сагарлыкский»; *2* – восточный борт разреза
Fig. 1. The plan of the experimental site with the location of water-saturated zones
1 – Sagarlyksky hydraulic waste disposal; *2* – open pit's eastern wall

В инженерной практике для предотвращения опасных геомеханических процессов применяют электорофизические методы контроля, которые позволяют за счет электрической контрастности построить границы аномальных по влажности зон [3–11]. В случаях, когда по данным бурения или вертикального электрического зондирования известна глубина залегания и мощность водонасыщенного слоя, электрическое профилирование позволяет оперативно установить изменчивость данных характеристик аномалии. Авторами статьи предложен алгоритм определения изменчивости мощности рыхлого водонасыщенного слоя h от координаты точки электропрофилирования x.

Целью работы является прогноз устойчивости прибортового массива в глинистых грунтах четвертичных отложений с учетом влияния фильтрационных кол-

лекторов за счет комплексирования баз данных инженерно-геологического изучения и результатов интерпретации геофизических измерений на основе объемной геолого-геофизической модели [12].

Методика проведения исследований. Рассмотрим электрическое поле, измеренное с помощью симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже, для которой выполняется соотношение $r_{MN} \le (1/3) r_{AB}$ между питающими AB и измерительными электродами MN и разности потенциалов Δu между электродами MN измерены в однородном изотропном полупространстве:

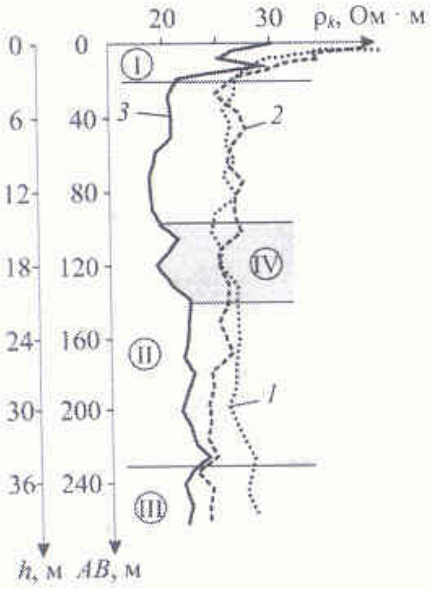

Рис. 2. График ВЭЗ № 1:
I – почвенный слой; II – слой четвертичных отложений; III – коренные породы; IV – фильтрационный коллектор; 1–3 – порядковый номер серии измерений

Fig. 2. Plot of the VEZ no. 1:
I – soil layer; II – a layer of Quaternary deposits; III – bedrock; IV – filtration reservoir; 1–3 – measurement series number

$$\Delta u = \frac{I \rho_k(r,z)}{2\pi} k_y, \qquad (1)$$

где $k_y = \frac{r_{MN}}{r_{AM} r_{AN}} + \frac{r_{MN}}{r_{BM} r_{BN}}$ – коэффициент установки, $\rho_k(r, z)$ – эффективное удельное электросопротивление (УЭС), Ом · м; I – ток источника, А; r – расстояние от источника тока до точки измерения потенциала, м; z – вертикальная координата точки измерения потенциала, м.

Так как установка симметричная, то $r_{AM} = r_{BN}$ и $r_{AN} = r_{BM}$, а значит ее коэффициент $k_y = \frac{2 r_{MN}}{r_{AM} r_{AN}} \approx \frac{2 r_{MN}}{r^2}$, где r – расстояние от источника тока до середины отрезка MN.

Деля обе части равенства (1) на $r_{MN} << 1$, получим выражение

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{I \rho_k(r,z)}{\pi r^2}.$$

Таким образом, эффективное УЭС может быть выражено через производную от потенциала электрического поля по формуле

$$\rho_k(r,z) = \frac{\pi r^2}{I} \frac{\partial u}{\partial r}. \qquad (2)$$

Рассмотрим модельную задачу (2), в которой дана трехслойная однородная изотропная в пределах каждого слоя среда с плоскопараллельными границами и удельными электросопротивлениями (УЭС) ρ_0, ρ_1, ρ_2, причем УЭС верхнего слоя (воздуха) $\rho_0 \to \infty$. На границе верхнего и промежуточного слоев (поверхность земли) располагается точечный источник тока (два близкорасположенных заземленных электрода).

Пространственное распределение потенциала $u = u(r, z)$ стационарного электрического тока такого источника удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрической системе координат вида

$$\frac{\partial^2 u(r,z)}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial^2 u(x,z)}{\partial z^2}=0$$

при следующих граничных условиях

$$u_1\big|_{R\to 0}\to\frac{I\rho_1}{2\pi R};\qquad u_1\big|_{z=h}=u_2\big|_{z=h};\qquad \left.\frac{\partial u_1}{\partial z}\right|_{z=h}=\frac{\rho_1}{\rho_2}\left.\frac{\partial u_2}{\partial z}\right|_{z=h};$$

$$u_2\big|_{R\to\infty}\to 0;\qquad \left.\frac{\partial u_1}{\partial z}\right|_{z=0}=0,$$

где R – расстояние от источника тока до точки измерения потенциала в трехмерном пространстве, м; ρ_1, ρ_2 – УЭС слоев, Ом · м; h – мощность рыхлого водонасыщенного слоя, м.

На поверхности земли при $z = 0$ потенциал поля может быть вычислен по формуле

$$u(r)=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2\int_0^\infty\frac{J_0(mr)K\exp(-2mh)}{1-K\exp(-2mh)}dm\right],$$

где $K=\dfrac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}$ – коэффициент «отражения» тока на нижней границе слоев; $J_0(mr)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Раскладывая дробь $\dfrac{K\exp(-2mh)}{1-K\exp(-2mh)}$ в ряд Тейлора по степеням $\exp(-2mh)$ и применяя формулу Вебера, получим формулу

$$u(r)=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K^n}{\sqrt{(r^2+(2nh)^2)}}\right]. \tag{3}$$

Вычисляя производную $\dfrac{\partial u}{\partial r}$, получим выражение

$$\frac{\partial u(r)}{\partial r}=\frac{I\rho_1}{2\pi r^2}\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K^n r^3}{(r^2+(2nh)^2)^{1,5}}\right].$$

Тогда теоретическое значение эффективного УЭС из (2) будет определяться по формуле

$$\rho_k(r)=\rho_1\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K^n r^3}{(r^2+(2nh)^2)^{1,5}}\right]. \tag{4}$$

Используемый в (4) степенной ряд сходится на всем интервале $-1\le K\le 1$. Однако из-за физического смысла коэффициента K граничные значения $K=\pm 1$

недостижимы. Чем ближе значение K к границам интервала сходимости, тем скорость сходимости ряда меньше: при $K = 1$ более 100, а при $K = -1$ – 50 слагаемых.

В качестве альтернативы разложению в ряд предложено аппроксимировать выражение $\frac{K\exp(-2mh)}{1-K\exp(-2mh)}$ полиномом, степень которого определяется подбором. После проделанной процедуры аппроксимации и применения формулы Вебера получим формально практически такое же выражение, что и (3), а вычисляя производную, найдем выражение, аналогичное (4), для теоретического значения кажущегося УЭС:

$$\rho_k(r) = \rho_1\left[1+\sum_{n=1}^{N}\frac{p(n)r^3}{(r^2+(2nh)^2)^{1,5}}\right], \qquad (5)$$

где $p(n)$ – коэффициенты полинома-аппроксиманта, полученные с помощью метода наименьших квадратов.

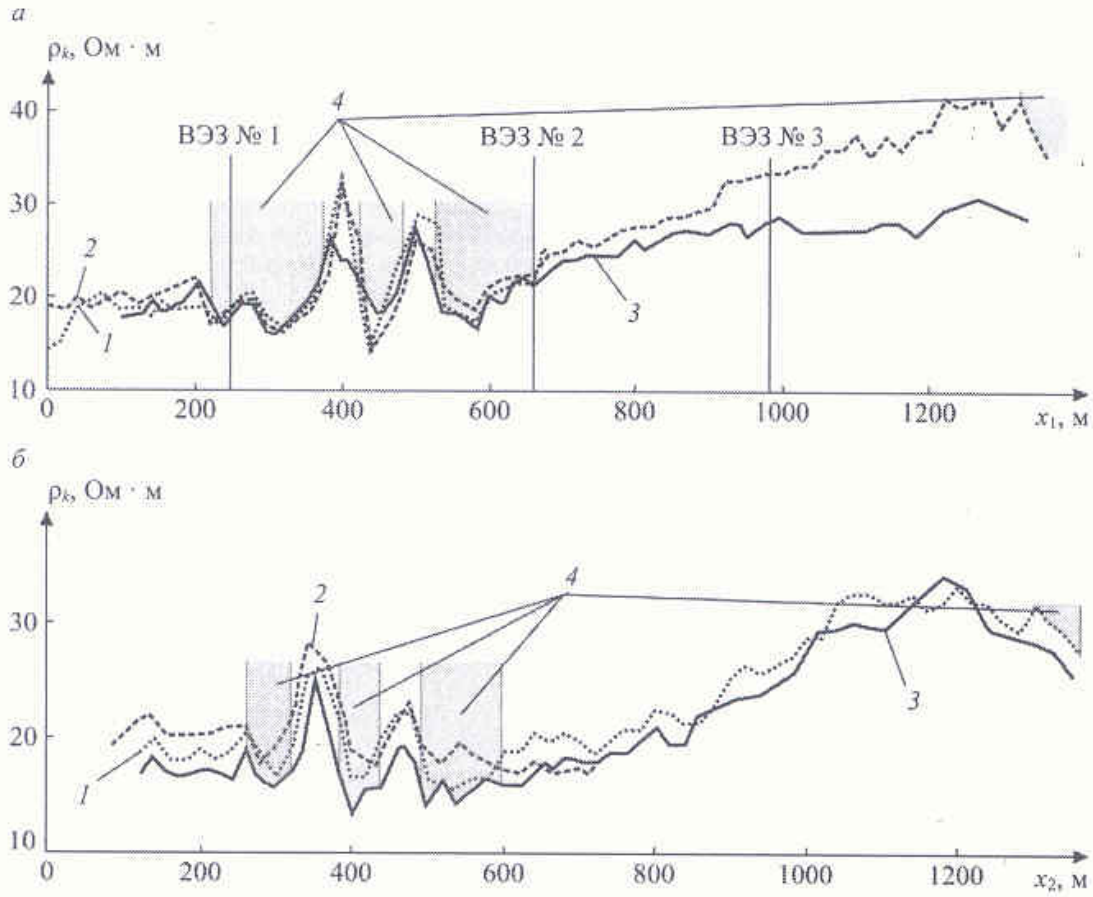

Рис. 3. Графики эффективного удельного электросопротивления по осям O_1x_1 – *а* и O_2x_2 – *б*:
1–3 – порядковый номер серии измерений; *4* – фильтрационные коллекторы
Fig. 3. Plots of effective electrical resistivity in sections O_1x_1 – *a* and O_2x_2 – *б*:
1–3 – measurement series number; *4* – filtration reservoirs

Выражение (5) можно рассматривать как уравнение относительно одного или двух неизвестных: мощности водонасыщенного слоя h и коэффициента отражения K. Решение составленных уравнений во всех случаях возможно с использованием метода наименьших квадратов.

Результаты. Исследуемый прибортовой массив Бачатского угольного разреза расположен на западном борту между выработанным пространством и отвалом сухой вскрыши, отсыпанным на намывные отложения гидроотвала «Сагарлыкский».

Размеры опытного участка составили (рис. 1): длина (вдоль бровки борта) – 2000–2200 м, ширина – 300–500 м. Рельеф поверхности – равнинный, на интервале $x_1 = O_1O_2$ = 0–500 м имеются навалы вскрышных пород высотой до 5–6 м. По контуру отвала расположен водоотводной канал шириной 1,5–2 м и глубиной 1–2 м.

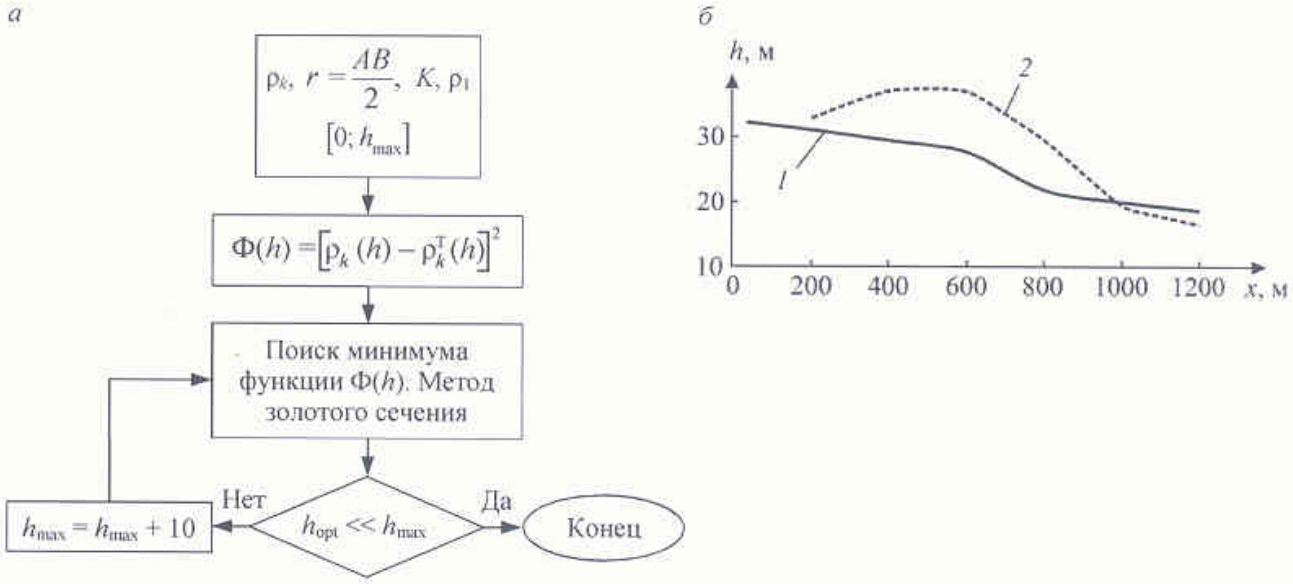

Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения мощности слоя водонасыщенного грунта h по измерениям электрического поля на поверхности земли – *а* и расчетные графики изменения мощности рыхлых четвертичных отложений – *б* для электрофизических профилей: *1* – O_1x_1; *2* – O_2x_2

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for determining the thickness h of a water-saturated stratum – *a* and design charts of loose Quaternary deposits thickness variation – *б* for electrophysical sections: *1* – O_1x_1 and *2* – O_2x_2

В борту четвертичных отложений неоднократно фиксировались геомеханические процессы с высачиванием воды на откос на глубине 13–17 м от земной поверхности. Обрушение уступов происходит с образованием трещины отрыва высотой до 3–6 м, в нижней части оползневые массы выполаживаются до 20°–30°. Анализ планов горных работ показывает, что с течением времени интенсивность развития оползневых процессов увеличивается. Отдельные участки деформаций объединяются в единый фронт в течение более 10 лет. Для мониторинга гидрогеомеханического состояния прибортового массива выполнены электрофизические исследования: вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) – 5 поперечных профилей O_1y_1, O_2y_2, O_3y_3, O_4y_4, O_5y_5 с максимальным разносом AB = 260 м (150 точек); электрические профилирования (ЭП) – 2 продольных профиля O_1x_1, O'_1x_2 суммарной длиной 2400 м (120 точек).

При интерпретации электрофизических исследований на интервалах монотонного изменения эффективного удельного электросопротивления (УЭС) ρ_k были учтены следующие особенности строения изучаемого массива: поскольку глинистые породы имеют высокую пористость и влажность, геоэлектрический разрез на основной части профиля следует принять двухслойным при соотношении удельных электросопротивлений (УЭС) слоев $\rho_1 < \rho_2$; зоны водонасыщения имеют ограниченные размеры в плане и по глубине и должны рассматриваться как локальные аномальные зоны с соотношением УЭС $\rho_2 < \rho_1$.

Сопоставление разносов линий питающих электродов AB, соответствующих границам слоев, с данными геологических разрезов позволило установить глубину зондирования $h = 0{,}15AB$.

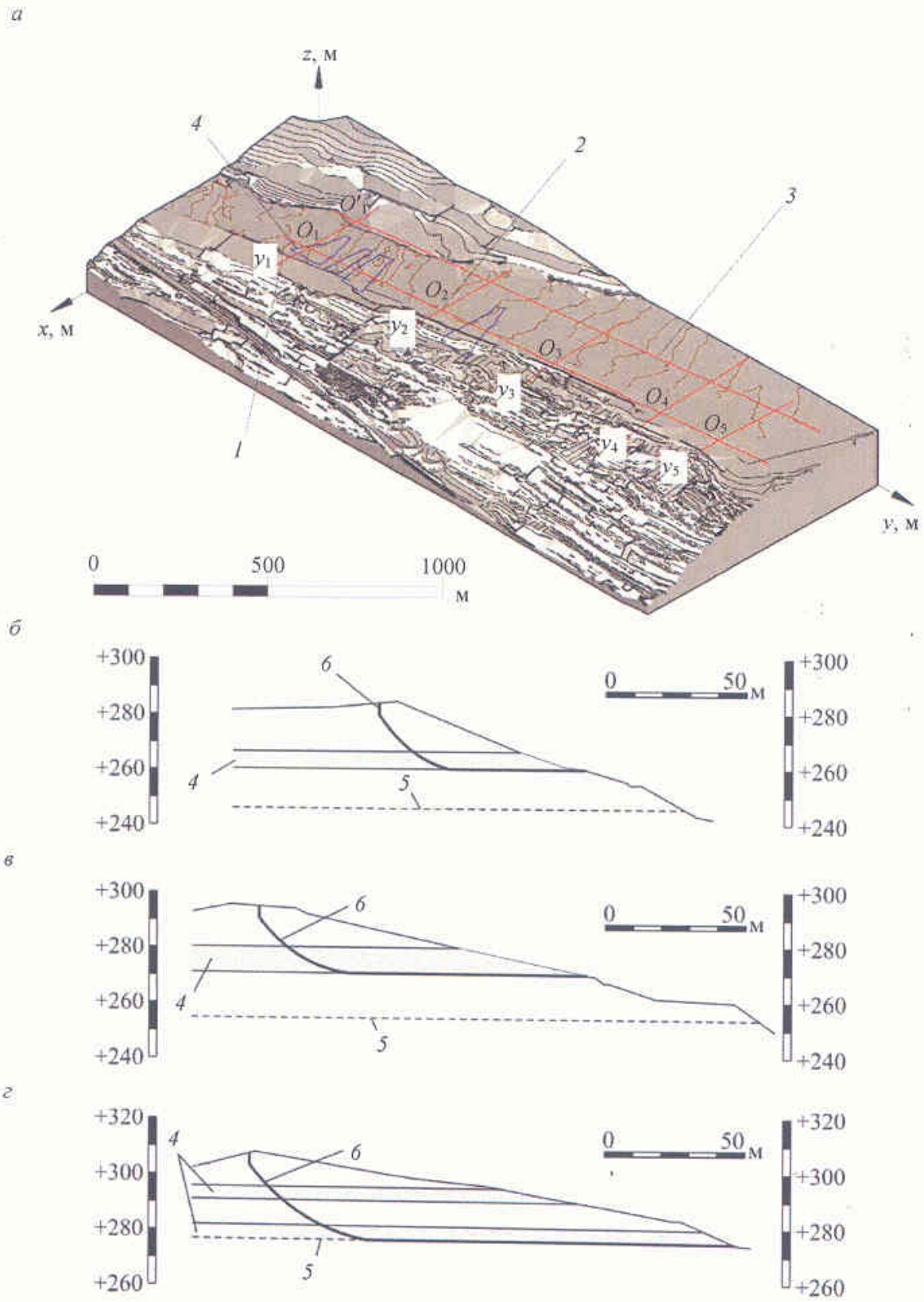

Рис. 5. Объемная геолого-геофизическая модель прибортового массива – *а* и геофизические профили O_1y_1 – *б*, O_2y_2 – *в*, O_4y_4 – *г*:
1 – поперечный геофизический профиль; *2* – точка ВЭЗ; *3* – продольный геофизический профиль; *4* – фильтрационный коллектор; *5* – кровля коренных пород; *6* – наиболее напряженная поверхность скольжения

Fig. 5. 3D geological-geophysical model of marginal rock – *a* and geophysical sections O_1y_1 – *б*, O_2y_2 – *в*, O_4y_4 – *г*:
1 – geophysical cross-section; *2* – vertical electric sounding point; *3* – longitudinal section; *4* – filtration reservoir; *5* – original rock superface; *6* – failure surface

Аномальные зоны, соответствующие водоносным коллекторам, имеют мощность 3–6 м и расположены на глубинах в интервале от $h = 10$ м до $h = 20$ м, причем вероятно разделение коллектора на отдельные русла по глубине. Эти зоны были сформированы вследствие водонасыщения грунтового основания и инфильтрации воды из водоотводящего канала, протекающего по контуру Сагарлыкского гидроотвала.

Анализ графиков ρ_k (AB, h), представленных на рис. 2, показал следующее: практически все графики имеют вид, характерный для трехслойной среды типа H с относительно проводящим подповерхностным слоем ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$); геоэлектрический разрез включает подповерхностный слой мощностью 2–5 м, эффективное УЭС которого в сильной мере зависит от водонасыщения атмосферной влагой; средний относительно проводящий слой рыхлых песчано-глинистых отложений, насыщаемых влагой образующихся фильтрационных коллекторов; нижнее относительно малопроводящее полупространство из плотных твердых коренных пород.

Таблица 1. Физико-механические характеристики пород четвертичных отложений и показатели сопротивления сдвигу по контакту пород

Table 1. Physical-mechanical characteristics of the rocks of the Quaternary deposits and indicators of contact shear force

Порода	φ, град	*C*, кПа	ρ, кН/м³
Грунты четвертичных отложений при естественной влажности	18	39,2	18,6
Грунты четвертичных отложений водонасыщенного слоя	6	24,5	19,4
Контакт *четвертичные отложения–коренные породы*	10	29,4	–

φ – угол внутреннего трения; *C* – сцепление; ρ – плотность.

Поскольку расположение средней части водонасыщенной зоны на всех графиках соответствует интервалу $AB = 100$–140 м, база электропрофилирования (ЭП) была принята $AB = 120$ м.

Анализ графиков электропрофилирования ρ_k (x_1) и ρ_k (x_2), представленных на рис. 3, показал следующее: на интервалах $x_1 = 600$–1200 м и $x_2 = 600$–1050 м имеет место монотонное увеличение величины ρ_k, отражающее монотонное уменьшение мощности h слоя рыхлых четвертичных отложений; на интервалах $x_1 = 220$–660 м и $x_2 = 260$–600 м наблюдаются знакопеременные аномалии, интерпретируемые как зоны насыпных водонасыщенных грунтов, формирующие фильтрационный коллектор; на интервалах $x_1 > 1250$ м и $x_2 > 1180$ м отмечено понижение уровня ρ_k, которое интерпретируется как левая граница водонасыщенной зоны, формирующей второй фильтрационный коллектор.

Для построения объемной геологической модели массива по результатам электропрофилирования разработана методика определения изменения мощности рыхлого слоя от координаты профиля $h(x)$ с использованием метода золотого сечения (вариант метода статистических испытаний), основанного на том, что измеренные значения ρ_k заменяют вычисленными по формуле (5) с добавлением случайной погрешности:

$$\rho_k^{\Pi}(r) = \rho_k(r)\Delta;$$

где $\Delta = 1 + \alpha(2rand - 1)$, $rand \in [0 \ldots 1]$ – случайное равномерно распределенное число, $\alpha = 0{,}125$ – коэффициент погрешности.

Для решения задачи сформируем целевую функцию как квадрат разности отклонений теоретических $\rho_k^{\text{Т}}(h)$, вычисленных по формуле (5), и экспериментальных $\rho_k^{\text{П}}(h)$:

$$\Phi(h) = \left[\rho_k^{\text{Т}}(h) - \rho_k^{\text{П}}(h)\right]^2. \quad (6)$$

Целевая функция $\Phi(h)$ также является унимодальной. Так как правая граница истинного интервала изменения глубины неизвестна, то можно использовать метод золотого сечения, постепенно увеличивая правую границу интервала поиска. Для определения всех значений функции мощности $h = h(x)$ необходимо найти минимум функции (6) для каждой точки измерения. Блок-схема алгоритма определения мощности слоя водонасыщенного грунта h представлена на рис. 4, *а*, расчетные графики изменения мощности рыхлых четвертичных отложений – на рис. 4, *б*.

Таблица 2. Результаты прогноза устойчивости прибортового массива
Table 2. The results of pit marginal rock mass stability analysis

Профиль	$z_{\text{в}}$, м	$z_{\text{н}}$, м	h, м	α, град	n
O_1y_1	284,3	259,9	24,4	20	1,06
O_2y_2	293,1	269,1	24,0	13	1,38
O_3y_3	287,4	260,0	27,4	14	1,91
O_4y_4	307,9	274,6	33,3	11	1,54
O_5y_5	302,0	273,5	28,5	12	1,97

$z_{\text{в}}$ / $z_{\text{н}}$ – отметки верхней и нижней бровок призмы возможного обрушения; h – высота призмы возможного обрушения; α – результирующий угол; n – коэффициент устойчивости.

Обсуждение и анализ. По результатам выполненных работ построена объемная геолого-геофизическая модель прибортового массива с границами водонасыщенного слоя для прогноза устойчивости фактического положения прибортового массива. Расчетные физико-механические характеристики пород четвертичных отложений и естественных поверхностей ослабления заданы на основании обобщения результатов специальных исследований и метода обратных расчетов (табл. 1). Прогноз устойчивости выполнен методом векторного сложения сил.

Объемная геолого-геофизическая модель, расчетные сечения и результаты прогноза устойчивости представлены в табл. 2 и на рис. 5.

По результатам прогноза устойчивости установлено следующее: на расчетных сечениях O_3y_3–O_5y_5 после деформирования удерживающие силы значительно превышают сдвигающие (коэффициент устойчивости), что обусловлено увеличением веса призмы упора за счет оползневых масс; потенциально оползнеопасный участок приурочен к расчетному сечению O_1y_1, что объясняется плавным снижением коэффициента устойчивости с 1,38 (сечение O_2y_2) до 1,06, близкого к предельному.

Выводы. Для детализации изменений физико-механических свойств прибортовых массивов разрезов целесообразно использовать метод электроразведки (электрозондирования и профилирования) с выделением водонасыщенных зон по локальным отрицательным аномалиям эффективного УЭС и определением функции изменения мощности рыхлых четвертичных отложений путем инверсии графиков электропрофилирований с использованием методов наименьших квадратов и золотого сечения.

При значительной протяженности оползнеопасных участков изменение расчетных значений коэффициентов устойчивости, определенных на основе объемных геолого-геофизических моделей, может иметь немонотонный характер с несколькими экстремальными значениями и значительными градиентами, поэтому целесообразно выполнять автоматизированный расчет с циклической детализацией наиболее опасных участков по координате профиля и направлению расчетного сечения в плане.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prostov S. M., Khyamyalyainen V. A., Bakhaeva S. P. Interrelation among electrophysical properties of clay rocks, their porosity and moisture saturation // Journal of Mining Science. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 349–359.

2. Давыдов В. А., Щапов В. А., Цай Г. А. Изучение опасных природных и техногенных геологических процессов с помощью геофизических методов // Известия УГГУ. 2018. Вып. 2(50). С. 65–71.

3. Prostov S. M., Bakhaeva S. P., Smirnov N. A. Prediction of physico-mechanical properties of hydraulic fill based on electrical sounding // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 55–62.

4. Jongmans D., Garambois S. Geophysical investigation of landslides: a review // Bulletin de la Societe Geologique de France. 2007. No. 2. P. 101–112.

5. Susilo A., Suryo E. A., Sutasoma M. Preliminary study of landslide in Sri Mulyo, Malang, Indonesia using resistivity method and drilling core data // International Journal of GEOMATE. 2018. Vol. 15. Issue 48. P. 161–168.

6. Pilecki Z. Basic principles for the identification of landslides using geophysical methods // E3S Web of Conferences. 2017. No. 24. P. 1–8.

7. Keskinsezer A., Deg E. Investigating of soil features and landslide risk in Western-Atakent (İstanbul) using resistivity, MASW, Microtremor and boreholes methods // Open Geosci. 2019. No. 11. P. 1112–1128.

8. Гавеиш В. Р. Поиски подземных вод в оазисе Эль-Бахария в Западной пустыне Египта по результатам интерпретации данных каротажа и кривых ВЭЗ // Известия УГГУ. 2019. Вып. 4(56). С. 25–32.

9. Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н., Шапаренко И. О., Бабушкин С. М. Применение методов электроразведки с контролируемыми источниками для выявления причин развития суффозионно-просадочных процессов // Известия Томского политехнического университета. 2019. Т. 330. № 4. С. 26–40.

10. Susilo A., Sunaryo S., Rachmawati T. A. Analysis of landslide area of Tulung subdistrict, Ponorogo, Indonesia in 2017 using resistivity method // Emerland Insight. 2020.

11. Domej G., Aslanov U., Ishuk A. Geophysical investigations on the contribution of irrigation channels to landslide activity in Tusion, Tajikistan // Journal of Himalayan Earth Sciences. 2019. Vol. 52. No. 2. P. 161–177.

12. Караблин М. М., Простов С. М. Прогноз устойчивости прибортового массива оползня «Центральный» угольного разреза «Ангренский» на основе объемной геолого-геофизической модели // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 3. С. 39–49.

Поступила в редакцию 11 февраля 2021 года

Сведения об авторах:

Караблин Михаил Михайлович – руководитель группы геомеханических работ Кузбасского головного института по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий «Кузбассгипрошахт». E-mail: karablin.mm@gmail.com

Сирота Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и геотехнической механики Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: dmsirota@yandex.ru

Простов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: psm.kem@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-36-47

Prediction of marginal rock mass stability in clays of Quaternary deposits including the effect of filtration reservoir by the example of the Bachat coal mine

Mikhail M. Karablin[1], Dmitrii Iu. Sirota[2], Sergei M. Prostov[2]

[1] Kuzbass Head Institute on Designing of Coal Mining and Coal Processing Enterprises KuzbassGhiproShakht, Kemerovo, Russia.

[2] Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract

Introduction. *During opencast mining, the development of mine workings in clays of Quaternary deposits is often accompanied by stability loss. As a rule, the reason for the development of geomechanical processes*

is the mismatch between the accepted geometry and physical-mechanical characteristics of soils. In case strength characteristics and moisture content are strongly related in the conditions of lacking water saturation sources, slopes remain stable for a long time. However, in the case of water saturation, soils change to plastic or liquid consistency, and the strength properties are reduced. In engineering practice, to prevent hazardous geomechanical processes, electrophysical methods are applied that make it possible to build the boundaries of soil moisture anomalies through electrical contrast. In the instances when the water-saturated strata occurrence depth and thickness is known from drilling and vertical electrical sounding data, electrical profiling makes it possible to promptly determine the variability of these characteristics of the anomaly. The authors proposed an algorithm of water-saturated strata thickness variability determination from the point of electrical profiling.

***Research aim** is to predict the stability of the marginal rock mass in clays of Quaternary deposits, taking into account the effect of filtration reservoirs by combining engineering-geological databases and geophysical measurement results based on the 3D geological-geophysical model.*

***Methodology** includes the analysis of the engineering-geological databases and geophysical measurement results.*

***Results.** A 3D geological-geophysical model of the marginal rock mass with the boundaries of the water-saturated stratum was built from the results of the research to predict the stability of the marginal rock mass's actual position. Slope stability analysis established the following: at design sections O_3y_3–O_5y_5 after deformation, retaining forces exceed shearing forces significantly (safety factor) because the weight of the base wedge grows due to landslide masses; potential landslide hazard area is associated with the design section O_1y_1, which is due to smooth fall of the stability factor from 1.38 (section O_2y_2) to 1.06, close to ultimate.*

***Conclusions.** For the extension of the marginal rock physical-mechanical properties variation it is appropriate to apply the method of electrical prospecting (sounding and profiling) determining water-saturated areas by local negative anomalies of effective electrical resistivity and establishing the function of loose Quaternary deposits thickness variation by the inversion of electrical profiling graphs with the use of the least square procedure and the golden section method. If landslide hazard areas are vast, the variation of the stability factor design values, which were determined based on 3D geological-geophysical models, may possess the non-monotonic character with several extreme values and significant gradients. For that reason, it is appropriate to carry out computerized analysis with a cyclic extension of the most hazardous areas by the coordinate of the profile and the direction of the design section in a plan.*

***Keywords:** vertical electrical sounding; electrical profiling; marginal rock; filtration reservoir; 3D geological-geophysical model; safety factor.*

REFERENCES

1. Prostov S. M., Khyamyalyainen V. A., Bakhaeva S. P. Interrelation among electrophysical properties of clay rocks, their porosity and moisture saturation. *Journal of Mining Science*. 2006; 42(4): 349–359.

2. Davydov V. A., Shchapov V. A., Tsai G. A. Study of hazardous natural and man-made geological processes using geophysical methods. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2018; 2(50): 65–71. (In Russ.)

3. Prostov S. M., Bakhaeva S. P., Smirnov N. A. Prediction of physico-mechanical properties of hydraulic fill based on electrical sounding. *Journal of Mining Science*. 2015; 51(1): 55–62.

4. Jongmans D., Garambois S. Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin de la Societe Geologique de France*. 2007; 2: 101–112.

5. Susilo A., Suryo E. A., Sutasoma M. Preliminary study of landslide in Sri Mulyo, Malang, Indonesia using resistivity method and drilling core data. *International Journal of GEOMATE*. 2018; 15 (48): 161–168.

6. Pilecki Z. Basic principles for the identification of landslides using geophysical methods. *E3S Web of Conferences*. 2017; 24. P. 1–8.

7. Keskinsezer A., Deg E. Investigating of soil features and landslide risk in Western-Atakent (İstanbul) using resistivity, MASW, Microtremor and boreholes methods. *Open Geosci*. 2019; 11: 1112–1128.

8. Gaveish V. R. Groundwater searches in the Al-Bahariya oasis in the Western Desert of Egypt based on the interpretation of logging data and vertical electrical sounding (VES) curves. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2019; 4(56): 25–32. (In Russ.)

9. Shalaginov A. E., Nevedrova N. N., Shaparenko I. O., Babushkin S. M. Application of methods of electrical exploration with controlled sources for detecting causes of sub-pass-location processes development. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2019; 330(4): 26–40. (In Russ.)

10. Susilo A., Sunaryo S., Rachmawati T. A. Analysis of landslide area of Tulung subdistrict, Ponorogo, Indonesia in 2017 using resistivity method. *Emerland Insight*. 2020.

11. Domej G., Aslanov U., Ishuk A. Geophysical investigations on the contribution of irrigation channels to landslide activity in Tusion, Tajikistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*. 2019; 52(2): 161–177.

12. Karablin M. M., Prostov S. M. Angren coal pit centralny landslide slope stability analysis based on a three-dimensional geological-geophysical model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 3: 39–49.

Received 11 February 2021

Information about authors:

Mikhail M. Karablin – geomechanics team leader, Kuzbass Head Institute on Designing of Coal Mining and Coal Processing Enterprises KuzbassGhiproShakht. E-mail: karablin.mm@gmail.com
Dmitrii Iu. Sirota – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Theoretical and Geotechnical Mechanics, Kuzbass State Technical University. E-mail: dmsirota@yandex.ru
Sergei M. Prostov – DSc (Engineering), professor of the Department of Theoretical and Geotechnical Mechanics, Kuzbass State Technical University. E-mail: psm.kem@mail.ru

Для цитирования: Караблин М. М., Сирота Д. Ю., Простов С. М. Прогноз устойчивости прибортового массива в глинистых грунтах четвертичных отложений с учетом влияния фильтрационных коллекторов на примере Бачатского угольного разреза // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 36–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-36-47
For citation: Karablin M. M., Sirota D. Iu., Prostov S. M. Prediction of marginal rock mass stability in clays of Quaternary deposits including the effect of filtration reservoir by the example of the Bachat coal mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 36–47 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-36-47