УДК 622.271.333 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-39-49

Прогноз устойчивости прибортового массива оползня «Центральный» угольного разреза «Ангренский» на основе объемной геолого-геофизической модели

Караблин М. М.[1]*, Простов С. М.[2]

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

[2] Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия

e-mail: karablin.mm@gmail.com

Реферат

Введение. *В процессе отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом происходит изменение природного напряженного состояния прибортового массива, в результате чего возникают геомеханические процессы, которые приводят к деформациям карьерных откосов. Их предотвращение возможно за счет выявления оползнеопасных зон путем использования объемных геолого-геофизических моделей, основанных на базах данных геологоразведочных работ и геофизических зондирований прибортового массива.*

Цель работы. *Разработка и апробация основных положений методики прогноза устойчивости карьерных откосов на основе объемных геолого-геофизических моделей, которые включают в себя следующую информацию: результаты геофизических зондирований (границы влагонасыщенных зон); базы данных геологоразведочных скважин (физико-механические свойства грунтов зон влагонасыщения и естественной влажности, рельеф естественных поверхностей ослабления); проектное или фактическое положение горных выработок.*

Методология. *Для поиска наиболее опасного сечения в прибортовом массиве предложен алгоритм прогноза и выполнен анализ устойчивости прибортового массива на основе объемных геолого-геофизических моделей.*

Результаты. *В результате анализа баз данных геологической разведки, маркшейдерских инструментальных наблюдений за деформациями и электрических зондирований прилегающего прибортового массива построена объемная геолого-геофизическая модель оползня «Центральный». Методом обратных расчетов определены показатели сопротивления сдвигу в зонах влагонасыщения и естественной влажности. Выполнен прогноз устойчивости положений оползня «Центральный» на 2018 г. и после завершения первого этапа разгрузки головной части в 2025 г.*

Выводы. *Предложенный алгоритм прогноза устойчивости прибортовых массивов позволяет решить проблему поиска наиболее опасного сечения или оползнеопасного участка за счет компьютерной реализации. Это обеспечивается функцией поиска оползнеопасных зон, суть которой заключается в построении множества расчетных сечений на геолого-геофизической модели через заданные величины линейного и углового шага.*

Ключевые слова: *районирование прибортового массива; устойчивость борта разреза; геолого-геофизическая модель; геомеханические процессы; влагонасыщенные зоны; коэффициент устойчивости; предельное равновесие.*

Введение. В процессе отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом происходит изменение природного напряженного состояния прибортового массива, в результате чего возникают геомеханические процессы, которые приводят к деформациям карьерных откосов. Нередко геомеханическое обоснование параметров, обеспечивающих устойчивость карьерных откосов, выполняют на основе баз данных, включающих сведения о пространственно-геометрических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях залега-

ния полезных ископаемых и вмещающих их пород, полученных на стадии геологоразведочных работ. Анализ причин нарушения устойчивости карьерных откосов показывает, что развитие геомеханических процессов в большинстве случаев приурочено к зонам прибортового массива, имеющим аномальные

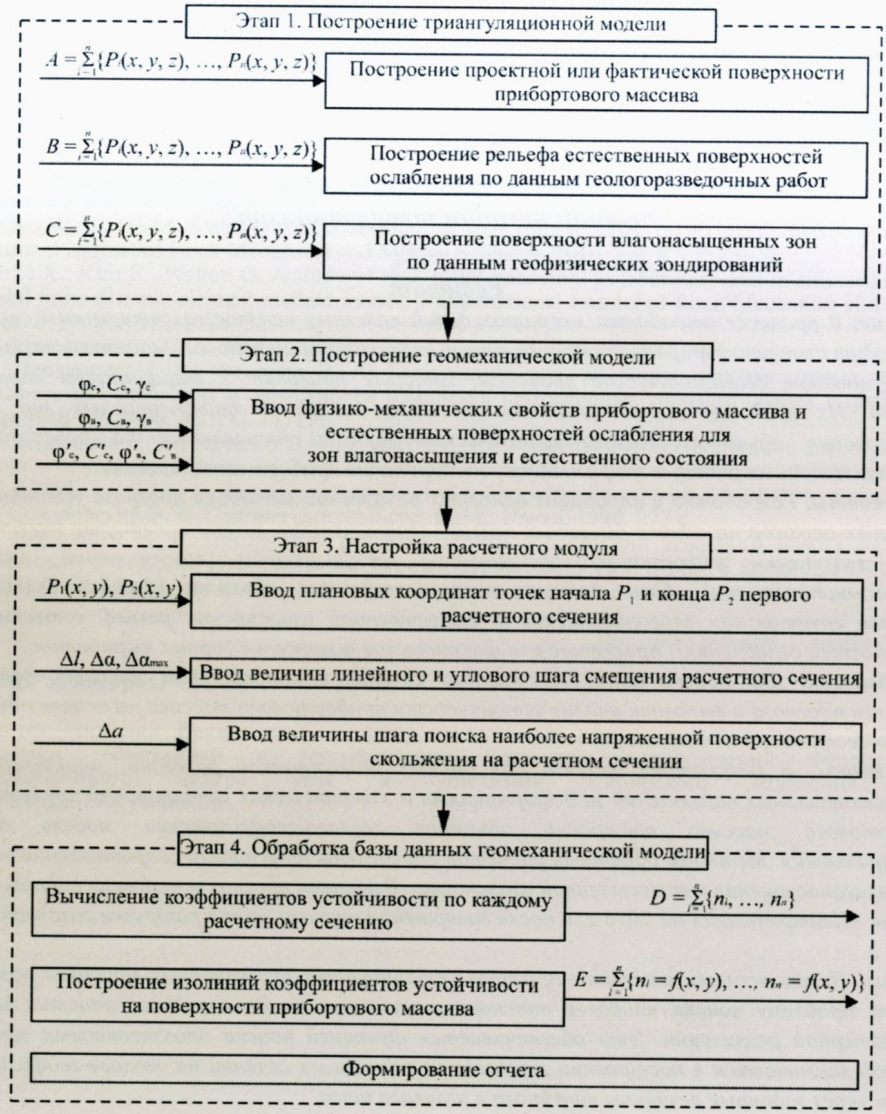

Рис. 1. Блок-схема алгоритма прогноза устойчивости карьерных откосов на основе объемных геолого-геофизических моделей
Fig. 1. Block diagram of the algorithm of slopes stability analysis with using three-dimensional geological-geophysical models

характеристики по плотности и влажности [1–10]. Отсутствие возможности своевременного выявления таких зон связано с особенностью построения разведочных сетей, которая заключается в интерполяции скважинных данных в межскважинном пространстве. В результате факторы, влияющие на возникновение геомеханических процессов, могут быть не выявлены или выявлены частично за счет недостаточной детализации. В настоящее время широкое распространение

в практике получили геофизические методы исследования состояния прибортовых массивов, основанные на взаимосвязи параметров состояния и свойств горных пород с параметрами разного рода физических полей [11–15]. Таким образом, актуально выявление оползнеопасных зон путем использования объемных геолого-геофизических моделей, основанных на базах данных геологоразведочных работ, дополненных результатами геофизических зондирований прибортового массива.

Целью работы является разработка и апробация основных положений методики прогноза устойчивости карьерных откосов на основе объемных геолого-геофизических моделей, которые включают в себя следующую информацию: результаты геофизических зондирований (границы влагонасыщенных зон); базы данных геологоразведочных скважин (физико-механические свойства грунтов зон влагонасыщения и естественной влажности, рельеф естественных поверхностей ослабления); проектное или фактическое положение горных выработок.

Методика проведения исследований. В результате анализа геомеханических процессов на рабочем борту разреза «Ангренский» выявлен наиболее масштабный действующий оползень «Центральный», снижающий безопасность и нарушающий технологический режим работы предприятия. Установлена хронология развития оползня, проанализированы базы данных геологической разведки, маркшейдерских инструментальных наблюдений за деформациями и электрических зондирований прилегающего прибортового массива. Построены геологические разрезы, поверхность скольжения оползня и границы влагонасыщенных зон. Для разработки инженерных мероприятий, направленных на стабилизацию оползня, методом обратных расчетов определены показатели сопротивления сдвигу в зонах различной влажности.

Метод обратных расчетов основан на том, что до момента обрушения равновесие пород в откосе описывается соотношением:

$$\sum_{i=1}^{n} F_{\text{сд}i} = \sum_{i=1}^{n} F_{\text{тр}i} + \sum_{i=1}^{n} F_{\text{сц}i},$$

где $\sum_{i=1}^{n} F_{\text{сд}i}$, $\sum_{i=1}^{n} F_{\text{тр}i}$, $\sum_{i=1}^{n} F_{\text{сц}i}$ – соответственно суммы сдвигающих сил, сил трения и сцепления, действующих на точку по наиболее напряженной поверхности скольжения в i-ом блоке; $F_{\text{сд}i} = \gamma_i V_i \sin\alpha_i$; $F_{\text{тр}i} = \gamma_i V_i \cos\alpha_i \operatorname{tg}\varphi_i$; $F_{\text{сц}i} = C_i l_i$; γ_i – объемный вес грунта, кН/м^3; V_i – объем расчетного блока, м^3; α_i – угол наклона поверхности скольжения в середине расчетного блока, град; φ_i – угол внутреннего трения грунта, град; C_i – сцепление грунта, кН/м^2; l_i – длина поверхности скольжения в пределах расчетного блока с шириной, условно принимаемой 1 м.

После оползания пород, когда силы сцепления по поверхности скольжения перестают действовать, равновесие обрушившихся масс наступает тогда, когда сдвигающие силы уравновешиваются только силами трения, т. е. выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^{n} F_{\text{сд}i} \le \sum_{i=1}^{n} F_{\text{тр}i}.$$

Таким образом, для каждого блока можно решить два уравнения с двумя неизвестными – углом внутреннего трения φ_i и сцеплением C_i грунтов.

На основании полученных исходных данных построена объемная геолого-геофизическая модель оползня «Центральный» и прилегающего прибортового

массива. Для поиска наиболее опасного сечения при проектировании технологических решений по разборке оползня предложен алгоритм прогноза устойчивости прибортового массива на основе объемных геолого-геофизических моделей.

С учетом современной тенденции использования средств автоматизации для повышения точности прогноза [16, 17] алгоритм адаптирован для его последующей компьютерной реализации. Структура алгоритма имеет четыре этапа (рис. 1).

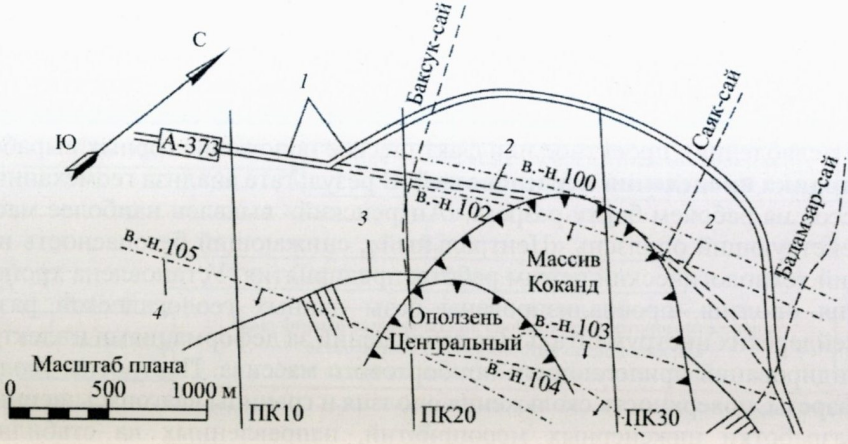

Рис. 2. Схема оползня «Центральный»:
1 – действующая автодорога А-373; *2* – разрушенный участок автодороги А-373; *3* – верхняя бровка борта; *4* – разрывное нарушение *взбросо-надвиг*
Fig. 2. Scheme of the the Centralny landslide:
1 – existing highway A-373; *2* – destroyed section of the highway A-373; *3* – open-pit wall top; *4* – dislocation with a break of continuity

На первом этапе формируется триангуляционная модель прибортового массива. Поверхность борта, рельеф естественной поверхности ослабления и границы аномальных зон представляют в виде сетей множеств *A*, *B*, *C* треугольников, вершины которых имеют координаты *x*, *y*, *z*.

На втором этапе формируется геомеханическая модель. Выполняется ввод физико-механических параметров φ, *C*, γ массива и естественной поверхности ослабления в аномальных зонах и за их пределами.

Третий этап включает в себя настройку расчетного модуля: ввод координат *P* точек первого расчетного сечения, величин линейного Δl и углового $\Delta\alpha$ шага смещения расчетных сечений, а также шага поиска Δa наиболее напряженной поверхности скольжения на отдельном расчетном сечении. Построение множества расчетных сечений через заданный линейный шаг позволит установить в плане наиболее опасный участок, а поворот сечения на угловую величину позволяет спрогнозировать направления смещения прибортового массива, имеющего криволинейную в плане форму.

На четвертом этапе выполняется работа с базой данных геомеханической модели. В каждом расчетном сечении вычисляется сумма удерживающих и сдвигающих сил и их соотношение – коэффициент устойчивости. Коэффициент устойчивости вычисляется методом предельного равновесия. По результатам расчета коэффициентов устойчивости на поверхность прибортового массива наносятся изолинии $E(n)$. Работа алгоритма завершается формированием отчета.

Выбор метода предельного равновесия обоснован совокупностью нескольких факторов. Во-первых, данный метод регламентирован требованиями *Правил обес-*

печения устойчивости откосов на угольных разрезах. Во-вторых, в отличие от более сложных численных методов расчета методы предельного равновесия требуют определения меньшего количества характеристик пород, слагающих прибортовой массив. В условиях ограниченности бюджетов инженерно-геотехнических изысканий данный фактор весьма актуален. В-третьих, методы

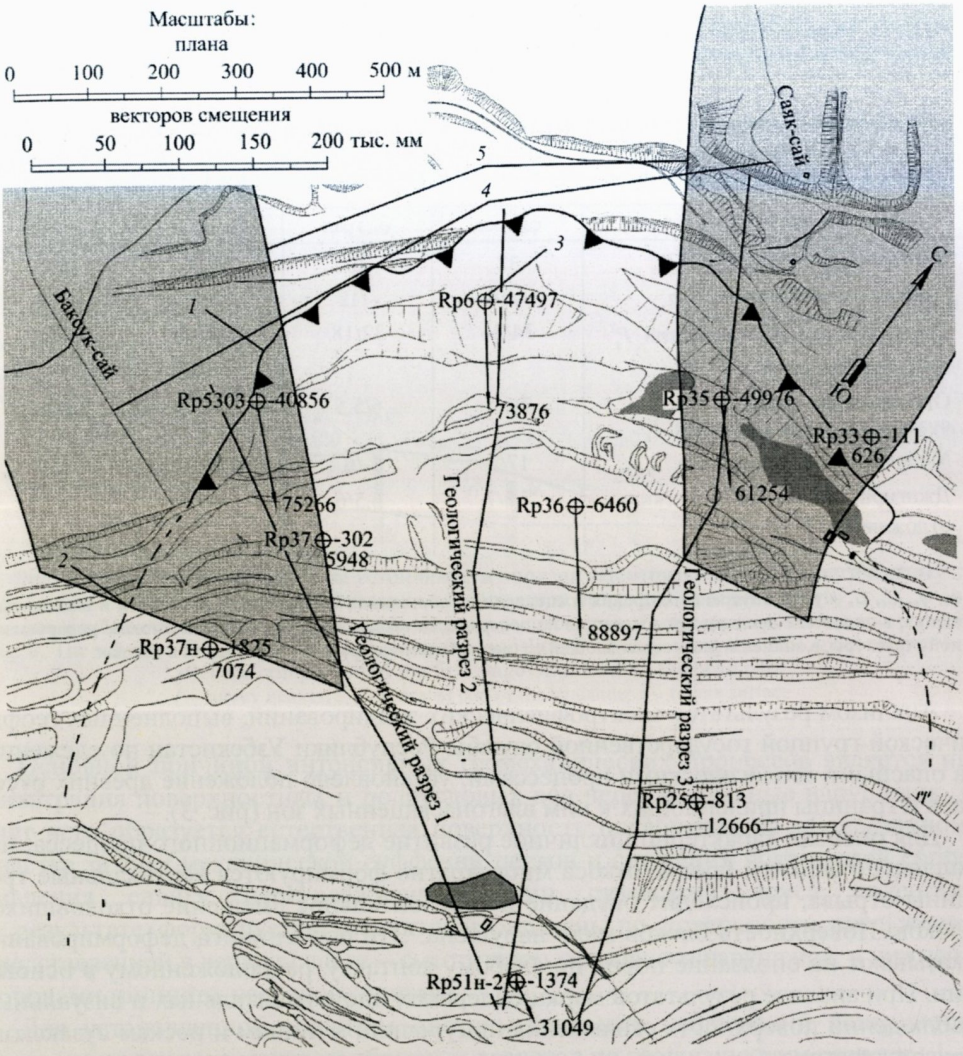

Рис. 3. Схема объемной геолого-геофизической модели оползня «Центральный»:
1 – трещина отрыва; *2* – граница оползня; *3* – репер наблюдательной станции; *4* – русла саев; *5* – границы влагонасыщенных зон

Fig. 3. Scheme of the three-dimensional geological-geophysical model of the Centralny landslide:
1 – tension crack; *2* – landslide boundary; *3* – survey marker; *4* – riverbeds of sais; *5* – boundaries of water-logged areas

предельного равновесия доступны в компьютерной реализации и на сегодняшний день остаются востребованы в инженерной практике [17–20].

Результаты. Прибортовой массив оползня «Центральный» сложен породами мезо-кайнозойского покрова с преобладанием пород глинистого состава. Падение слоистости близкое к горизонтальному. Строение массива осложнено разрывными нарушениями, классифицируемыми как взбросо-надвиги с очень по-

логим сместителем в нижней части и крутым в верхней. Они придали оползневому участку «чешуйчатое» строение. Разрывные нарушения залегают согласно с откосом, разрывая толщу пород от четвертичных отложений до сузакского горизонта палеогена. По мнению В. Н. Колпакова, генезис такого строения прибортового массива может иметь древнеоползневую природу. Оползень «Центральный» расположен на территории слияния Баксук-сай и Саяк-сай (по местной терминологии «сай» – это овраг с постоянным или временным водотоком). Схема оползня представлена на рис. 2.

Таблица 1. Показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения оползня «Центральный»

Table 1. Values of friction angles and cohesions of failure surface of the landslide Centralny

Литологическая разность (толща)	$\varphi_е$, град	$\varphi_в$, град	$C_е$, кН/м^2	$C_в$, кН/м^2
Четвертичные отложения Q	32	30	35,3	17,7
Неогеновые отложения N_{1-2}	–/14	–/12	–/0,0	–/0,0
Туркестанский P_2^3 и алайский P_2^2 ярусы палеогена	34/24	32/18	0,0/0,0	0,0/0,0
Опоковидные глины сузакского яруса палеогена P_2^1	7/6,5	6/5,5	2,9/2,9	2,5/2,5
Меловые отложения K_2	17/7	–/6	0,0/0,0	–/0,0
Джигиристанская свита юрских отложений J_3^{dg}	7,5/7	6,5/6	3,9/3,9	2,9/2,9

$\varphi_е$, $\varphi_в$, $C_е$, $C_в$ – углы внутреннего трения и сцепления в состояниях естественной влажности и влагонасыщения; в числителе представлены значения по поверхности скольжения, проходящей в толще ненарушенной структуры, в знаменателе – совпадающей со сместителями разрывных нарушений в толщах.

Анализом результатов электрофизических зондирований, выполненных геофизической группой государственной службы Республики Узбекистан по слежению за опасными геологическими процессами, установлено положение древних русел саев и границы прилегающих к ним влагонасыщенных зон (рис. 3).

Для оползня характерно цикличное развитие деформационного процесса: параллельно верхней бровке откоса многократно формируются вертикальные трещины отрыва, происходит оседание и горизонтальное смещение отколовшихся блоков. Поверхность блоков мало нарушена. Эти особенности деформирования указывают на оползание пород по слабому контакту, расположенному в основании. При анализе результатов маркшейдерских инструментальных и визуальных наблюдений поверхность скольжения приурочили к глинам и пескам сузакского яруса палеогена.

Первые признаки формирования оползня зафиксированы в апреле 1985 г., а в мае 1987 г. после увеличения результирующего угла наклона борта с 11° до 15° произошло оконтуривание призмы обрушения объемом 58 млн м^3. В мае 1993 г. на 111-м км автодороги А-373 «Ташкент–Коканд» произошло формирование оползня «Старая подстанция» («Массив Коканд») в виде трещин на правом фланге оползня «Центральный». В 2002 г. эти трещины соединились с оползнем «Центральный». Протяженность трещин составила 100–500 м, площадь призмы обрушения «Массива Коканд» – 0,21 км^2. Объем призмы обрушения– 3,5 млн м^3. В 2011 г. после длительного стояния борта без обновления произошла активизация деформационных процессов оползня «Центральный». Оседание оползневой массы составило 40 м. Образовался каньон со скоплением воды объемом 8,5 тыс. м^3.

«Массив Коканд» окончательно соединился с оползнем «Центральный». В ноябре 2017 г. снова отмечена активизация оползня «Центральный», связанная с интенсивным ведением работ по разгрузке средней части оползня. В головной части оползня (гор. +1100 м), в районе бывшей автодороги А-373 «Ташкент–Коканд», вдоль границы призмы обрушения появилась трещина длиной 530 м и шириной 0,6 м. Величина оседания составила 1,5 м. В 2018 г. между ПК 17–19 образовался ряд трещин. Между ПК 20–22 произошла резкая активизация смещения оползня. Скорости смещения достигли: в вертикальной плоскости – 79,7 мм/сут, в горизонтальной – 738,6 мм/сут. Направление смещения реперов – юго-восточное. В головной части оползня появилась новая трещина длиной 70 м. Глубина трещины достигла 5 м, ширина – 2,3 м, оседание – 3 м. Произошло полное разрушение автодороги А-373.

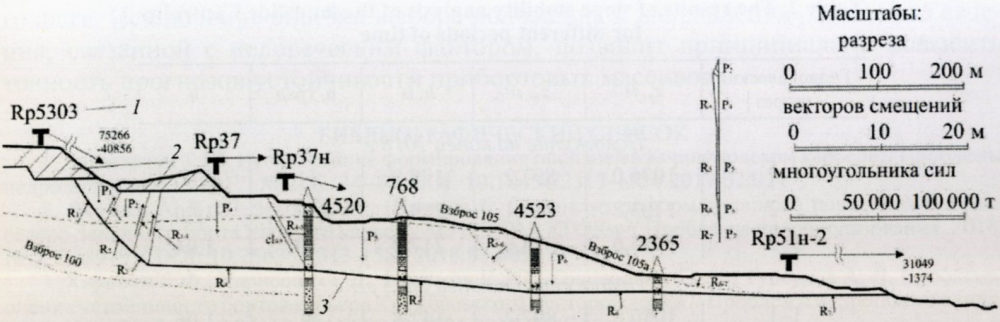

Рис. 4. Расчетная схема прогноза устойчивости оползня «Центральный» по геологическому разрезу 1–1 после завершения первого этапа разгрузки головной части:
1 – репер наблюдательной станции; *2* – отрабатываемая часть оползня; *3* – поверхность скольжения оползня
Fig. 4. The scheme of slope stability analysis of the landslide Centralny along the geological section 1–1 after the completion of the first stage of unloading the head part:
1 – survey marker; *2* – excavated part of the landslide; *3* – failure surface

Основной причиной интенсивных геомеханических процессов является инфильтрация поверхностных и подрусловых вод через разрывные нарушения, за счет чего образуется естественная поверхность ослабления на «подрезанном» участке за счет механической суффозии песков и снижения показателей сопротивления сдвигу переувлажненных глин сузакского яруса палеогена. В результате формируется контактный оползень по поверхности скольжения, представленной в верхней части – сместителем разрывного нарушения, в нижней – породами глинисто-песчаного состава.

Для установленной анализом инструментальных наблюдений поверхности скольжения оползня методом обратных расчетов по геологическим разрезам 1–1, 2–2 и 3–3 (см. рис. 3) определены показатели сопротивления сдвигу для зон влагонасыщения и естественной влажности (табл. 1).

Результатами обратных расчетов установлено следующее:

Во-первых, значения сцепления *C* по поверхности скольжения для известняков, мергелей и песчаников равны нулю. Для остальных литотипов глинистого состава значения *C* изменяются от 2,5–2,9 до 17,7 кН/м^2 в зоне влагонасыщения и от 2,9–3,9 до 35,3 кН/м^2 в зоне естественной влажности. Для глинистых пород это объясняется их способностью после обрушения сохранять остаточное сцепление вследствие частичного восстановления нарушенных структурных связей. В остальных случаях поверхность скольжения является разрывной структурой, сдвигающие силы по которой уравновешиваются только силами трения.

Во-вторых, значения углов внутреннего трения φ в призме упора оползня изменяются от 5,5° до 6,5° в зоне влагонасыщения и от 6,5° до 7,5° в зоне естественной влажности.

Для предотвращения развития геомеханических процессов до конца 2025 г. предусмотрено завершить первый этап разгрузки головной части оползня «Центральный». С использованием показателей сопротивления сдвигу по поверхности скольжения оползня выполнен прогноз устойчивости контура оползня на конец 2018 и 2025 гг. методом многоугольника сил. На рис. 4 показана расчетная схема для прогноза устойчивости по геологическому разрезу 1–1. Результаты прогноза по геологическим разрезам представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты прогноза устойчивости оползня «Центральный» на разные периоды времени
Table 2. The results of slope stability analysis of the landslide Centralny for different periods of time

Геологический разрез	$z_в$, м	$z_н$, м	h, м	α, град	n
Положение на конец 2018 г.					
1–1	1076,0	897,2	178,8	11	1,00
2–2	1103,8	884,1	219,7	10	1,00
3–3	1095,6	878,6	217,0	10	1,04
Положение на конец 2025 г.					
1–1	1040,0	897,2	142,8	9	1,06
2–2	1070,0	884,1	185,9	9	1,08
3–3	1070,0	878,6	191,4	9	1,09

$z_в$, $z_н$ – отметки верхней и нижней бровок; h – высота борта; α – результирующий угол борта; n – коэффициент устойчивости.

Результаты прогноза устойчивости состоят в следующем:

– состояние равновесия оползня на конец 2018 г. оценивается как предельное. Значения коэффициентов устойчивости по геологическим разрезам 1–1, 2–2 и 3–3 равны 1,00; 1,00; 1,04 соответственно;

– после выполнения первого этапа мероприятий по разгрузке головной части оползня к концу 2025 г. значения коэффициентов устойчивости по геологическим разрезам 1–1, 2–2 и 3–3 увеличатся до 1,06; 1,08 и 1,09 соответственно.

Выводы. Геологическое строение борта представлено преимущественно породами глинистого состава и осложнено влиянием гидрогеологического фактора, связанного с наличием поверхностных и подрусловых водотоков, которые образуют в прибортовом массиве аномальные по влажности зоны и являются источником подпитки оползневого массива. Разрывная тектоника способствует инфильтрации воды к слою глин и песков сузакского яруса палеогена, в результате фильтрационного выноса пород песчаного состава и переувлажнения глин происходит развитие геомеханических процессов в виде цикличного формирования контактного оползня. Результаты прогноза устойчивости на конец 2018 г. свидетельствуют о предельном состоянии оползня «Центральный». После выполнения запланированных технологических решений по разгрузке головной части оползня произойдет выполаживание борта, вследствие чего коэффициент устойчивости увеличится на 5–6 %.

Разброс значений коэффициентов устойчивости по различным геологическим разрезам связан с влиянием нескольких причин:

– от направления геологического разреза зависят значения результирующего угла профиля борта и угла падения слоев;

– вследствие влияния природных и техногенных факторов в прибортовом массиве проявляется ярко выраженная анизотропия свойств горных пород, происходит формирование зон, аномальных по плотности и влажности.

Методика прогноза устойчивости анизотропных массивов должна учитывать изменчивость физико-механических свойств. Данные факторы формируют одну из распространенных проблем – поиск наиболее опасного сечения или оползнеопасного участка прибортового массива. Предложенный алгоритм прогноза устойчивости прибортовых массивов позволяет решить данную проблему за счет компьютерной реализации. Это обеспечивается функцией поиска оползнеопасных зон, суть которой заключается в построении множества расчетных сечений на геолого-геофизической модели через заданные величины линейного и углового шага. Исключение ошибки выбора положения и направления расчетного сечения, связанной с человеческим фактором, позволит принципиально повысить точность прогнозов устойчивости прибортовых массивов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Далатказин Т. Ш. Исследование формирования оползней в Коршуновском карьере // Проблемы недропользования. 2017. № 2. С. 34–40. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.034

2. Яковлев А. В., Переход Т. М., Шимкив Е. С. Анализ деформационного поведения массива северо-западного борта главного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК» // Проблемы недропользования. 2018. № 3. С. 89–95. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.089

3. Харисов Т. Ф., Харисова О. Д., Ефремов Е. Ю., Коновалова Ю. П., Турсуков А. Л. Проблемы оценки устойчивости бортов карьера Киембаевского месторождения // Проблемы недропользования. 2017. № 4. С. 33–42. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.033

4. Якубов С. И., Сидорова И. П., Раимжанов Б. Р. Изучение оползневых явлений – один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангренский» // ГИАБ. 2017. № 6. С. 370–375.

5. Septian A., Llano-Serna M. A., Ruest M. R., Williams D. J. Three-dimensional kinematic analysis of Bingham Canyon mine pit wall slides // Procedia Engineering. 2017. No. 175. P. 86–93. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.030

6. Fredj M., Hafsaoui A., Boukarm R., Nakache R., Saadoun A. Numerical modeling of slope stability in open pit phosphate mines, Algeria: a comparative study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. No. 221. P. 1–9. DOI:10.1088/1755-1315/221/1/012020

7. Lelono H. D., Basson F. R. P., Lupo J., Adriansyah Y. Pit slope evaluation based on the historical failure database at Batu Hijau mine // APSSIM. 2016. P. 213–224. DOI: 10.36487/ACG_rep/1604_10_Lelono

8. Верхотуров А. Г., Размахнина И. Б., Чернов А. И. Анализ влияния инженерно-геологических факторов на устойчивость бортов карьеров Татауровского буроугольного месторождения // Известия Иркутского государственного университета. 2016. Т. 17. С. 20–33.

9. Ушаков Д. К. Анализ факторов, влияющих на устойчивость скальных пород в бортах карьера // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. № 25(1). С. 29–36. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-29-36

10. Contreras L-F., Hormazabal E., Ledezma R., Arellano M. Geotechnical risk analysis for the closure alternatives of the Chuquicamata open pit // Mining Geotechnical Risk. 2019. P. 373–388. DOI: 10.36487/ACG_rep/1905_22_Hormazaba

11. Соколов С. В., Салтымаков Е. А., Кормин А. Н. Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 66–70.

12. Ковров А. С. Влияние сложной геологической структуры и обводненности массива пород на устойчивость откосов карьера // ГИАБ. 2015. № 10. С. 45–50.

13. Санчаа А. М., Фаге А. Н., Шемелина О. В. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // ГИАБ. 2019. № 10. С. 90–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105

14. Тайлаков О. В., Макеев М. П., Салтымаков Е. А., Смыслов А. И. Построение рельефа донной поверхности гидроотвала на основе применения электротомографии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6. С. 5–12. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-5-12

15. Колесников В. П., Ласкина Т. А., Артемьев Д. А. О совершенствовании и развитии методов электрометрического мониторинга геологической среды // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2017. № 1(37). С. 155–158.

16. Дунаев В. А., Годовников Н. А. Оценка и прогноз устойчивости уступов карьеров в массивах скальных пород на основе геоинформационных технологий // ГИАБ. 2014. № 4. С. 134–137.

17. Бас Н. С., Костин В. Н. Проектирование программного обеспечения для расчета устойчивости откосных сооружений // ГИАБ. 2016. № 11. С. 33–46.

18. Deng D. P., Liang L., Zhao L. H. Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique // Journal of Mountain Science. 2017. Vol. 14. P. 2311–2324. DOI: 10.1007/s11629-017-4537-2

19. Deng D. P., Zhao L. H., Li L. Limit equilibrium slope stability analysis using the nonlinear strength failure criterion // Canadian Geotechnical Journal. 2015. Vol. 52. P. 563–576. DOI: 10.1139/cgj-2014-0111

20. Deng D. P., Li L., Wang J. F., Zhao L. H. Limit equilibrium method for rock slope stability analysis by using the Generalized Hoek-Brown criterion // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. Vol. 89. P. 176–184. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.09.007

Поступила в редакцию 18 декабря 2019 года

Сведения об авторах:

Караблин Михаил Михайлович – ведущий инженер технического отдела Кузбасского головного института по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий «Кузбассгипрошахт». E-mail: karablin.mm@gmail.com

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: 10.21440/0536-1028-2020-3-39-49

Angren coal pit Centralny landslide slope stability analysis based on a three-dimensional geological-geophysical model

Mikhail M. Karablin[1], Sergei M. Prostov[2]

[1] OJSC KuzbassGhiproShakht, Kemerovo, Russia.

[2] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract

Introduction. *In the course of mining mineral deposits by opencast, natural stress state of adjacent rock mass changes giving rise to geomechanical processes which lead to pit slopes deformation. It can be prevented by mean of detecting landslide-hazardous zone by using three-dimensional geological-geophysical models based on the data bases from prospecting surveys and geophysical sounding of the adjacent rock.*

Research aim *is to develop and evaluate basic provisions of the methods of forecasting slope stability based on three-dimensional geological-geophysical models which include the following information: the results of geophysical sounding (waterlogged zones boundaries); databases of exploration wells (physical-mechanical properties of soils in the zones of water saturation and natural moisture content, and the relief of the natural surfaces of weakness); design and actual position of mine workings.*

Methodology. *In order to find the most hazardous section in the adjacent rock mass an algorithm of forecasting has been proposed and adjacent rock mass stability has been analyzed based on three-dimensional geological-geophysical models.*

Results. *A three-dimensional geological-geophysical model of Centralny landslide has been constructed as a result of analyzing geological survey databases, surveying instrumental observations over the deformations, and electrical sounding of the adjacent rock mass. Values of the friction angle and cohesion were found with using the inverse calculation method. Centralny landslide stability forecast has been analyzed as of the year of 2018 and after the final completion of the first stage of loading-out the front section in 2025.*

Summary. *Developed an algorithm of slope stability analysis makes it possible to solve the task of finding the most hazardous section or landslide area by means of computer-based realization.*

Key words: *rock mass zoning; stability of open-pit wall; geological-geophysical model; geomechanical processes; waterlogged zones; factor of safety; limit equilibrium.*

REFERENCES

1. Dalatkazin T. Sh. Forming landslides researches in the Korshunovsky open pit. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 2: 34–40. (In Russ.)

2. Iakovlev A. V., Perekhod T. M., Shimkiv E. S. Analysis of deformation process on the north-west side of the main quarry of JSC "EVRAZ KGOK". *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2018; 3: 89–95. (In Russ.)

3. Kharisov T. F., Kharisova O. D., Efremov E. Iu., Konovalova Iu. P., Tursukov A. L. Problems of assessment the stability of pit edges of the Kiyembayevsky deposit. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 4: 33–42. (In Russ.)

4. Iakubov S. I., Sidorova I. P., Raimzhanov B. R. Studies of landslide phenomena – one of the challenges of Angren open pit mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 6: 370– 375. (In Russ.)

5. Septian A., Llano-Serna M. A., Ruest M. R., Williams D. J. Three-dimensional kinematic analysis of Bingham Canyon mine pit wall slides. *Procedia Engineering*. 2017; 175: 86–93.

6. Fredj M., Hafsaoui A., Boukarm R., Nakache R., Saadoun A. Numerical modeling of slope stability in open pit phosphate mines, Algeria: a comparative study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 221: 1–9.

7. Lelono H. D., Basson F. R. P., Lupo J., Adriansyah Y. Pit slope evaluation based on the historical failure database at Batu Hijau mine. *APSSIM*. 2016. P. 213–224.

8. Verkhoturov A. G., Razmakhnina I. B., Chernov A. I. Analysis of the Impact of Engineering and Geological Factors on the Stability of Tataurovsky Brown Coal Deposit Pit Walls. *Izvestiia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta = The Bulletin of Irkutsk State University*. 2016; 17: 20–33. (In Russ.)

9. Ushakov D. K. Analysis of the factors influencing the sustainability of rock sciences in the sides of the career. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta = Transbaikal State University Journal*. 2019; 25 (1): 29–36. (In Russ.)

10. Contreras L-F., Hormazabal E., Ledezma R., Arellano M. Geotechnical risk analysis for the closure alternatives of the Chuquicamata open pit. *Mining Geotechnical Risk*. 2019. P. 373–388.

11. Sokolov S. V., Saltymakov E. A., Kormin A. N. Complex geophysical researches of coal massive condition in Kuzbass. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 2: 66–70. (In Russ.)

12. Kovrov A. S. Effect of complex geology structure and water content of rock mass on pit wall stability. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 10: 45–50. (In Russ.)

13. Sanchaa A. M., Fage A. N., Shemelina O. V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019: 10: 90–105. (In Russ.)

14. Tailakov O. V., Makeev M. P., Saltymakov E. A., Smyslov A. I. Construction of the relief of the bottom surface of the hydraulic dump using electro-tomography. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 6: 5–12. (In Russ.)

15. Kolesnikov V. P., Laskina T. A., Artemiev D. A. The development of the electrometry methods of geological medium monitoring. *Geologiia i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala = Geology and Minerals of the Western Urals*. 2017; 1 (37): 155–158. (In Russ.)

16. Dunaev V. A., Godovnikov N. A. The estimation and forecast of the open pit ledges stability in the rock massif on a basis geoinformation technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 4: 134–137. (In Russ.)

17. Bas N. S., Kostin V. N. Design of software for calculation of stability of sloping structures. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 11: 33–46. (In Russ.)

18. Deng D. P., Liang L., Zhao L. H. Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique. *Journal of Mountain Science*. 2017; 14: 2311–2324.

19. Deng D. P., Zhao L. H., Li L. Limit equilibrium slope stability analysis using the nonlinear strength failure criterion. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015; 52: 563–576.

20. Deng D. P., Li L., Wang J. F., Zhao L. H. Limit equilibrium method for rock slope stability analysis by using the Generalized Hoek-Brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016; 89: 176–184.

Received 18 December 2019

Information about authors:

Mikhail M. Karablin – leading engineer of the Technical Department, OJSC KuzbassGhiproShakht. E-mail: karablin.mm@gmail.com

Sergei M. Prostov – DSc (Engineering), professor of the Department of Theoretical and Geotechnical Mechanics, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: psm.kem@mail.ru

Для цитирования: 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. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-39-49

For citation: 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. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-39-49