

УДК 622.271.333:550.837.312

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Караблин М.М., аспирант гр. ГМаз-191, I курс

Брыков Д.В., студент гр. ФПс-151, V курс

Научный руководитель: Простов С.М., д.т.н., профессор кафедры ТиГМ
Кузбасский государственный технический университет им.Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Отработка месторождений полезных ископаемых открытым способом сопровождается изменением природного напряженного состояния прибортового массива, в результате чего возникают геомеханические процессы. Не редко геомеханическое обоснование параметров, обеспечивающих устойчивость карьерных откосов, выполняют на основе баз данных, включающих сведения о пространственно-геометрических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях залегания 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 характеристики по плотности и влажности [1, 2]. 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 [3-6]. В этой связи авторами статьи на основании комплексного обобщения баз данных геологического изучения, геофизических зондирований и маркшейдерских наблюдений за деформациями оползня «Центральный» Ангреноского разреза предложен алгоритм прогноза устойчивости бортов карьеров на основе объемных геолого-геофизических моделей, обеспечивающий повышение точности прогноза за счет выявления наиболее опасного сечения (рис.1).

Учитывая особенность данной задачи, алгоритм разработан для компьютерной реализации. Структура алгоритма включает 4 этапа.

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

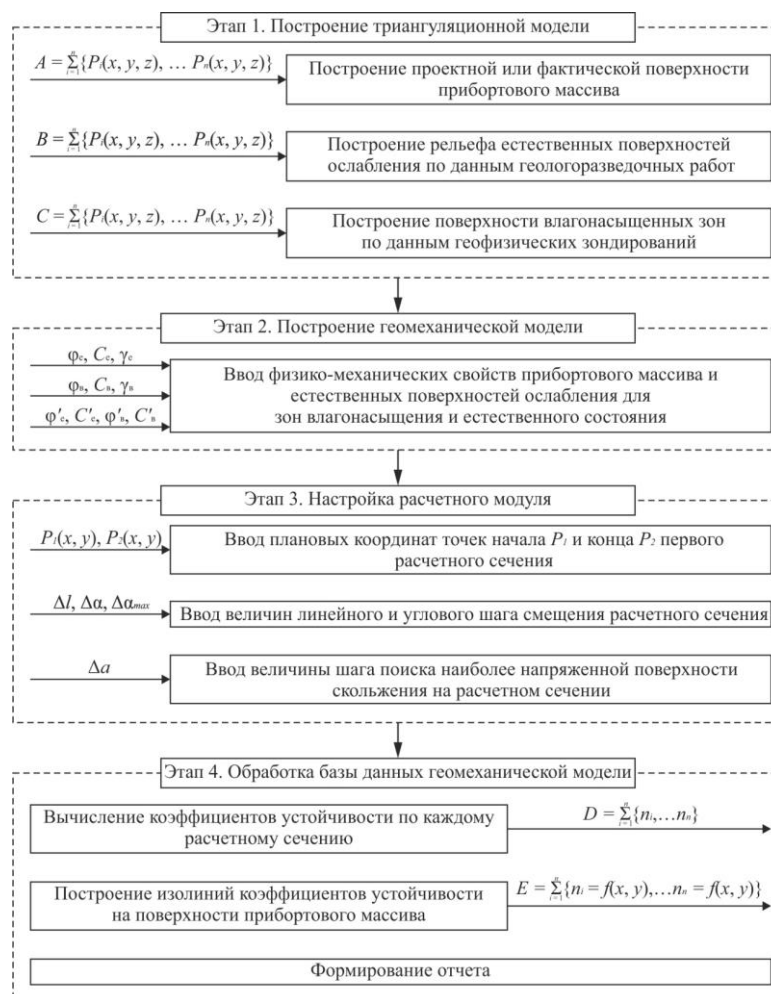


Рис. 1. Блок-схема алгоритма прогноза устойчивости карьерных откосов на основе объемных геолого-геофизических моделей

Ниже рассмотрен пример реализации данного алгоритма. Ангренское бурогольное месторождение находится на территории Уртачирчикского района Ташкентской области Республики Узбекистан в долине р. Ахангаран между Чаткальским и Кураминским хребтами. В геологическом строении прибортового массива оползня «Центральный» принимают участие породы мезокайнозойского покрова, сложенные юрскими, меловыми, палеогеновыми, неогеновыми и четвертичными отложениями.

Гидрогеологические условия месторождения включают четыре водоносных горизонта и комплекса, которые влияют на образование оползневых явлений.

1. Водоносный горизонт четвертичных отложений. Питание грунтовых вод осуществляется за счет инфильтрации поверхностных и атмосферных вод, а также перетока трещинных вод. Глубины залегания грунтовых вод по саям (сай - овраг с постоянным или временным водотоком, а также сам водоток) составляют: Саяк-сай – от 5 до 16 м; Бадамзар-сай – от 7 до 20 м, Боксук-сай – от 6 до 14 м. Подземные воды выклиниваются на нижележащие уступы разреза и дренируются по отводным дренажным канавам и лоткам.

2. Неогеновый водоносный горизонт приурочен к песчано-конгломератовой свите и имеет повсеместное распространение. Питание водоносного горизонта неогеновых отложений осуществляется за счет инфильтрации поверхностных водоатмосферных осадков и притока подземных вод со стороны гор.

3. Водоносный горизонт мел-палеогеновых отложений приурочен к галечникам с песчано-гравийным заполнителем в верхней и галечником с песчано-суглинистым заполнителем в нижней части разреза, где представлен отложениями боковых притоков Туган-Баши-сая, Саяк-сая, Баксук-сая. Воды по своему характеру напорные.

4. Водоносный комплекс юрских отложений подстилается и ограничивается с бортов слабопроницаемыми отложениями более древних комплексов, имеет повсеместное распространение. Характер подземных вод – напорный.

Неблагоприятное влияние гидрогеологических условий на развитие деформационного процесса осложнено произошедшими тектоническими процессами. Разрывные нарушения, классифицируемые как взбросо-надвиги с очень пологим сместителем в нижней и крутым в верхней части, придали северной части месторождения "чешуйчатое" строение. Сползанию горных масс оползня "Центральный" способствует согласное с откосом залегание взбросо-надвига 7а, взбросов 100-106, секущих толщу пород от сузакского горизонта палеогена до четвертичных отложений. За счет инфильтрации поверхностных и подземных вод через разрывные нарушения происходит механическая суффозия кварцевых песков. В результате фильтрационного выноса мелких частиц из массива горных пород образуется контактный оползень по поверхности скольжения, представленной в верхней части – сместителем разрывного нарушения, в нижней – суффозионной полостью. При этом геомет-

рические параметры оползневых участков ограничены размерами тектонических блоков. Схема оползня «Центральный» и геологический разрез по оси оползня представлены на рис. 2.

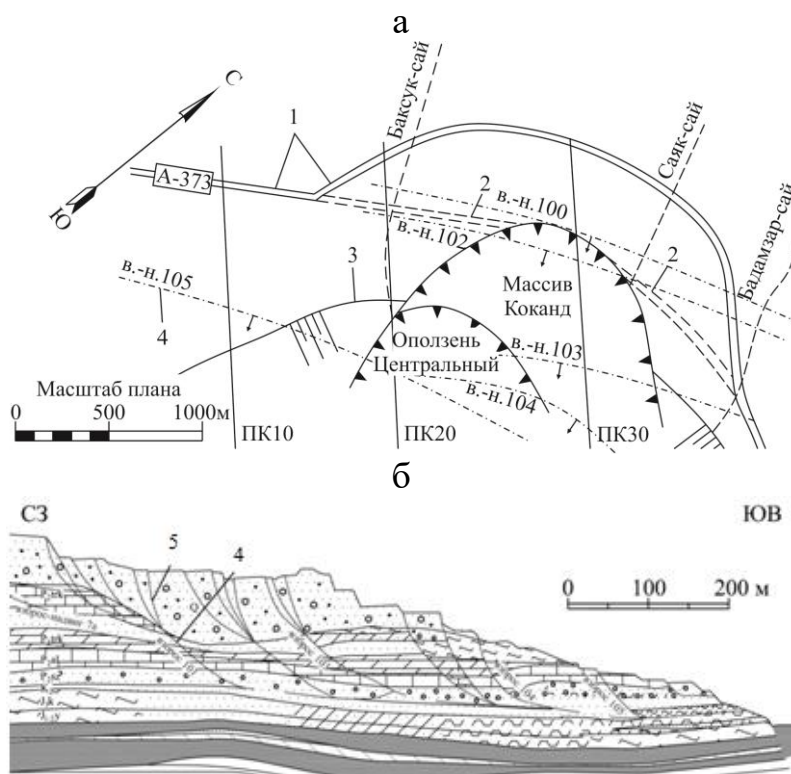


Рис. 2. Схема оползня «Центральный» (а) и геологический разрез по оси оползня (б): 1 – действующая автодорога А-373; 2 – разрушенный участок автодороги А-373; 3 – верхняя бровка борта; 4 – разрывное нарушение типа «взбросо-надвиг»; 5 – трещина отрыва

Для построения границ водонасыщенных зон на прилегающей к оползню «Центральный» территории выполнены электрофизические исследования геофизической группой государственной службы Республики Узбекистан по слежению за опасными геологическими процессами. Исследования выполнены методом зондирования по схеме симметричного электропрофилирования установкой АМNB при разносе питающей линии АВ = 100 м и MN = 25 м. Измерения осуществлялись аппаратурой АНЧ-3 по 16 электрическим профилям длиной от 3 до 4 км. Среднее расстояние между точками зондирования составило 50 м.

При составлении графиков электропрофилирования $\rho_k(x)$ и геологических разрезов по соответствующим профилям установлены следующие закономерности (для иллюстрации на рис.3 приведены результаты по профилю ПР3):

- на участках профилей, прилегающих к саям, наблюдаются локальные отрицательные аномалии ρ_k до 20 – 50 Ом·м, связанные с обводнением грунтов;

– между аномальными участками изменение ρ_k качественно совпадает с изменением мощности слоя t рыхлых отложений.

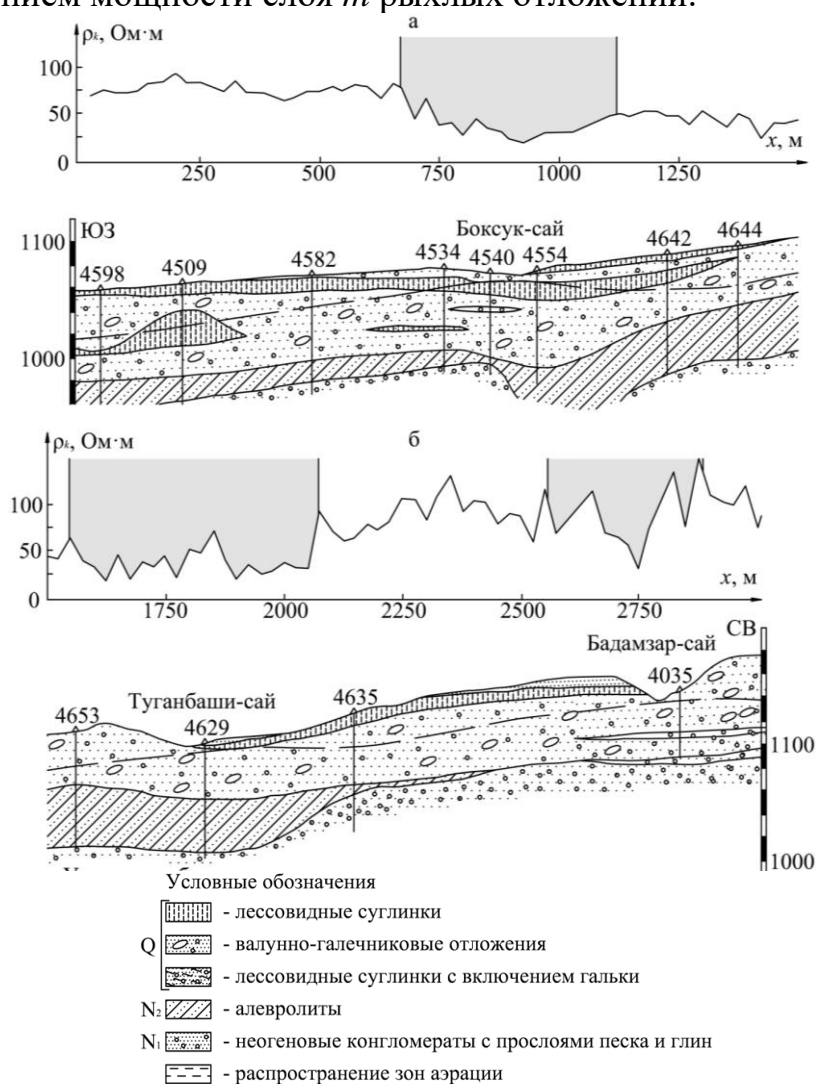


Рис. 3. График электропрофилеирования и геологический разрез левой (а) и правой (б) частей профиля ПРЗ

Основываясь на результатах ранее проведенных исследований в условиях Кузбасса [7, 8] для практической приближенной оценки влажности грунтов W в пределах обводненных зон по профилям целесообразно использовать гиперболическую зависимость

$$W(x) = W_0 \frac{\rho_{k0}}{\rho_k(x)},$$

где, W_0 , ρ_{k0} – опорные значения W и ρ_k , определенные на участках бурения геологических скважин.

С целью определения показателей сопротивления сдвигу анализом многолетних маркшейдерских инструментальных наблюдений установлена поверхность скольжения оползня «Центральный». Методом обратных расчетов по геологическим разрезам установлены значения угла внутреннего трения ϕ и сцепления C для зон различной влажности (табл.1).

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

Литологическая разность (толща)	φ_e , град	φ_b , град	C_e , кН/м ²	C_b , кН/м ²
Четвертичные отложения Q	32	30	35,3	17,7
Неогеновые отложения N_{1-2}	-/14 ²	-/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

Примечание: 1 – в таблице приняты сокращения φ_e , φ_b , C_e , C_b для обозначения углов внутреннего трения и сцепления в состояниях естественной влажности и водонасыщения; 2 – в числителе представлены значения по поверхности скольжения, проходящей в толще ненарушенной структуры, в знаменателе – совпадающей со сместителями разрывных нарушений в толщах.

На основании полученных исходных данных построена объемная геолого-геофизическая модель оползня «Центральный» и прилегающего прибортового массива (рис.4).

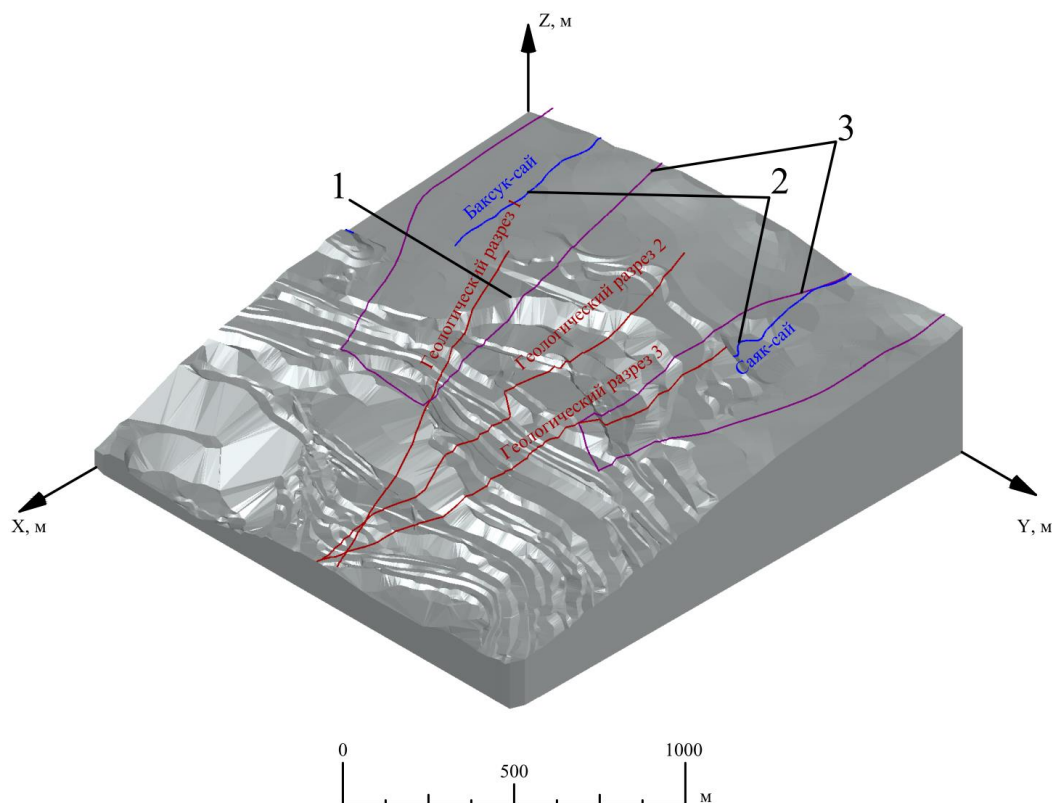


Рис. 4. Схема объемной геолого-геофизической модели оползня «Центральный»: 1 – трещина отрыва; 2 – русла саев; 3 – границы водонасыщенных зон

Для предотвращения развития геомеханических процессов до конца 2025 года предусмотрено завершить первый этап разгрузки головной части оползня «Центральный». Используя показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения, выполнен прогноз устойчивости положения оползня на конец 2018 и 2025 годов методом многоугольника сил. На рис.5 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 различные периоды времени

Геологический разрез	$z_{в}$, м	$z_{н}$, м	h , м	α , град	n
Положение на конец 2018 года					
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 года					
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

В таблице приняты сокращения: $z_{в}/z_{н}$ – отметки верхней и нижней бровок; h – высота борта; α – результирующий угол борта; n – коэффициент устойчивости.

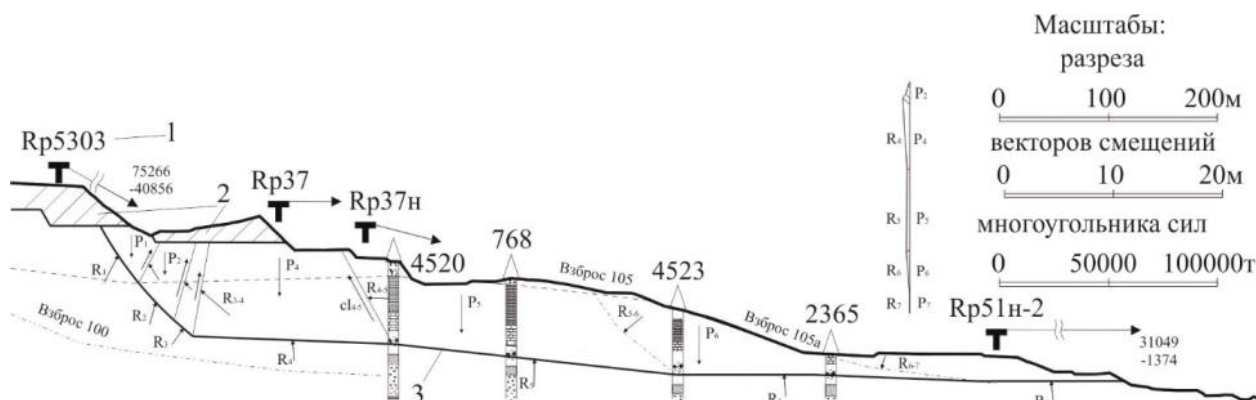


Рис. 5. Расчетная схема прогноза устойчивости оползня «Центральный» по геологическому разрезу 1-1 после завершения первого этапа разгрузки головной части:

- 1 – репер наблюдательной станции; 2 – обрабатываемая часть оползня; 3 – поверхность скольжения оползня.

По результатам выполненных исследований установлено следующее.

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 бортов карьеров.

Список литературы

1. Якубов, С.И. Изучение оползневых явлений – один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангренский» / С. И. Якубов, И. П. Сидорова, Б. Р. Раимжанов // ГИАБ – 2017 – № 6 – С. 370-375.
2. Ушаков, Д. К. Анализ факторов, влияющих на устойчивость скальных пород в бортах карьера / Д. К. Ушаков // Вестник Забайкальского государственного университета – 2019 – № 25(1) – С. 29-36. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-29-36.
3. Соколов, С. В. Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса / С. В. Соколов, Е. А. Салтымаков, А. Н. Кормин // Вестник Кузбасского государственного технического университета – 2017 – № 2 – С. 66-70.
4. Санчаа, А. М. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области / А. М. Санчаа, А. Н. Фаге, О. В. Шемелина // ГИАБ – 2019 – № 10 – С. 90-105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105.
5. Тайлаков, О. В. Построение рельефа донной поверхности гидротвала на основе применения электротомографии / О. В. Тайлаков, М. П. Макеев, Е. А. Салтымаков, А. И. Смыслов // Вестник Кузбасского государственного технического университета – 2017 – № 6 – С. 5-12. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-5-12.
6. Колесников, В. П. О совершенствовании и развитии методов электрометрического мониторинга геологической среды / В. П. Колесников, Т. А. Ласкина, Д. А. Артемьев // Геология и полезные ископаемые Западного Урала – 2017 – № 1(37) – С.155-158.
7. Простов, С. М. Прогнозирование устойчивости откосов глинистых уступов по данным электрофизического мониторинга / С. М. Простов, Н. А. Смирнов, С. П. Бахаева // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – №3. – С. 43–48.
8. Prostov, S. M. Prediction of Physico-Mechanical Properties of Hydraulic Fill Based on Electrical Saunding / S. M. Prostov, N. A. Smirnov, S. P. Bakhaeva // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – №1. – pp. 55–62.