УДК 504.55.054:622(470.6)

Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений

В.И.ГОЛИК¹, Ю.В.ДМИТРАК², В.И.КОМАЩЕНКО³, Н.М.КАЧУРИН⁴

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

² Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

⁴ Тульский государственный университет, Тула, Россия

Добыча руд подземным способом характеризуется ослаблением устойчивости вмещающих породных массивов и накоплением минеральных отходов. Полнота использования недр обеспечивается применением технологий с заполнением пустот твердеющими смесями, что требует качественного сырья для получения требуемой прочности. Дефицит вяжущей компоненты может быть восполнен применением гранулированных шлаков доменного производства, хвостов обогащения, золошлаков и других отходов. Чаще других пустоты закладывают смесями с комбинированием цемента и вяжущей добавки. Смеси с добавками к цементу золошлака в эквивалентном количестве не уступают прочности смеси только с цементом, особенно при размоле золошлака.

Свойствами закладочных массивов при использовании композитных вяжущих компонентов и инертных заполнителей управляют путем механического, химического, физического и энергетического воздействия на этапах приготовления и транспортирования твердеющих смесей. Для получения активной фракции заменителей цемента применяют дезинтеграторы, использующие силы инерции материалов при высокой скорости вращения с повышением высоких показателей активности и меньшими затратами энергии.

Компонентами твердеющих смесей может быть большинство отходов горного производства и смежных отраслей, что определяется экспериментально в конкретных условиях.

Ключевые слова: подземная разработка; отходы; твердеющая смесь; активатор; прочность; свойства; дезинтегратор; мельница

Как цитировать эту статью: Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений / В.И.Голик, Ю.В.Дмитрак, В.И.Комащенко, Н.М.Качурин // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 285-292. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.285

Введение. Извлечение твердых полезных ископаемых из недр характеризуется оседанием участка земной поверхности над отрабатываемым месторождением и накоплением отходов добычи и переработки, что негативно влияет на экологию прилегающих территорий, изменяет ландшафт и приводит к исключению из оборота земли.

Наименьший ущерб земной поверхности наносят технологии разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, которые минимизируют деформации вмещающего массива горных пород. Расширение области применения этих технологий является приоритетным направлением развития горного производства [3, 4, 9].

Основной недостаток использования твердеющей закладки – высокая стоимость – может быть уменьшен при использовании в составе закладочных смесей отходов производства в качестве добавок к вяжущему цементу и инертным заполнителям.

На горных предприятиях накоплены значительные объемы пород от подземных работ, хвосты обогащения, золошлаки котельных или ТЭЦ и другие твердые и жидкие отходы. Возможность их использования является предметом многочисленных исследований российских и зарубежных ученых. При добыче металлических руд инструментом повышения полноты использования недр является технология с заполнением пустот твердеющими смесями, в составе которых используются хвосты обогащения и переработки минерального сырья и отходы смежных производств, что снижает негативное воздействие на окружающую среду [7, 11-12].

Постановка проблемы. Рациональная область применения твердеющих смесей с использованием отходов горного производства определяется суммой технологической возможности, экономической целесообразности и экологической безопасности. Для их сочетания требуется обоснование параметров ориентированной на новые компоненты технологии приготовления и транспорта закладочных смесей, оптимизация режимов работы закладочных комплексов, управление свойствами закладочных смесей на всех этапах ведения горных работ.

Методология. Учитывая разнообразие вовлекаемых в производство отходов и исследовательские возможности горных предприятий, методы решения проблемы включают научное обобщение, систематизацию, выбор и обоснование новых параметров, экспериментальную проверку полученных результатов и рекомендации по их применению.

Стоимостные и иные параметры разработанной технологии уточняются путем моделирования отдельных процессов и сравнения с экспериментальными данными.

Обсуждение. Наиболее распространенными пригодными для использования в качестве вяжущей компоненты являются гранулированные шлаки доменного производства, хвосты обогащения, фосфогипсы от производства удобрений, шламы алюминиевого производства, золошлаки и другие (табл.1) [1-4, 6-8].

Таблица 1

Составы твердеющих смесей различной прочности

Компоненты, кг/м ³	Варианты прочностью до 1,8 МПа			Варианты прочностью от 3 МПа		
	1	2	3	1	2	3
Портландцемент или шлако-портландцемент М-400	30	—	100	60	30	140
Мокромолотый доменный гранулированный шлак	420	—	—	390	—	—
Мокромолотый золошлак котельной на угле	—	200	300	—	170	260
Цементная пыль	—	250	—	—	250	—
Инертный заполнитель	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Вода, л/м ³	360	400	420	360	400	420
Пластификатор	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Чаще других пустоты закладываются смесями с комбинированием цемента и вяжущей добавки к нему (табл.2).

Таблица 2

Составы твердеющих смесей с комбинированной вяжущей компонентой

Компоненты смеси, кг / м ³						Растекаемость, см	Водоотделение, %	Предельное напряжение сдвига, Па	Прочность, МПа, возраст, с		
Портландцемент		Мокромолотый шлак	Песчано-гравийная смесь	Золошлак	Вода, л/ м ³				7	14	28
М-400	М-500										
30	—	420	1275	—	300	16,5	1,7	83	—	3,38	5,66
60	—	390	1253	—	370	16,5	1,4	94	3,75	5,22	7,1
30	—	420	688	320	395	17	1,6	97	2,86	3,49	3,98
60	—	390	707	320	390	16	1,6	80	3,74	4,7	5,64
—	30	420	1275	—	360	16	1,4	—	3,34	4,26	5,97
—	60	390	1253	—	370	17	1	111	4,13	5,57	7,32
—	80	370	1294	—	355	17	1	112	4,32	6,2	9,59
—	30	420	638	320	395	17	2,3	67	2,39	3,87	5,13
—	60	390	707	320	390	17	2	54	3,84	5,33	7,1
—	80	370	734	320	330	14	0,7	107	3,77	5,78	6,87

Опыт применения составов твердеющей смеси с граншлако-портландцементной вяжущей добавкой и добавкой из малоактивных отходов позволяет сделать следующие выводы:

- минимальный расход цемента М-400 в высокопрочных составах составляет 30 кг/м³;
- повышение марки цемента с М-400 до М-500 снижает расход цемента в комплексной вяжущей компоненте при обеспечении одинаковой прочности смеси;
- частичная замена песчано-гравийной смеси (ПГС) золошлаком (до 30 %) снижает прочность, но обеспечивает утилизацию отходов и снижение расходов на заполнитель;
- составы с размолотыми в шаровой мельнице золошлаками (30 % фракции – 0,08 мм) при прочих равных условиях имеют большую прочность, чем с немолотыми золошлаками;
- минимальный расход цемента с молотым золошлаком составляет 130-143, а с немолотым – 140-160 кг/м³.

Учитывая повышенную вяжущую способность и запасы золошлаков, они являются приоритетными для использования в качестве добавки к цементу (табл.3).

Таблица 3

Составы твердеющих смесей с вяжущей компонентой из золошлака

Компоненты, кг/м³						Предельное напряжение сдвига, Па	Прочность в 28 с, МПа
Цемент	Золошлак		Высевки	ПГС	Вода, л/ м³		
	немолотый	молотый					
200	—	—	700	790	330	100	2,9
180	—	—	790	800	330	120	3
160	—	—	800	790	330	130	2,5
180	—	—	1180	400	330	100	2,7
160	—	—	1200	400	330	100	3
180	—	—	390	1210	330	120	3,1
160	—	—	400	1220	330	140	2,2
140	310	—	—	1065	440	100	2,3
160	290	—	—	1065	440	100	2,4
140	310	—	1065	—	490	110	1,7
160	290	—	1065	—	480	100	2,1
140	—	310	—	1120	416	40	2,9
160	—	290	—	1130	400	40	4,7
140	—	310	1120	—	480	50	2,7
160	—	290	1130	—	450	50	4,1

Смесь с добавками к цементу золошлака в эквивалентном количестве уступает по прочности смеси только с цементом, особенно при размоле золошлака. Это можно объяснить более благоприятными для процесса гидратации свойствами золошлаков.

Физико-механические показатели вяжущих компонент смеси:

Компоненты	Плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Остаток на сите 5 мм, %	Удельная поверхность, м ² /кг	Модуль крупности
Гранулированный шлак	2330	1410	8,3	7,67	3,2
Золошлак текущий	2130	570	25,2	239,6	1,04
Золошлак отвальный	2170	530	23,6	253,2	1,11

Свойствами закладочных массивов управляют, повышая активность компонент твердеющих смесей путем механического, химического, физического и энергетического воздействия, а также компоновкой смеси [5, 6, 10].

При активации добавок к цементу в дезинтеграторе УДА-10 с суммарной встречной скоростью обработки 35-130 м/с обеспечивается выход 40-60 % частиц крупностью 0,08 мм. Уже при суммарной линейной встречной скорости 62 м/с обеспечивается достаточная для добавки к цементу тонкость помола золошлаков, потому что удельная поверхность золошлака превышает удельную поверхность цемента почти в 1,5 раза.

Для сухого помола шлаков до требуемой тонкости (проход 50-60 % частиц сквозь сито – 0,08 мм) может быть использован дезинтегратор с суммарной линейной встречной скоростью обработки от 160 м/с.

Активация граншлака в полупромышленном дезинтеграторе ЖБ-12 при скорости 1100-1700 об/мин с суммарной линейной встречной скоростью 77-120 м/с показала результаты, идентичные результатам активации в УДЛ-10.

Золошлак обработали в полупромышленном дезинтеграторе Д-27 с трехрядными лопастными самофутерующимися роторами с наружным диаметром 615 мм.

Влажность обрабатываемого золошлака 9 %. Тонкость помола составила 35,6 % активной фракции. Прочность твердеющей закладки 3 МПа получена при расходе цемента 130 кг/м³. Расход воды 330 л/м³ оказался недостаточным, поэтому твердеющая закладка имела большую величину предельного напряжения сдвига. Увеличение воды до 400 л/м³ несущественно уменьшило прочность смеси.

Гранулированный шлак КС-0,08 обрабатывали в дезинтеграторе Д-27 без цемента и совместно с цементом (табл.4).

Таблица 4

Параметры твердеющей закладки на комплексном вяжущем с активацией в дезинтеграторе

Компоненты смеси, кг /м³					Предельное напряжение сдвига, Па		Растекаемость, см	Коэффициент отстоя воды	Плотность, кг /м³	Прочность, МПа, возраст, с	
Цемент	Граншлак	Золошлак	ПГС	Вода							
					Песок	ПГС				14	28
Составы на граншлако-портландцементном вяжущем											
80	370	–	1372	330	25	76	17,5	91,9	1970	3,5	6,2
60	390	–	1371	330	60	81	16	90,8	2000	3,1	5
40	410	–	1368	330	55	31	17,5	90,8	2010	2,7	3,9
20	430	–	1366	330	56	217	16	91,6	1990	1,1	2,1
Составы на золошлако-портландцементном вяжущем											
160	–	290	1370	330	116	178	15,5	93,9	1770	3,9	4,8
140	–	310	1370	330	102	180	16	96	1700	2,6	3,9
120	–	330	1370	330	98	185	17	95,2	1660	1,9	2,8
100	–	350	1370	330	117	187	15	94,9	1640	1,3	2,1
80	–	370	1370	330	138	172	15	93,5	T620	0,91	1,5
60	–	390	1370	330	119	169	15,5	94,8	1610	0,58	0,72
150	–	300	1093	395	105	132	18	3,2	1650	3,65	4,25
130	–	320	1086	395	90	143	18,5	3,6	1630	2,4	3,3
110	–	340	1078	395	128	165	16,5	3,2	1630	1,75	2,3

Величина тонкости помола шлака существенно влияет на свойства смеси и прочность твердеющей закладки. Активация граншлака в дезинтеграторе повышает прочность твердеющей смеси по сравнению с размолом в барабанной мельнице за счет приложения высокой энергии (табл.5).

Таблица 5

Гранулометрический состав активированного граншлака

Остаток на сите, мм, %								Проход сквозь сито, мм, %		Удельная поверхность, м ² /кг	
1,6	1	0,63	0,40	0,315	0,2	0,16	0,1	0,1	0,08	0,1	Общая
Обработка в дезинтеграторе											
–	0,22	1,24	2,87	3,25	9,27	5,13	13,38	64,64	52,3	158,4	110,1
0,16	0,44	0,08	4,40	5,58	13,49	5,26	12,49	55,69	40,8	137,9	88,4
Обработка в барабанной мельнице											
–	–	0,04	0,08	2,67	16,78	9,99	19,01	51,45	39,9	148,2	88,4

Золошлак обрабатывали в дезинтеграторе Д-27 при режиме 2900/3000 об/мин (суммарная линейная встречная скорость 118,8 м/с). Общий расход вяжущего 450 кг/м³. В качестве заполнителя использовали ПГС. Перемешивание компонентов производилось вручную. Параметры твердеющих смесей на комплексном вяжущем при различной тонкости помола сведены в табл.6.

Результаты экспериментов позволяют сделать выводы:

- прочность твердеющих смесей 3 МПа с вяжущей добавкой из граншлака обеспечивается при минимальном расходе цемента 30-40 кг/м³;
- совместная мокрая обработка граншлака и цемента практически не влияет на прочность твердеющей закладки, хотя несколько ниже при мокрой обработке;
- мокрая обработка по сравнению с сухой обработкой повышает энергоёмкость дезинтегрирования в 1,5 раза и увеличивает износ роторов на 20-30 %.

Таблица 6

Свойства твердеющих смесей на комплексном вяжущем при различной тонкости помола

Компоненты смеси, кг/м³				Растекаемость, см	Предельное напряжение сдвига, Па		Водоотделение, % за 1,5 ч	Плотность закладки, кг/м³	Прочность, МПа, возраст, с		
Цемент	Граншлак	ПГС	Вода		Без гравия	ПГС			14	28	
Тонкость 57 %											
80	370	1371	330	17,5	25	76	5	1970	3,5	6,2	
Тонкость 52 %											
80	370	1291	360	20	69	102	7	2900	3,05	5,35	
80	370	1371	330	18	89	124	5,2	1996	3,3	5,7	
Тонкость 41 %											
80	370	1291	350	20,5	74	113	9,1	2000	2,5	4	
80	370	1371	330	17,5	83	130	7,5	2010	2,7	4,4	
Тонкость 40 %											
80	370	1291	360	20	80	130	9,2	1990	2,3	3,8	
80	370	1371	330	18	91	135	7,7	2005	2,45	4,06	

Для оценки зависимости свойств твердеющих смесей от интенсивности перемешивания граншлак активировали в дезинтеграторе Д-27 при скорости 30 м/с (табл.7-8).

Таблица 7

Составы смеси на граншлако-портландцементном вяжущем

Компоненты смеси, кг /м³				Растекаемость, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Водоотделение, % за 1,5 ч	Плотность, кг/м³	Прочность, МПа, возраст, с			
Цемент	Граншлак	ПГС	Вода					7	14	28	60
Двойная мокрая обработка граншлака											
80	370	1358	325	20	115	4,9	1925	1,5	3,1	5,8	8,5
60	390	1345	320	20	113	4,2	1910	1,52	2,75	4,7	7
40	410	1332	315	20	121	4,1	1915	0,9	2,1	3,6	4,8
Двойная совместная мокрая обработка граншлака и цемента											
80	370	13138	325	20	106	3,8	1905	1,3	2,9	5,6	8,3
60	390	1345	320	20	112	3,5	1900	1,1	2,6	4,9	7,2
40	410	1332	315	20	119	3,4	1900	0,9	2,4	3,8	4,9

Таблица 8

Составы смеси на золошлако-портландцементном вяжущем

Компоненты смеси, кг /м ³					Растекаемость, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Водоотделение, % за 1,5 ч	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа, возраст, с			
Цемент	Золошлак	Высевки	ПГС	Вода					7	14	28	60
Мокрая обработка												
180	370	—	1319	325	13,5	166	2,9	1925	2,9	3,9	4,8	7,8
140	390	—	1306	320	12,8	181	2,2	1910	1,6	2,3	3,1	5,4
100	350	—	1293	315	12,5	190	3,2	1915	1	1,5	2,3	3,1
Совместная мокрая обработка золошлака и цемента												
180	270	—	1319	325	12	218	3,8	1905	2,4	3,4	4,2	7,5
140	310	—	1306	320	13	169	3,5	1900	1,3	2,1	2,8	4,7
100	350	—	1293	315	12,5	198	3,4	1900	0,9	1,3	2,1	2,9
Совместная мокрая обработка всех компонентов												
180	270	1117	—	400	14,5	89	2	1615	1,7	2,5	3,7	6,5
140	310	1104	—	400	16	126	3,1	1620	1,2	1,7	2,5	4,7
100	350	1090	—	40	16,8	106	2,8	1625	0,9	1,3	1,9	3,3

Смеси равного состава перемешивали с различной интенсивностью: в дезинтеграторе и вручную (табл.9).

Таблица 9

Составы твердеющей смеси с перемешиванием

Компоненты смеси, кг/м³				Растекаемость, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Водоотделение, % за 1,5 ч	Плотность, кг /м³	Прочность, МПа, возраст, с			
Цемент	Граншлак	ВЦК	Вода					7	14	28	60
Интенсивное перемешивание в дезинтеграторе Д-27											
80	370	1165	404	15,5	143	4,2	1925	1,1	2,5	3,9	7,3
60	390	1165	404	16,5	136	6,3	1900	0,9	2	3,2	6
40	410	1161	404	17,5	101	6,5	1875	0,7	1,6	2,6	5,1
60	340	1218	401	18,5	86	6	1880	1	2,3	3,1	5,3
60	240	1327	395	18,2	94	5,2	1840	0,8	1,6	2,3	4,1
60	140	1434	390	17	102	4,6	1855	0,5	0,9	1,3	2,3
Перемешивание вручную											
80	370	—	425	19,5	96	8,8	1830	—	2,2	3,4	4,9
60	390	—	425	18,5	106	9	1855	—	1,9	2,8	4,1
40	410	—	425	18,5	112	8	1890	—	1,4	2,1	3,2
60	340	1117	418	16,5	184	7,8	1890	—	2,1	3,1	4,8
60	240	1104	412	15,5	201	7,4	1890	—	1,4	2,1	3,2
60	140	1090	406	15	214	7	1875	—	0,8	1,1	1,7

Примечание. ВЦК – высевки щебня каменного.

Результаты экспериментов позволяют сделать выводы:

- интенсивным перемешиванием твердеющей смеси на базе ВЦК в дезинтеграторе расход цемента может быть уменьшен с 60 до 50 кг/м³;

Схема активации твердеющих смесей при изготовлении и транспортировании

1 – камера блока; 2 – вибраторы; 3 – закладочный трубопровод;
4 – смеситель; 5 – вибромельница; 6 – дезинтегратор;
7 – бункер доменного шлака; 8 – активированная вода затворения; 9 – виброгрохот инертных заполнителей;
10 – конвейер; 11 – бункер цемента

- с уменьшением расхода граншлака при одном и том же расходе цемента прочность твердеющей закладки снижается независимо от интенсивности перемешивания;

- минимальный расход комплексного вяжущего при мелком заполнителе на основе ВЦК составляет 400 кг/м³.

Повышение активности твердеющих смесей осуществляется в процессе приготовления и транспортирования твердеющих смесей (см. рисунок).

Для получения активной фракции шлаковых заменителей цемента применяют дезинтеграторы, использующие силы инерции материалов при высоких скоростях вращения с достижением более высоких показателей активности с меньшими затратами энергии.

В дезинтеграторе закладочного комплекса месторождения Шокпак в Северном Казахстане в течение семи лет гранулированный шлак активировали с суммарной линейной встречной скоростью до 450 м/с. Обработка в дезинтеграторе позволяет из гранулированного шлака крупностью 20 мм получить вяжущее 50 % по объему крупностью 0,076 мм.

Тонкость помола в дезинтеграторе 40-60 % выхода активной фракции обеспечивалась при размоле доменного гранулированного шлака марки К-0,8 и

золошлака с суммарной встречной скоростью около 100 м/с. Данные о свойствах твердеющей смеси сведены в табл.10.

Таблица 10

Прочность твердеющей смеси на основе активированного шлака

Расход компонентов, кг/м ³					Напряжение сдвига, МПа	Прочность в 28 с, МПа
Цемент	Шлак	Песок	Суглинок	Вода		
40	—	1490	—	400	6	0,2
60	—	1470	—	400	11	0,3
80	—	1455	—	400	12,6	0,4
100	—	1440	—	400	9	0,7
120	—	1423	—	400	12,5	1,1
150	—	1400	—	400	12,5	1,3
180	—	1426	—	400	13	1,2
200	—	1360	—	400	9,5	2,6
140	—	941	235	500	48	0,8
160	—	928	231	500	29	0,8
180	—	915	228	500	47	1
200	—	982	225	500	37	1,5
220	—	890	222	500	27	1,8
140	—	524	522	550	30	0,8
160	—	516	514	550	27	0,3
180	—	507	505	550	50	1
200	—	500	497	550	38	1,5
140	—	—	660	700	20	0,4
160	—	—	643	700	10	0,4
180	—	—	630	700	10	0,6
200	—	—	610	700	10	1,2
30	300	1375	—	380	12	0,6
30	270	1405	—	380	11,5	0,56
30	250	1425	—	380	11,5	0,62
30	220	1455	—	380	11	0,46
60	250	1395	—	380	12,5	0,65
60	190	455	—	380	11,5	0,53

Полученные результаты могут быть востребованы при выборе и обосновании систем разработки рудных месторождений с закладкой [13-16].

Выводы.

1. Концепция гуманизации отношения к недрам в качестве приоритетного направления включает в себя использование в горном производстве закладочных твердеющих смесей для повышения качества добываемого сырья и уменьшения нагрузки на окружающую среду.
2. Компонентами закладочных твердеющих смесей может быть большинство отходов горного производства и смежных отраслей.
3. Активность ингредиентов твердеющих смесей адекватно повышается обработкой в дезинтеграторах, что позволяет управлять качеством закладочного массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолович О.В. Композиционные закладочные материалы с добавкой из механоактивированных отходов обогащения / О.В.Ермолович, Е.А.Ермолович // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. Вып. 3. С. 24-30.
2. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района / П.С.Гузанов, А.Э.Лытнева, А.Н.Анушенков, Е.П.Волков // Горный журнал. 2015. № 6. С. 85-88.
3. Каплунов Д.Р. Комплексное освоение недр / Д.Р.Каплунов, В.В.Мельник, М.В.Рыльникова. Тула: Тульский государственный университет, 2016. 333 с.
4. Обоснование целесообразности применения твердеющих закладочных смесей на рудниках Талнаха / В.Б.Вильчинский, А.В.Трофимов, А.Б.Корейво, Р.Б.Галаов, В.П.Марысюк // Цветные металлы. 2014. № 9. С. 23-28.

5. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд / В.И.Голик, Ю.И.Разоренов, С.Г.Страданченко, З.М.Хашева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 6-14.
6. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения-2014): Материалы международного совещания, 16-19 сентября 2014 г. Алматы: АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», 2014. 624 с.
7. Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике / Л.А.Крупник, Ю.Н.Шапошник, С.Н.Шапошник, Г.Т.Нуршайыкова, З.К.Тунгушбаева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1. С. 84-91.
8. Doifode S.K. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment / S.K.Doifode, A.G.Matani // International Journal of Chemical and Physical Sciences. 2015. Vol. 4. Special Issue. P. 536-540.
9. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies / V.Golik, V.Komashchenko, V.Morkun, V.B.Zaalishvili // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. Iss. 4. P. 325-329.
10. Khasheva Z.M. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian caucasus / Z.M.Khasheva, V.I.Golik // International Business Management. 2015. Vol. 9. Iss. 6. P. 1210-1216. DOI: 10.36478/ibm.2015.1210.1216
11. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resources Policy. 2012. Vol. 37. Iss. 1. P. 104-108. DOI: 10.1016/j.resourpol.2011.11.002
12. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes / D.M.Franks, D.V.Boger, C.M.Cote, D.R.Mulligan // Resources Policy. 2011. Vol. 36. Iss. 2. P. 114-122. DOI: 10.1016/j.resourpol.2010.12.001
13. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes / Bian Zhengfu, Miao Xiexing, Shaogang Lei, Chen Shenen, Wang Wenfeng, Struthers Sue // Science. 2012. Vol. 337. № 6095. P. 702-703. DOI: 10.1126/science.1224757
14. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V.Golik, V.Komaschenko, V.Morkun, Z.Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. Iss. 5. P. 401-405.
15. The history of Russian Caucasus ore deposit development / V.I.Golik, Yu.I.Razorenov, V.N.Ignatov, Z.M.Khasheva // The Social Sciences (Pakistan). 2016. Vol. 11. Iss. 15. P. 3742-3746. DOI: 10.36478/science.2016.3742.3746
16. Vrancken C. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production / C.Vrancken, P.J.Longhurst, S.T.Wagland // Waste Management. 2017. Vol. 61. P. 40-57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019

Авторы: **В.И.Голик**, д-р техн. наук, профессор, v.i.golik@mail.ru (Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия), **Ю.В.Дмитрак**, д-р техн. наук, профессор, ректор, dmitrak@yandex.ru (Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия), **В.И.Комашченко**, д-р техн. наук, профессор, komashchenko@inbox.ru (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия), **Н.М.Качурин**, д-р техн. наук, профессор, ecology_tsu_tula@mail.ru (Тулский государственный университет, Тула, Россия).

Статья поступила в редакцию 16.12.2018.

Статья принята к публикации 02.12.2019.