

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД И АЛМАЗОВ В ОТВАЛЬНЫХ ХВОСТАХ ОБОГАЩЕНИЯ

В.А.Чантурия

ФГБУ Институт проблем комплексного освоения
недр РАН

Г.П.Двойченкова

ФГБУ Институт проблем комплексного освоения
недр РАН

О.Е.Ковальчук

НИГП АК «АЛРОСА»

А.С.Тимофеев

ФГБУ Институт проблем комплексного освоения
недр РАН

Отвальные хвосты алмазоизвлекающих фабрик представляют собой техногенные алмазосодержащие месторождения, из которых в полном объеме не извлечены мелкие кристаллы крупностью -2 мм, что делает актуальной проблеме технологической оценки целесообразности вовлечения их в повторную переработку для получения дополнительного количества алмазов и снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

Основной метод обогащения алмазосодержащего сырья в действующих технологических схемах – тяжелосредная сепарация, позволяющая сформировать для последующего обогащения продуктивную тяжелую фракцию, содержащую алмазы и тяжелые минералы, а также вывести из процесса легкие минералы.

Изучение обогатимости отвальных хвостов алмазоизвлекающих фабрик [6] показало, что основным фактором, обуславливающим целе-

Проанализированы закономерности и установлена равномерность распределения в гранулометрических классах крупности минералов тяжелой фракции по глубине залегания хвостовых отвалов. По результатам изучения свойств алмазов отвальных хвостов обогащения алмазосодержащих руд обоснована необходимость применения методов предварительной подготовки кристаллов для последующего их извлечения процессами рентгенолюминесцентной, липкостной и пенной сепараций.

Ключевые слова: минералогия, алмаз, кимберлит, фракция, месторождение, отвальные хвосты.

сообразность их повторной переработки, является высокое содержание тяжелой минеральной фракции, максимально сконцентрированной в интервале 0,5–8 м по глубине залегания хвостовых отвалов.

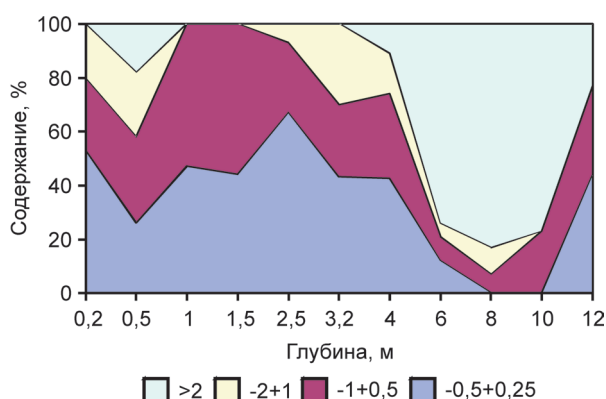


Рис. 1. Среднее распределение гранулометрических классов крупности тяжелой фракции по глубине разреза скважин

1. Результаты минералогического анализа продуктивных пластов, г/т

Минералы	Глубина залегания исследуемых проб, м						
	0,2	0,5	4,5	5,0	6,5	8,0	12,0
Выход тяжелой фракции	42,3	699,2	914,8	7085,0	21 186,1	5666,0	508,0
Выход магнитной фракции	0,7	37,8	36,6	92,1	720,3	147,3	30,8
Магнетит	Сл.	19,6	19,2	28,3	105,9	73,7	12,8
Ильменит	0,6	18,2	17,4	63,8	614,4	73,7	18,1
Гранат (альмандин)	33,8	558,6	769,3	4860,3	7245,6	2447,7	180,7
Клинопироксен	Ед. зн.	-	-	-	Ед. зн.	-	11,7
Слюда	0,1	2,8	1,8	70,9	21,2	56,7	Ед. зн.
Амфибол	0,2	1,4	6,4	205,5	360,2	158,6	330,6
Эпидот	-	Сл.	Ед. зн.	-	Ед. зн.	-	313,6
Апатит	0,2	63,6	50,3	99,2	550,8	73,7	2,1
Циркон	Сл.	Сл.	Сл.	Сл.	Сл.	Сл.	Ед. зн.
Рутил	0,1	5,6	8,2	49,6	63,6	28,3	3,2
Лейкоксен	Сл.	Сл.	0,9	Сл.	21,2	Сл.	1,1
Сфен	Сл.	0,7	Сл.	7,1	Ед. зн.	5,7	3,2
Пирит, марказит	1,1	8,4	12,8	148,8	169,5	124	1,1
Сульфаты (барит)	-	-	-	7,1	-	5,7	-
Сидерит	-	-	-	-	8877,0	1456,2	45,7
Карбонаты (кальцит)	Сл.	4,2	5,5	Сл.	21,2	Сл.	7,4
Обломки пород	6,2	-	13,7	1069,8	2182,2	7479	120,1
Пироп	20	14,7	8,2	347,2	847,4	238,0	7,4
Пироп-альмандин	-	Ед. зн.	Ед. зн.	28,3	21,2	28,3	Ед. зн.
Хромдиопсид	-	6	8	22	15	14	-
Хромшпинелид	Ед. зн.	1,4	0,9	92,1	84,7	96,3	Ед. зн.

С учетом вышеизложенного проведен цикл исследований технологических свойств тяжелой минеральной фракции отвальных хвостов обогащения алмазосодержащего сырья как основного материала для извлечения алмазных кристаллов. Эксперименты осуществлены в лабораториях НИГП АК «АЛРОСА» и ИПКОН РАН. Изучены основные свойства тяжелой фракции:

ее гранулометрический, минеральный и химический составы;

закономерности распределения гранулометрических классов и минеральных компонентов в них по глубине залегания тяжелой фракции;

технологические свойства алмазных кристаллов хвостовых продуктов обогащения.

Гранулометрический состав тяжелой минеральной фракции исследован по глубине ее залегания с применением методики изучения узких классов крупности [6]. Из представленных на рис. 1 данных видно, что средний гранулометрический состав минералов тяжелой фракции характеризуется относительным постоянством их распределения. На глубине залегания от 0,1 до 4,0 м доминируют мелкие классы -0,5+0,25 и -1+0,5 мм при содержании 54 и 51% соответственно. В интервале залегания ниже 4,0 м увеличивается количество минералов крупнее 2,0 мм, содержание которых на глубине 8,0 м составляет 86%. Гранулометрическая характеристика минералов с глу-

бин ниже 12 м аналогична таковой верхних слоев разреза.

Минеральный и химический составы тяжелой фракции отвальных хвостов изучены методами рентгенографического анализа и термографии с использованием дифрактометра DMAX 2400 японской фирмы «Rigaku» и дериватографа Derivatograph-C венгерской фирмы MOM. Минералогическими исследованиями определен минеральный состав тяжелой фракции хвостовых отвалов алмазоизвлекающей фабрики по глубине их разрезов (табл. 1). Из представленных данных следует, что выход тяжелой фракции колеблется от 0,5 до 56 кг/т, при среднем значении 5,2 кг/т.

В соответствии с ранее полученными результатами [6] тяжелая фракция преимущественно сконцентрирована в глинисто-алевритовых среднезернистых пластах, залегающих на глубине от 0,5 до 8 м и выделяемых в качестве продуктивных для повторной переработки хвостовых отвалов алмазоизвлекающей фабрики. Среднее содержание минералов тяжелой фракции на этой глубине 6,0 кг/т.

В составе тяжелой фракции диагностирован ряд минералов, обладающих магнитными свойствами, что необходимо учитывать при создании схемы повторной переработки. Выход магнитной фракции варьирует от 0,7 г/т в верхних продуктивных слоях до 700 г/т на глубине 7 м при среднем содержании 150 г/т.

Установлено среднее распределение основных минералов в продуктивных пластах (табл. 2). В тяжелой фракции исследуемых проб преобладают флогопит и гранаты, при этом максимальное количество последних зафиксировано в нижней части разреза. Кроме того, в состав фракции входят сидерит, магнетит, пирит и родохрозит, содержание которых увеличивается в подошвенной части отвальных хвостов. В нижней части разреза появляются хромшпинелид и хромит.

Впервые изучены закономерности распределения диагностированных минералов по гранулометрическим классам крупности тяжелой фракции хвостовых отвалов обогащения алмазосодержащего сырья (рис. 2). Тяжелая фракция представлена тремя гранулометрическими

2. Среднее распределение основных минералов в продуктивных пластах, вес. %

Минералы	Глубина, м						
	0,2	0,5	1	2	3,5	5	8
Гранат	28	16	30	8	38	31	41
Пирит	5	3	2	2	1	3	13
Сидерит	3	2	3	3	3	8	1
Ильменит	0	0	0	0	0	0	2
Пироксен	15	5	31	46	9	9	0
Флогопит	30	51	21	33	26	17	3
Лимонит	0	10	0	0	0	0	0
Родохрозит	2	0	2	2	15	24	28
Хромит	0	0	0	0	1	3	0
Магнетит	17	13	11	6	7	5	8
Хромшпинелид	0	0	0	0	0	0	4

классами крупности: -0,5+0,25 мм, -1+0,5 мм, -2+1 мм. Основное количество флогопита и граната присутствует во фракциях -1+0,5 и -0,5+0,25 мм. В более крупном классе -2+1,0 мм сосредоточены ильменит и хромит при небольших концентрациях граната и лимонита.

Содержание в образцах тяжелой минеральной фракции макрокомпонентов по данным химического анализа приведено в табл. 3. Экспериментальными и аналитическими исследованиями установлено соответствие химического состава пород отвальных продуктов основному кимберлитовому. Колебания содержаний компонентов по глубине залегания тяжелой фракции отвальных хвостов обусловлены разной степенью карбонатизации и хлоритизации пород. Пробы, отобранные на глубине 0,2 м, представлены алевритистой глиной [6] и характеризуются повышением содержания SiO₂ до 62 и Al₂O₃ до 17% при понижении CaO до 1,7, MgO до 3,5 и CO₂ до 1,7% по сравнению с пробами из более глубоких разрезов – алеврито-глинистыми песками.

Таким образом, проведенными исследованиями выявлено равномерное распределение тяжелой фракции хвостовых отложений как по гранулометрическому составу классов крупности, так и по содержанию в них минеральных компонентов по глубине разреза.

3. Средний химический состав проб тяжелой фракции отвальных хвостов по глубине залегания разреза, вес. %

Компоненты	Глубина, м						
	0,2	0,5	4,5	5	6,5	8	12
SiO ₂	61,79	33,64	27,61	38,5	35,37	31,55	33,57
TiO ₂	1,08	0,55	0,48	0,62	0,55	0,5	0,55
Al ₂ O ₃	16,29	6,4	5,16	7,49	6,22	5,18	6,4
Fe ₂ O ₃	3,21	2,27	2,57	2,55	3,2	2,44	3,74
FeO	1,39	2,7	2,47	2,51	3,34	3	3,59
MnO	0,02	0,09	0,11	0,08	0,1	0,11	0,13
MgO	3,46	20,77	22,11	16,69	18,86	20,4	23,5
CaO	1,75	10,95	14,19	10,58	10,45	12,91	7,82
Na ₂ O	0,14	0,1	0,08	0,12	0,09	0,08	0,09
K ₂ O	1,49	0,9	0,73	0,71	0,65	0,56	0,58
P ₂ O ₅	0,1	0,25	0,39	0,24	0,25	0,33	0,89
H ₂ O ⁻	1,32	1,18	1,16	1,35	1,52	1,1	1,92
H ₂ O ⁺	5,82	5,32	5,78	5,19	5,85	4,85	7,64
CO ₂	1,66	14,39	16,62	12,87	12,91	16,23	8,95
SO ₃	0,37	0,25	3	0,29	0,32	0,41	0,35
Сумма	99,89	99,76	99,76	99,79	99,68	99,65	99,72
ППП	9,06	2125	22,87	19,61	20,67	22,15	18,53

Как известно [2, 8], выбор обогатительных процессов и оборудования для переработки алмазосодержащего сырья обусловлен высокой плотностью алмазов (по сравнению с основной массой вмещающих пород и минералов), их естественной гидрофобностью, способностью люминесцировать при рентгеновском облучении, а также необходимостью обеспечения максимальной степени сохранности кристаллов при дезинтеграции руд.

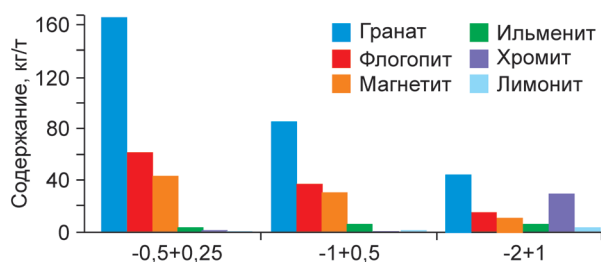


Рис. 2. Среднее распределение основных минералов по классам крупности тяжелой фракции

Для изучения технологических свойств алмазных кристаллов рассмотрены интенсивность их люминесценции и степень гидрофобности поверхности, которые лежат в основе рентгенолюминесцентной (РЛС), липкостной (ЛС) и пенной (ПС) сепараций. Названные методы наиболее широко применяются при извлечении алмазов класса -2 мм, составляющих основные потери с отвальными хвостами обогащения [3].

В лабораториях НИГП АК «АЛРОСА», ИПКОН РАН, ИГЕМ РАН изучена коллекция алмазов, выделенных из алмазосодержащих хвостов, в целях оценки возможности их извлечения методами РЛС, ЛС и ПС. Внешний вид алмазов и интенсивность их люминесценции по сравнению с кристаллами из концентратов основных операций РЛС представлены на рис. 3, 4.

Экспериментальными исследованиями выявлены основные типы алмазов хвостовых отложений, физико-химические свойства которых не позволяют эффективно их извлекать указанными методами:

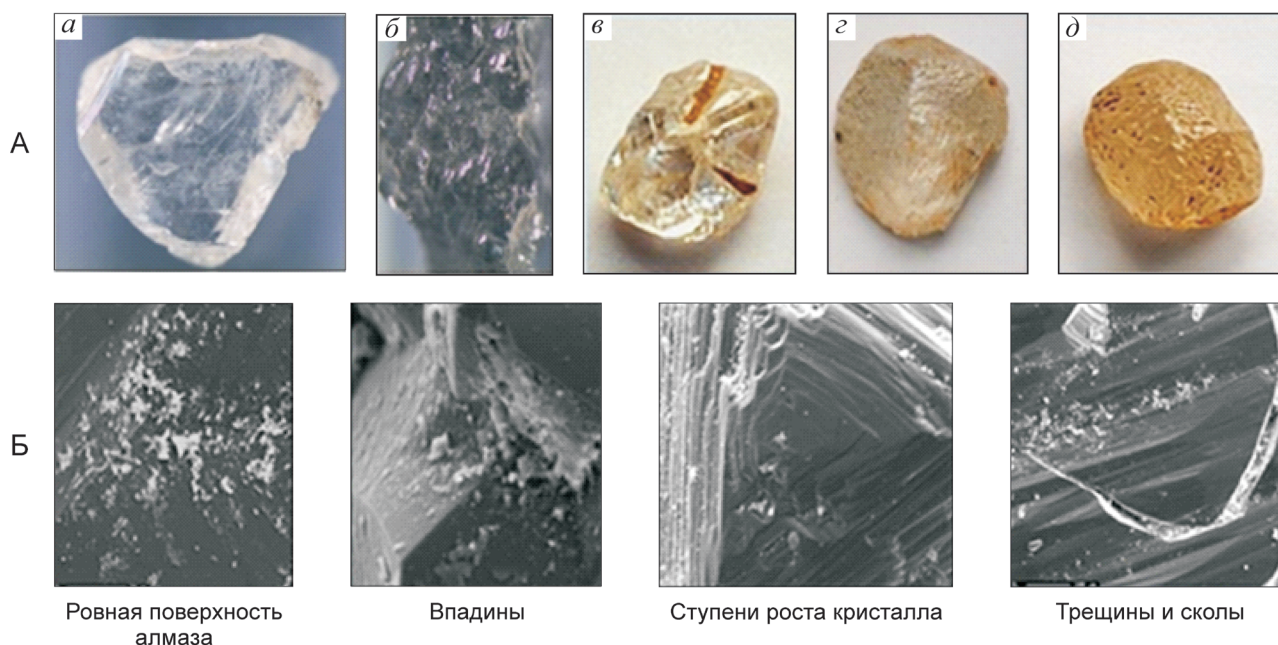


Рис. 3. Внешний вид (А) и распределение примесей на поверхности алмазов (Б)

алмазы с чистой поверхностью (см. рис. 3, А, а, б), но пониженной природной интенсивностью люминесценции (см. рис. 4, спектры 3, 4);

алмазы, покрытые минеральными образованиями в виде тонкого слоя тонкодисперсных глинистых минералов (см. рис. 3, А, в–д), снижающих интенсивность люминесценции кристаллов (см. рис. 4, спектр 2) и степень гидрофобности их поверхности [2, 3, 8].

Методами оптической и электронной микроскопии установлено, что состав минеральных фаз на поверхности кристаллов, извлеченных из отвальных хвостов обогащения, аналогичен образованиям, диагностированным на гидрофильных алмазах [1, 5]. Анализ снимков поверхности алмазных зерен показывает, что минеральные образования концентрируются вблизи нарушений геометрически неоднородной поверхности и представлены макрообразованиями толщиной до десятков микрон, микрообразованиями толщиной не более десятков и сотен нанометров, а также пленками с линейным размером до нескольких миллиметров и толщиной до 150 нм (см. рис. 3, Б).

С учетом ранее выполненных исследований фазового состава природных алмазов [1–5, 7, 8]

и новых экспериментальных данных, полученных при изучении свойств кристаллов, извлеченных из отвальных хвостов обогащения кимберлитовых руд, определены основные различия структурно-химических свойств и фазового состава поверхности гидрофобных и гидрофильных алмазов.

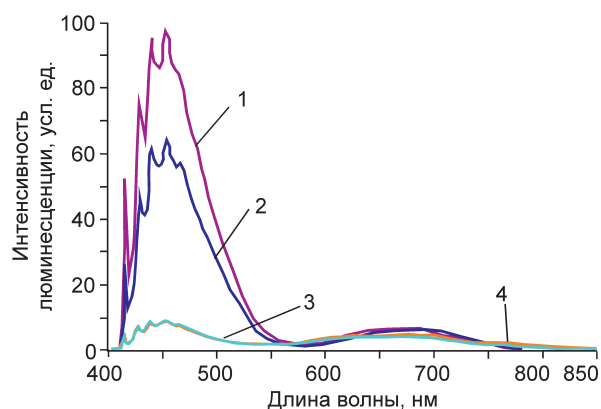


Рис. 4. Интенсивность люминесценции алмазов:

1 – алмазы из концентратов РЛС (эталон сравнения); алмазы хвостовых отложений: 2 – с минеральными примесями на поверхности, 3, 4 – чистые кристаллы с пониженной природной интенсивностью люминесценции

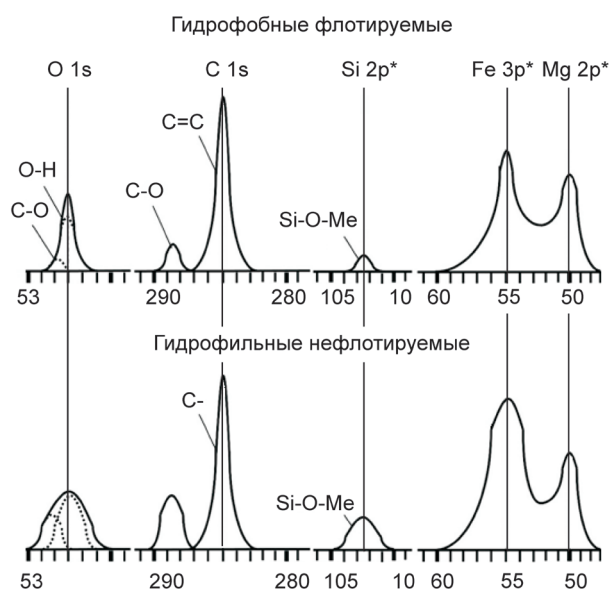


Рис. 5. Спектры РФС поверхности алмазов

Результаты исследований поверхности алмазов с применением методов ОЖЕ- и рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФС) приведены на рис. 5 и в табл. 4, 5. На алмазах с гидрофильной поверхностью кислород в основном связан с гидроксидами Fe, Mg и Ni, а на алмазах с гидрофобной поверхностью O, Mg и Si образуют серпентин. Минеральные образования на гидрофильных алмазах представлены пленкой гидросиликатов Mg глубиной $>50\text{\AA}$, занимающей до 60% площади алмаза. На гидрофобных алмазах сигнал от углерода расположен в области $290,5 \pm 0,3$ эВ, что соответствует нейтральным образованиям типа молекул CO_2 . На гидрофильных алмазах указанный сигнал не выходит за пределы $289,5 \pm 0,3$ эВ, что характерно для анионных группировок типа CO_2^- . Кроме того, гидрофобные алмазы покрыты слоем газа CO_2 и радикалами HCO_3^- , а гидрофильные – слоем карбонатов. Площадь пленок на поверхности гидрофобных алмазов в

три раза меньше, чем на гидрофильных. Поверхность гидрофильных алмазов дополнительно исследована методом ИК-спектроскопии. В спектрах основной массы кристаллов зафиксированы резкие дополнительные полосы в областях 670 , 1010 и 3675 см^{-1} (рис. 6).

На основании результатов идентификации полученных спектров сделан вывод о преимущественно силикатной природе минеральных образований на поверхности исследуемых алмазов. По характеру расположения линий в спектрах определено присутствие силикатных минералов аналогичных тальку, которым, как правило, соответствуют две резкие полосы в областях 1000 и 600 см^{-1} . Спектр талька имеет характеристическую полосу в области 1010 см^{-1} , ответственную за колебания Si-O связи.

Итак, состав и свойства тяжелой фракции отвальных хвостов алмазоизвлекающих фабрик позволяют отнести их к разряду техногенных месторождений, в которых основной массе алмазных кристаллов свойственны высокая степень гидрофилизации и, соответственно, снижение гидрофобных свойств их поверхности.

Для обеспечения эффективного извлечения алмазных кристаллов в технологических процессах повторной переработки хвостовых продуктов обогащения алмазосодержащего сырья рекомендуются:

проведение контрольных операций обогащения с использованием в качестве разделительного признака дополнительных контрастных свойств алмазных кристаллов и породообразующих минералов для извлечения алмазов с пониженной природной интенсивностью люминесценции;

предварительная очистка поверхности алмазов от вторичных минеральных образований для восстановления нормальной интенсивности люминесценции кристаллов перед процессами рентгенолюминесцентной сепарации;

4. Характеристика минеральных образований на поверхности алмазов

Элементы, % атомн.					C/O	Площадь распространения пленки, %	Глубина проникновения пленки, нм
Si	Fe	Mg	C	O			
1,1–6,4	2,7–5,8	0,9–8,1	44,5–82,5	12,9–36,2	1,3–2,6	70–75	180

5. Структурно-химические особенности интегральной поверхности гидрофильных и гидрофобных алмазов на глубине 50Å

Поверхность, элемент	Аналитическая линия	Энергия связи, эВ	Интенсивность, имп/сек	Концентрация, ат. %	Соединение
<i>Гидрофильные алмазы</i>					
C ₁	1s	282,1	1,1·10 ⁴	4,0	SiC
C ₂	1s	284,7	1,3·10 ⁵	70,8	C ₀
O ₁	1s	530,3	2,7·10 ⁴	5,8	Oxides
O ₂	1s	532,8	4,8·10 ³	1,0	Сорбированный
F	1s	685,5	4,5·10 ⁴	3,6	CaF ₂ +NiF ₂ +MgF ₂
Mg	2s	89,5	9,6·10 ³	4,5	Mg(OH) ₂ +MgF ₂
Si ₁	2p	100,1	7,1·10 ³	3,8	SiC
Si ₂	2p	103,6	2,1·10 ³	1,1	SiO ₂
Ca	2p3/2	347,9	4,6·10 ³	0,6	CaF ₂
Fe	2p3/2	711,2	4,0·10 ⁴	3,0	FeOOH
Ni ₁	2p3/2	856,0	2,9·10 ⁴	1,4	Ni(OH) ₂
Ni ₂	2p3/2	858,2	9,1·10 ³	0,4	NiF ₂
<i>Гидрофобные алмазы</i>					
C ₁	1s	284,6	1,6·10 ⁵	68,0	C ₀
C ₂	1s	287,8	2,7·10 ³	1,2	(CH ₂ C(CH ₃)C(O)CH ₃) _n
O ₁	1s	529,8	3,2·10 ⁴	5,2	Силикаты, гидраты
O ₂	1s	532,1	2,8·10 ⁴	4,6	
F	1s	684,7	2,6·10 ⁴	2,8	CaF ₂
Mg	2p	89,6	1,1·10 ⁴	5,9	Mg ₅ [SiO ₄] ₃ (OH) ₄
Si	2p	102,8	9,3·10 ³	3,7	Mg ₅ [SiO ₄] ₃ (OH) ₄
Ca	2p3/2	347,8	6,8·10 ³	1,4	CaF ₂
Fe	2p3/2	711,6	8,3·10 ⁴	5,1	FeOOH
Ni	2p3/2	856,4	5,8·10 ⁴	2,1	Ni(OH) ₂

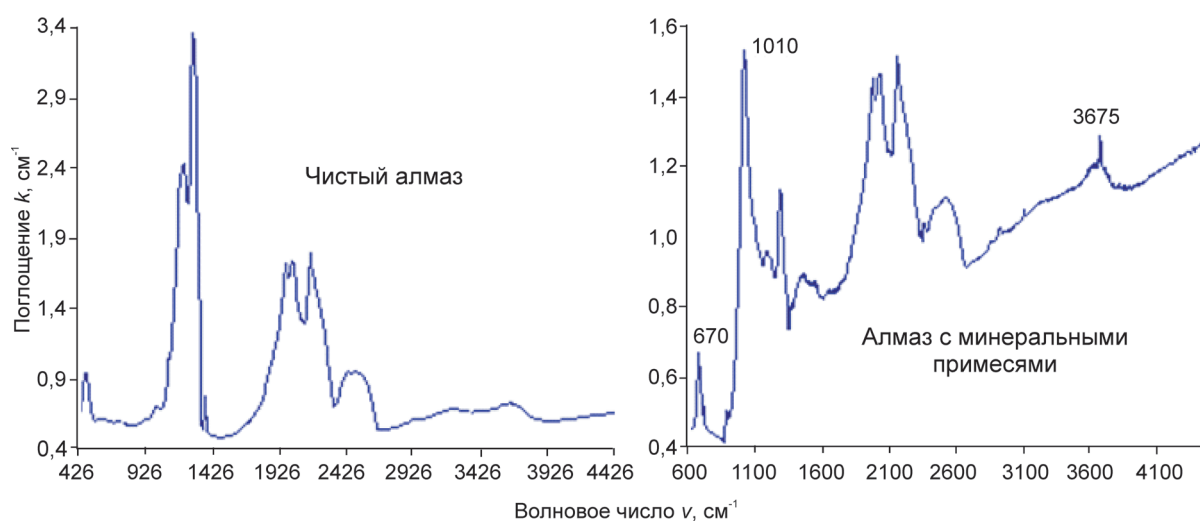


Рис. 6. ИК-спектры поглощения поверхности алмазов

предварительная активация (очистка от гидрофильных примесей) поверхности алмазных кристаллов для восстановления ее гидрофобных свойств перед процессами липкостной и пенной сепараций.

Работа выполнена при поддержке научной школы НШ 74820145 под руководством академика РАН В.А.Чантурия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двойченкова Г.П. Формирование минеральных образований на поверхности природных алмазов и метод их деструкции на основе электрохимически модифицированных минерализованных вод // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 4. С.159–171.
2. Механизм пассивации и активации поверхности алмазов при переработке алмазосодержащих руд / В.А.Чантурия, Э.А.Трофимова, Ю.П.Диков и др. // Обогащение руд. 1999. № 3. С. 36–39.
3. Связь поверхностных и технологических свойств алмазов при обогащении кимберлитов / В.А.Чантурия, Э.А.Трофимова, Ю.П.Диков и др. // Горный журнал. 1998. № 11–12. С. 52–56.
4. Чантурия В.А., Горячев Б.Е. Обогащение алмазосодержащих кимберлитов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. – М.: Руда и металлы, 2008.
5. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Структурно-химическая характеристика тонкодисперсных минеральных примесей на поверхности алмазов и эффективность их деструкции про-

дуктами электролиза воды // Горный журнал. 2014. № 1. С. 19–23.

6. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е., Тимофеев А.С. Особенности минералогического состава и распределения минеральных компонентов в отвальных хвостах обогащения алмазосодержащего сырья // Руды и металлы. 2014. № 4. С. 67–73.
7. Экспериментальная оценка эффективности использования продуктов электролиза воды для направленного изменения заряда поверхности природных алмазов / В.А.Чантурия, Г.П.Двойченкова, И.Ж.Бунин и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С.151–160.
8. Surface properties of diamonds in kimberlites processing / V.Chanturiya, V.Zuev, E.Trofimova et al. // XXI International Mineral Processing Congress. Rome. 2000.Vol. B. P. 9–16.

Чантурия Валентин Алексеевич,
академик РАН, доктор технических наук
vchan@mail.ru

Двойченкова Галина Петровна,
кандидат технических наук
dvoigp@mail.ru

Ковальчук Олег Евгеньевич,
kovalchukoe@alrosa.ru

Тимофеев Александр Сергеевич,
timofeev_ac@mail.ru

INDICATOR MINERALS OF DIAMONDIFEROUS KIMBERLITE IN CONCENTRATOR TAILINGS: TECHNOLOGICAL PROPERTIES

V.A.Chanturiya,
G.P.Dvoychenkova,
O.E.Kovalchuk,
A.S.Timofeeva

The regularity were investigated and the equitability of the minerals of heavy residue in the granulometric classes was determined through the depth of the stocker tails. The necessity of the preliminary preparation methods application was proved for the further recovery of diamonds by means of X-ray luminescent separation, grease table processing, and froth separation.

Key words: mineralogy, diamond, kimberlite, granulometric class, concentrator tailing.