

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.765.5

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КИМБЕРЛИТОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ТЕХНОГЕННЫМИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫМИ ВОДАМИ

**В. А. Чантурия, М. В. Рязанцева, Г. П. Двойченкова,
В. Г. Миненко, Е. В. Копорулина**

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
E-mail: ryzanceva@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Структурно-химические преобразования поверхности основных породообразующих минералов кимберлита (кальцит, оливин, серпентин), обусловленные контактом с природными и техногенными минерализованными водами, а также продуктами их электрохимической обработки, исследованы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), аналитической растровой электронной (РЭМ–РСМА) и атомно-силовой (АСМ) микроскопий. Установлено, что при контакте с кимберлитовой вытяжкой и оборотной водой поверхность кальцита подвергается химической модификации, которая заключается в адсорбции углеводородных загрязнений, хлор- и кремнийсодержащих соединений, большая часть которых удаляется при взаимодействии с продуктом электрохимической подготовки оборотной воды. Изменения структурно-химических свойств поверхности породообразующих силикатов, помимо процессов адсорбции – десорбции органических соединений, связаны также с искажением (разрыхлением) структуры наноразмерного слоя вследствие выщелачивания Mg, Fe, Si и карбонатизацией поверхности.

Кальцит, оливин, серпентин, поверхность, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электрохимическая водоподготовка минерализованных водных систем

Около 29 % мировой добычи алмазов приходится на Россию, из которых 98 % извлекается на предприятиях АК “АЛРОСА” [1, 2]. Алмазодобывающая отрасль, несмотря на уникальность конечной продукции, сталкивается с типичными для горнодобывающей промышленности проблемами: ограниченностью запасов и ухудшением качества алмазосодержащего сырья, что обуславливает необходимость увеличения глубины его переработки, в первую очередь за счет повышения эффективности процессов сепарации [3, 4].

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН “Наночастицы: механизмы образования в геосистемах и методы их извлечения” в рамках проекта “Нанообразования на поверхности алмазов и породообразующих минералов в процессах разделения минерального сырья”

Опыт работы алмазоизвлекающих фабрик АК “АЛРОСА” показывает следующее: основные потери ценного компонента связаны с классом -5 мм и наблюдаются в процессах липкостной и пенной сепарации [5–7]. По результатам опробований установлено, что фактические потери алмазов в классе $-5+2$ мм, а также мелких классов ($-2+1$ и $-1+0.5$ мм), которые, как известно, составляют основное содержание полезного компонента в руде, часто превышают 20 % [8, 9].

Таким образом, очевидно, что значительный резерв повышения полноты извлечения ценного компонента из алмазодержащих кимберлитов связан, прежде всего, с интенсификацией процессов липкостной и пенной сепарации, которая может быть достигнута путем повышения контрастности физико-химических свойств поверхности разделяемых компонентов.

В данной работе представлено развитие научных основ известного способа [2, 10–12] усиления контрастности технологических свойств алмазов и вмещающей породы: дано детальное исследование изменения структурно-химического состояния поверхности *основных* породообразующих минералов кимберлита при контакте с техногенными водными системами и продуктами их электрохимической обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проведены на мономинеральных образцах оливина, серпентина и кальцита крупностью $-5+2$ мм, отобранных из кимберлита трубки “Мир”; данные химического анализа проб исследуемых минералов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав проб кальцита, оливина и серпентина

Образец	Содержание элемента, мас. %						
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	S	Br
CaCO ₃	0.03	0.11	0.10	56.89	0.05	н/о	н/о
(Mg, Fe)SiO ₄	46.04	39.60	11.10	0.68	0.28	0.17	0.13
(Mg, Al, Fe)Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	36.56	41.12	5.57	0.18	0.83	0.24	н/о

Для моделирования в лабораторных условиях процессов структурно-химической модификации поверхности породообразующих минералов при контакте с природными и техническими водами в процессе переработки алмазодержащего сырья использована водная вытяжка из кимберлита трубки “Мир” и обратная вода ОФ № 3 Мирнинского ГОКа. Помимо этого, для обоснования использования электрохимической водоподготовки с целью направленного регулирования технологических свойств минералов в сепарационных процессах исследовано влияние продукта электролиза обратной воды на техногенно-измененную поверхность породных минералов.

Подготовка образцов к спектроскопическим исследованиям заключалась в выдерживании кристаллов в обратной воде или водной вытяжке в течение 1 ч, последующей отмывке дистиллированной водой и сушке на воздухе; часть кристаллов после предварительного контакта с обратной водой подвергалась дополнительной операции — переносилась в среду продукта бездиафрагменной ЭХО обратной воды ОФ № 3 МГОКа ($t_{\text{конт}} = 15$ мин).

Водную вытяжку получали путем агитации навески кимберлита трубки “Мир” ($-2+0.5$ мм) в дистиллированной воде при $T:Ж = 1:3$ и скорости вращения импеллера $2 \cdot 10^3$ об/мин, $t_{\text{аг}} = 60$ ч. Электрохимическую подготовку обратной воды проводили в аппарате бездиафрагменного типа с анодом ОРТА-И1 ($I_s = 250$ А/м², $t_{\text{обп}} = 2$ мин). В табл. 2 приведены данные о химическом (ионном) составе использованных водных систем, из которых видно, что минерализация обратной воды и продукта ее электрохимической обработки составляет порядка 14 г/л, по степени минерализации, согласно ГОСТ 27065, их следует отнести к типу “соленая” (10–50 г/л), а водную вытяжку из кимберлитовой породы (~ 3 г/л) — к группе “солончатая”.

ТАБЛИЦА 2. Физико-химические характеристики исследуемых водных систем

Образец	pH	Концентрация, мг/л									
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Fe _{общ}	Σ _{мин}
Оборотная вода МГОКа	8.4	7550	661	3570	536	90	40	157	9800	—	14 854
Водная вытяжка из кимберлита	7.8	188	48	384	122	—	420	298	1800	—	3 072
Продукт ЭХО оборотной воды	9.5	7350	550	3375	565	—	—	168	9610	—	14 268

Для определения химического и фазового состава поверхности минералов использована рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. РФЭ-спектры получали на спектрометре Axis Ultra DLD (Kratos) с помощью монохроматического Al K_α-излучения при мощности рентгеновской пушки 150 Вт. Спектры регистрировали при энергии пропускания 160 эВ для обзорного спектра и 20 эВ — для спектров отдельных линий. Обзорный спектр записывали с шагом 1.00 эВ, спектры отдельных линий — с шагом 0.05 эВ.

Изменения микроморфологии поверхности минералов исследовали методами аналитической электронной микроскопии (РЭМ–PCMA, LEO 1420VP-EDX Oxford INCA Energy 350; низковакуумный растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV) и атомно-силовой (ACM, Ntegra Prima, NT-MDT).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

РЕНТГЕНОВСКАЯ ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Кальцит. Сопоставление обзорных РФЭ-спектров кальцита показало, что взаимодействие образцов с минерализованными водными системами приводит к химической модификации поверхности минерала (табл. 3). Об этом свидетельствует увеличение сигнала, исходящего от 2р-электронов кремния и хлора ($E_{св} = 198.8$ эВ): при этом поверхностная концентрация атомов Si в обоих случаях сопоставима и составляет 0.70 ат. % для водной вытяжки и 1.07 ат. % для оборотной воды. Также установлено, что адсорбция хлорсодержащих соединений на поверхности кальцита происходила исключительно при взаимодействии с вытяжкой из кимберлита (табл. 3), поверхностная концентрация хлора (ат. %) увеличивалась более чем на порядок: с ~0.2 ат. % (порог обнаружения метода) до 2.93 ат. %. Химическое состояние атомов хлора и кремния в данном случае не поддается корректной идентификации по причине низкой поверхностной концентрации.

ТАБЛИЦА 3. Химический состав поверхности кальцита в исходном состоянии и после контакта с водными системами

Образец	Содержание элемента, ат. %				
	Ca	Si	C	O	Cl
Исходный	14.00	~0.20	33.29	50.34	~0.20
Оборотная вода	7.62	0.70	61.17	30.32	~0.20
Водная вытяжка	9.43	1.07	55.74	30.83	2.93
Оборотная вода + продукт ЭХО	15.50	—	31.65	52.15	0.20

Кроме этого, обращает на себя внимание резкое усиление сигнала, исходящего от 1s-электронов атомов углерода (табл. 3). Анализ тонкой структуры С 1s линии позволил установить, что прирост относительного числа атомов углерода связан с адсорбцией органических загрязнений: в случае нативной (исходной) поверхности кальцита около 56 % углеродных атомов

связано с кальцитом и ~44 % с углеводородными загрязнениями поверхности; для кристаллов после контакта с оборотной водой и водной вытяжкой уже только пятая часть (~20 %) поверхностного углерода связана с атомами CaCO_3 , а оставшаяся порядка ~80 % представлена органическими соединениями.

Разложение на индивидуальные составляющие Ca 2*p*-линии показало ее полную качественно-количественную идентичность для образцов кальцита в исходном состоянии, после контакта с оборотной водой, продуктом ЭХО оборотной воды и водной вытяжкой.

Согласно полученным данным, основной эффект воздействия продукта ЭХО оборотной воды на техногенно измененную в результате контакта с оборотной водой поверхность кристаллов кальцита заключается в удалении органического углерода. Как следует из данных табл. 3, атомная концентрация поверхностного углерода снижается до значений, близких к исходному образцу, при этом 60 % от общего числа углеродных атомов связано с кальцитом.

Поверхность кальцита в результате контакта с кимберлитовой вытяжкой и оборотной водой подвергается химической модификации: на поверхности минерала закрепляются главным образом органические соединения, предположительно углеводородного ряда, в меньшей степени осаждаются хлор- и кремнийсодержащие частицы. Атомная концентрация кремния не зависит от степени минерализации водной системы, хлориды осаждаются исключительно при контакте с менее минерализованной водной вытяжкой. Последующий контакт кристаллов кальцита с продуктом бездиафрагменной ЭХО оборотной воды обуславливает десорбцию органических, а также кремний- и хлорсодержащих загрязнений.

Серпентин. Анализ данных РФЭ-спектроскопии, полученных для серпентина, показал, что взаимодействие минерала с оборотной водой и кимберлитовой вытяжкой приводило к разрушению структуры поверхностного слоя минерала вследствие удаления из него магния, что выражалось в снижении отношения Mg/Si в 3.6 раза (табл. 4). Помимо этого, как и для кальцита, диагностируется значительное (в 2.5–3 раза) увеличение поверхностной концентрации атомов углерода, связанных с органическими загрязнениями поверхности ($E_{\text{св}} = 284.8 - 285.3$ эВ).

ТАБЛИЦА 4. Химический состав поверхности серпентина в исходном состоянии и после контакта с водными системами

Образец	Содержание элемента, ат. %						
	Fe	Si	Mg	C	O	Cl	Mg/Si
Исходный	0.94	10.97	13.26	13.04	61.61	~0.2	1.21
Оборотная вода	~0.2	9.03	3.32	36.60	51.05	~0.2	0.36
Водная вытяжка	~0.2	10.69	3.32	38.58	47.41	~0.2	0.31
Оборотная вода + продукт ЭХО	0.25	11.50	17.25	12.55	58.5	—	1.50

Разложение и анализ тонкой структуры Mg 1*s*- и 2*p*-спектров позволили установить, что контакт серпентина с *оборотной водой* вызывает карбонатизацию поверхности минерала, на что указывает появление выраженного плеча в области 1305.8 эВ, отвечающего карбонату магния [13], доля поверхностного магния, представленного карбонатом, составляет 37 % (рис. 1б). При последующем контакте образца с продуктом ЭХО оборотной воды происходит удаление как углеводородных загрязнений (табл. 4), так и карбонатных образований: в спектре 2*p*-электронов магния не идентифицировано химических состояний, отличных от магния в составе серпентина (рис. 1в), доля атомов углерода близка к значению, определенному для нативной (исходной) поверхности — 12.5 %.

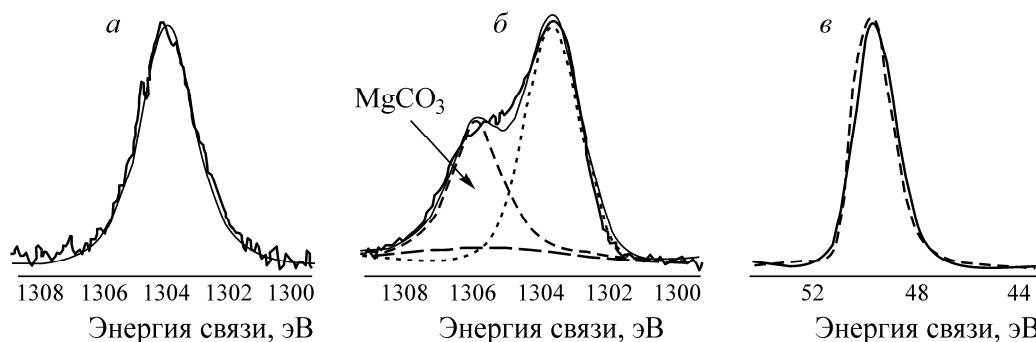


Рис. 1. РФЭ-спектры Mg 1s (а, б) и 2p (е) серпентина после контакта с водной вытяжкой из кимберлита трубки “Мир” (а), оборотной водой ОФ № 3 МГОКа (б) и продуктом бездиафрагменной ЭХО оборотной воды ОФ № 3 МГОКа (е)

Таким образом, изменение структурно-химического состояния поверхности серпентина при взаимодействии с минерализованными водными системами связано с осаждением углеводородных соединений и “разрыхлением” поверхностного слоя минерала вследствие выщелачивания магния и железа; контакт с оборотной водой, кроме того, обуславливает и карбонатизацию поверхности минерала. При контакте с продуктом бездиафрагменной обработки оборотной воды карбонатные отложения (см. рис. 1) удаляются полностью, а концентрация “органического” углерода снижается до значений, полученных для исходной поверхности (см. табл. 4).

Оливин. Как видно из результатов, приведенных в табл. 5, поверхность образцов минерала после контакта с оборотной водой и кимберлитовой вытяжкой значительно загрязнена органическим углеродом: порядка 70 % поверхностных атомов связано с углеводородами.

ТАБЛИЦА 5. Химический состав поверхности оливина после контакта с водными системами

Образец	Содержание элемента, ат. %						
	Fe	Si	Mg	C	O	Cl	Ca
Оборотная вода	1.66	11.29	1.51	73.01	81.17	~0.20	0.02
Водная вытяжка	3.37	23.79	0.55	71.05	77.58	2.03	0.02
Оборотная вода + продукт ЭХО	1.35	7.75	10.25	36.10	44.20	—	—

Содержание кремния и железа (ат. %) в составе поверхностного слоя оливина после контакта с оборотной водой в ~2 раза ниже, чем у образца после контакта с водной вытяжкой (табл. 5), в то же время поверхность минерала в первом случае заметно обогащена магнием. Следовательно, контакт с водной вытяжкой, как следует из данных элементного анализа поверхности, вызывает более активное выщелачивание магния, а взаимодействие с оборотной водой — растворение кремния и железа.

Влияние контакта с оборотной водой и вытяжкой из кимберлита на фазовый состав поверхности оливина наиболее заметно проявляется в спектрах Mg 2p и Si 2p атомных состояний. Анализ Si 2p-линии позволил идентифицировать заметное уширение полосы для образца, обработанного водной вытяжкой, по сравнению с образцом, контактировавшим с оборотной водой. Si 2p-спектр в первом случае удовлетворительно описывается двумя компонентами с $E_{\text{св}} = 101.9$ и 103.02 эВ, отвечающими связи Si–O минерала и силанольным группировкам Si–OH на поверхности оливина [14] (рис. 2а). В случае контакта с водной вытяжкой линия Si 2p симметрично уширяется и описывается уже тремя химическими состояниями (рис. 2б) с $E_{\text{св}} = 102.7$ эВ (46.89 %), $E_{\text{св}} = 101.3$ эВ (12.74 %) и $E_{\text{св}} = 104.5$ эВ (40.38 %).

Из разложения Mg 2p-полосы на индивидуальные химические состояния следует, что агитация в оборотной воде обуславливает карбонатизацию поверхности минерала, на это указывает формирование невыразительного плеча (8 ат. %) при 1305.8 эВ.

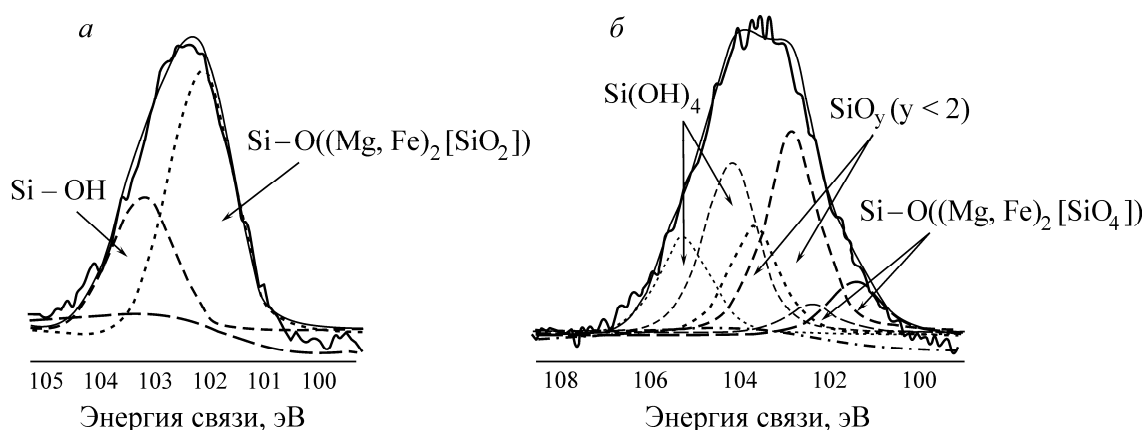


Рис. 2. Фотоэлектронные Si 2*p*-спектры оливина после контакта с оборотной водой ОФ № 3 МГОКа (а) и водной вытяжкой из кимберлита трубки “Мир” (б)

Последующий контакт образца с продуктом ЭХО оборотной воды приводит к снижению присутствия на поверхности углеводородных загрязнений (табл. 5) и карбонатных отложений: концентрация поверхностного углерода снизилась с ~71 до ~36 %, отличных от оливина химических состояний магния в спектрах не обнаружено.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что оборотная вода интенсифицирует процесс выщелачивания кремния и железа и карбонатизацию поверхности оливина, при этом в спектрах Si 2*p*-электронов не идентифицировано химических состояний, отличных от оливина. Последующий контакт с продуктом ЭХО оборотной воды приводит к десорбции большей части углеводородных и карбонатных отложений с поверхности минерала (см. табл. 5).

Модельная система в виде водной вытяжки из кимберлита также оказывает влияние на структуру поверхности минерала, вызывая активное растворение магния, искажение кремний-кислородного каркаса с появлением промежуточных состояний кремния и осаждением хлоридов.

РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ И АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИИ

Кальцит. Результаты исследований, полученные при использовании методов прецизионной микроскопии (рис. 3), в целом согласуются с результатами РФЭ-спектроскопии.

На поверхности образцов кальцита, подвергнутых контакту с природными и техногенными минерализованными водными системами, идентифицировано осаждение хлоридов калия и натрия: результаты РЭМ-исследований показали, что сростки дендритных кристаллов формируют плотное покрытие, занимающее в большинстве случаев значительную часть общей площади (рис. 3б, в). При этом методом атомно-силовой микроскопии установлено, что возникающие кристаллические образования имеют средний размер 2–2.5 мкм и равномерно распределяются по исследуемой поверхности (рис. 3е, ж, з). Дальнейшее взаимодействие образцов с продуктом электрохимической обработки оборотной воды привело к значительному удалению дендритных образований хлоридов (рис. 3г, з).

Оливин и серпентин. Данные микроскопических методов для оливина и серпентина показали отсутствие выраженного изменения морфологии поверхности в результате взаимодействия с исследуемыми водными системами. Несоответствие результатов растровой электронной микроскопии и данных электронно-спектроскопических исследований может быть связано с тем, что РФЭС обладает меньшей (3–5 Å) глубиной отбора аналитической информации и, следовательно, более чувствительна к изменениям, происходящим в верхней границе поверхностного слоя. Таким образом, изменения как химического, так и структурного состояния порообразующих силикатов сосредоточены в верхней части поверхностного слоя (1–5 атомных слоев).

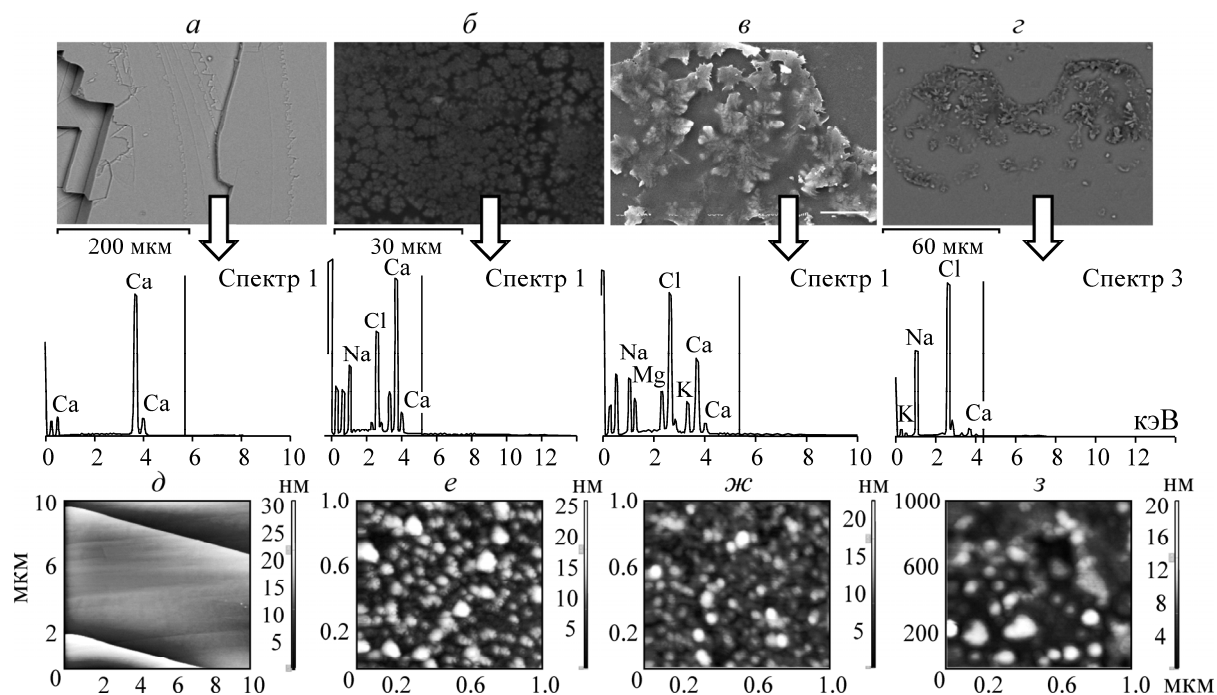


Рис. 3. РЭМ–РСМА (а–д) и АСМ-изображения (е–з) поверхности кальцита в исходном состоянии (а, е), после контакта с водной вытяжкой (б, е), оборотной водой (в, ж) и продуктом электрохимической обработки оборотной воды (з, з)

ВЫВОДЫ

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, аналитической растровой электронной и атомно-силовой микроскопий исследован эффект влияния минерализованных водных систем — оборотной воды, вытяжки из кимберлитовой породы и продукта электрохимической обработки оборотной воды — на структурно-химическое состояние поверхности порообразующих минералов кимберлита (оливина, серпентина, кальцита).

Установлено, что изменение химического состава поверхности кальцита при контакте с оборотной водой и водной вытяжкой из кимберлита связано главным образом с приростом атомной концентрации “органического” углерода (35–40 %), в меньшей степени хлора и кремния (~1 и ~2.9 % соответственно) и является следствием адсорбции углеводородных загрязнений, хлор- и кремнийсодержащих соединений. Применение РЭМ–РСМА и АСМ показало формирование равномерно распределенных по поверхности дендритных кристаллов хлоридов натрия и калия, средний размер которых составляет порядка 2.5 мкм. Большая часть (90–100 %) новообразований органического и минерального происхождения удаляется при взаимодействии поверхности минерала с продуктом электрохимической обработки оборотной воды.

Изменения структурно-химических свойств поверхности порообразующих силикатов (оливин, серпентин) при взаимодействии с кимберлитовой вытяжкой, оборотной водой, помимо адсорбции углеводородных загрязнений, связаны с искажением (разрыхлением) структуры наноразмерного слоя вследствие выщелачивания Mg, Fe, Si, а также карбонатацией поверхности.

При этом процесс карбонатации сильнее выражен для серпентина (до 40 % поверхностного магния связано в MgCO_3 в случае серпентина и порядка 8 % — для оливина) и является следствием контакта минерала с оборотной водой. Структурные трансформации, затрагивающие поверхностный слой оливина, происходят в результате контакта минерала с кимберлитовой вытяжкой, в этом случае идентифицировано разрушение кремний-кислородного каркаса. Контакт техногенно модифицированной поверхности минералов с продуктом электрохимической обработки оборотной воды вызывает удаление углеводородных загрязнений и карбонатных отложений.

Экспериментально показано доминирующее влияние техногенных вод (оборотной воды) на процессы модификации поверхности породных минералов кимберлита при переработке алмазосодержащих руд. Идентифицированные изменения химического состава поверхности породообразующих минералов, по всей вероятности, будут оказывать негативное влияние на их технологические свойства в процессах пенной и липкостной сепарации, способствуя гидрофобизации поверхности за счет адсорбции органических соединений. Выявлена возможность деструкции поверхностных минеральных и десорбции органических новообразований при использовании продукта электрохимической обработки оборотной воды, контакт с которым приводит к устранению “техногенной” гидрофобности, усилению контрастности свойств с ценным компонентом (кристаллами алмазов) и будет способствовать повышению качества алмазной продукции за счет снижения извлечения кальцита, оливина и серпентина в концентраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корпоративный сайт АК “АЛРОСА” [электронный ресурс] URL: www.alrosa.ru/алмазы-и-рынок/мировой-алмазный-рынок/ (дата обращения 10.10.2015).
2. Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Двойченкова Г. П., Богачев В. И., Миненко В. Г., Диков Ю. П. Теория и практика применения электрохимического метода водоподготовки с целью интенсификации процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов // Горн. журн. — 2005. — № 4. — С. 51–55.
3. Назарова Н. В. Анализ и перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазодобычи России // ГИАБ. — 1999. — № 8. — С. 208.
4. Бохан А. А., Баженова С. Г. Анализ состояния и перспективы развития мирового рынка природных алмазов // ГИАБ. — 1999. — № 8. — С. 208–209.
5. Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Поливанская В. В. Обоснование применения метода тепловой обработки для повышения эффективности процесса пенной сепарации алмазов // ГИАБ. — 2014. — № 6. — С. 158–164.
6. Чантурия В. А., Горячев Б. Е. Обогащение алмазосодержащих кимберлитов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. — М.: Изд. дом “Руда и металлы”, 2008. — С. 151–163.
7. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Трофимова Э. А., Чаадаев А. С., Зырянов И. В., Островская Г. Х. Современные методы интенсификации процессов обогащения и доводки алмазосодержащего сырья класса – 5 мм // Горн. журн. — 2011. — № 1. — С. 71–74.
8. Островская Г. Х. Интенсификация процесса доводки алмазосодержащих концентратов на основе водоземulsionной технологии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2016.
9. Коваленко Е. Г. Разработка комбинированного метода обработки флотационных систем в процессе пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2016.
10. Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Диков Ю. П., Богачев В. И., Двойченкова Г. П., Зуев А. В. Связь поверхностных и технологических свойств алмазов при обогащении кимберлитов // Горн. журн. — 1998. — № 11–12. — С. 52–56.
11. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Тимофеев А. С. Особенности состава поверхности гидрофильных алмазов и их роль в процессе пенной сепарации // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 173–181.
12. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е. Классификация минеральных образований на поверхности природных алмазных кристаллов // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 116–122.
13. База данных компании Thermo Scientific [электронный ресурс] URL: <http://xpssimplified.com/knowledgebase.php> (дата обращения 10.10.2015).
14. Zakaznova V. P., Nesbitt H. W., Bancroft G. M., Tse J. S. Characterization of leached layers on olivine and pyroxenes using high — resolution XPS and density functional calculation, *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 2008, Vol. 72. — PP. 71–86.

Поступила в редакцию 11/XII 2016