

МЕХАНИЧЕСКИЙ ИЗНОС ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**В.П. Афанасьев, Е.И. Николенко, Н.С. Тычков, А.Т. Титов,
А.В. Толстов*, В.П. Корнилова*, Н.В. Соболев**

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия
АК „АЛРОСА“, 678170, Мирный, ул. Ленина, 6, Россия

Проведено экспериментальное исследование относительной абразивной устойчивости индикаторных минералов кимберлитов — пирропа, пикроильменита, оливина, апатита, а также алмазов и фрагментов самих кимберлитов, показавшее следующий ряд их абразивной устойчивости: пирроп—оливин—пикроильменит—apatит—кимберлит; алмаз в процессе эксперимента практически не изменился. Фрагменты кимберлита оказались достаточно устойчивыми, их реликты сохранились до конца эксперимента, когда все минералы приобрели устойчивую форму износа. Для пирропа, оливина, апатита устойчивой формой износа является овальная форма; пикроильменит вследствие анизотропии микротвердости формирует таблички с гексагональными очертаниями, характерными для древних ореолов индикаторных минералов всех алмазоносных регионов. Анализ соотношения абразивной устойчивости пирропа и пикроильменита показал, что в „зрелых“ прибрежно-морских ореолах, представленных только пирропом, возможно, с примесью алмазов, пикроильменит уничтожен процессом истирания полностью.

Пирроп, пикроильменит, оливин, кимберлит, алмаз, механический износ, эксперимент.

MECHANICAL ABRASION OF KIMBERLITE INDICATOR MINERALS: EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

V.P. Afanas'ev, E.I. Nikolenko, N.S. Tychkov, A.T. Titov, A.V. Tolstov, V.P. Kornilova, and N.V. Sobolev

The relative abrasive stability of kimberlite indicator minerals such as pyrope, picroilmenite, olivine, apatite as well as diamonds and kimberlite fragments was studied experimentally, and the following sequence of mineral abrasive stability was established: pyrope—olivine—picroilmenite—apatite—kimberlite fragments. Diamond did not virtually change during the experiment. Kimberlite fragments appeared to be rather stable. Their relics were preserved until the end of the experiment, whereas the other minerals acquired wearing-resistant shapes. Pyrope, olivine, and apatite are shaped into an oval. Owing to anisotropy of microhardness, picroilmenite forms hexagonal tablets, which are typical of ancient collectors of indicator minerals in all diamondiferous regions. The relative analysis of the abrasive stabilities of pyrope and picroilmenite has shown that in “mature” sea collectors represented by pyrope alone, with a possible admixture of diamond, picroilmenite is completely destroyed by abrasion.

Pyrope, icroilmenite, olivine, kimberlite, diamond, mechanical abrasion, experiment

ВВЕДЕНИЕ

Степень и формы механического износа являются одной из важнейших характеристик россыпных минералов, отражающих условия россыпеобразования, в связи с чем их изучению (феноменологическому, теоретическому, экспериментальному) уделяется большое внимание [Кухаренко, 1961; Поляницын, 1966; Разумихин, 1973, 1982; Нестеренко, 1977; Шило, 1981; Шумилов, 1981; Афанасьев и др., 2001]. В алмазной геологии степень износа индикаторных минералов кимберлитов традиционно используется при прогнозировании коренных месторождений алмазов как индикатор их удаленности [Харьков, 1978]. Между тем, согласно нашим исследованиям, степень и формы износа индикаторных минералов кимберлитов зависят не только от расстояния транспортировки, но в большей степени от условий формирования ореолов и россыпей [Афанасьев, Зинчук, 1999]. Нами показано, что в аллювиальных условиях на расстоянии более 100 км признаки износа на индикаторных минералах практически не появляются [Афанасьев и др., 2001], а механический износ повышенной степени на минералах связан с прибрежно-морскими условиями формирования ореолов [Афанасьев, Зинчук, 1999]; обоснована пониженная в сравнении с пирропом абразивная устойчивость пикроильменита, вследствие чего в зрелых прибрежно-морских ореолах последний может быть уничтожен истиранием полностью [Афанасьев, 1991; Афанасьев и др., 1994]. Предложен „мельничный“ механизм истирания минералов и обосновано механогенное происхождение гексагональных табличек пикроильменита в россыпях в результате значительной анизотропии его микротвердости [Афанасьев и др., 2001]. Однако экспериментальное моделирование является желательным для подкрепления такого рода выводов. Эксперименты по механическому износу индикаторных минералов кимберлитов проводились еще на заре отечественной алмазной геологии Н.П. Кленовицким

(см. ссылку в [Алмазные..., 1959]), но их результаты имеют качественный характер и не во всем соответствуют реальным явлениям; к тому же их методологическим базисом было предположение об исключительно аллювиальном износе минералов, что не соответствует действительности. Ф. Кюнен также моделировал аллювиальные условия переноса минералов [Kuenen, 1960] и показал, что потеря веса в частично окатанном среднезернистом кварцевом песке на 200 тыс. км переноса составляет не больше 1 %, что визуально не фиксируется. Проводились экспериментальные исследования истирания индикаторных минералов и нами [Афанасьев и др., 1994], их целью было, наряду с изучением относительной абразивной устойчивости пиропы и пикроильменита, получение механогенной полировки, характерной для многих древних ореолов во всех алмазоносных регионах. Тем не менее сейчас мы не можем утверждать, что экспериментальных данных достаточно для подтверждения феноменологических выводов о поведении индикаторных минералов в процессах механического износа. Нет даже убедительных количественных оценок относительной абразивной устойчивости индикаторных минералов. Наша оценка пониженной примерно на порядок абразивной устойчивости пикроильменита в сравнении с пиропом [Афанасьев и др., 1994] представляется несколько завышенной, а по иным индикаторам такие данные вовсе отсутствуют. Нет данных по относительной абразивной устойчивости обломков кимберлита; в этом отношении традиционно используется представление о их низкой устойчивости, но недавние массовые находки Ботубинской экспедицией АК „АЛРОСА“ (Якутия) фрагментов кимберлитов в древних коллекторах ставит под сомнение такое представление. По этим причинам постановка исследований относительной абразивной устойчивости широкого комплекса индикаторных минералов и самих кимберлитов представляется крайне необходимой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования были использованы пиропы из тр. Айхал и пикроильмениты из тр. Комсомольская (Алакит-Мархинское поле, Якутия), оливины из концентрата тр. Второгодница (Куойкское поле), апатиты из тр. Бабье лето (Чомурдахское поле), переданные для исследования А. Хмельковым (Амакинская экспедиция АК „АЛРОСА“), и два алмаза из тр. Мир (Малоботубинский район). Для исследования абразивной устойчивости кимберлита были использованы фрагменты штуфа кимберлита порфировой структуры тр. Нюрбинская (Накынское поле) размером 5—8 мм. Мы сознательно взяли кимберлит типичного облика без признаков физического и химического выветривания: выветривание в очень разной степени ослабляет кимберлит, поэтому целесообразно знать его устойчивость, близкую к максимальной в неветрелом состоянии, и экстраполировать полученные данные на конкретные выветрелые разности.

Цель эксперимента — получение данных по относительной абразивной устойчивости индикаторных минералов кимберлитов, а не моделирование конкретных природных литодинамических обстановок. Поэтому был использован ультразвуковой низкочастотный диспергатор УЗДН-1, обеспечивающий достаточно высокие темпы механической обработки зерен минералов. Обработка минералов проводилась в металлической капсуле, охлаждаемой проточной водой, при частоте ультразвуковых колебаний 22 кГц. В нее в начальном эксперименте было загружено пиропов 2.356 г, пикроильменитов 3.872 г, оливинов 1.405 г, апатита 1.888 г, два кристалла алмаза, все минералы размерностью $-2...+1$ мм; кроме того, добавлены фрагменты кимберлита общим весом 2.301 г и вода. Из-за малого объема капсулы дополнительная абразивная среда не добавлялась. Поскольку под действием ультразвука минералы приходили в интенсивное движение, их износ осуществлялся главным образом самоистиранием, о чем свидетельствуют большие радиусы закругления механогенных поверхностей; кавитация, возбуждаемая ультразвуком, способствовала самоистиранию минералов. После каждого этапа эксперимента все минералы сбрасывались на сито 0.25 мм для удаления продуктов истирания, промывались, разбирались на монофракции и взвешивались. На следующий этап эксперимента те же минералы и обломочки кимберлита вновь загружались в капсулу. На всех этапах эксперимент проводился при одних и тех же параметрах, увеличивалось лишь время обработки минералов, поскольку по мере стабилизации формы минералов к износу темпы потери веса существенно снижались.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Общая продолжительность эксперимента составила 635 мин. Апатит показал низкую абразивную устойчивость, уже к 155-й минуте потерял половину веса и приобрел округлую устойчивую форму истирания, после чего был снят с эксперимента. К концу эксперимента потеря веса у исследуемых минералов в основном стабилизировалась. Пиропы приобрели угловато-округлую и округлую форму и на последнем этапе почти не потеряли в весе, поэтому ясно, что для получения более сильного механического износа пиропов понадобится слишком большое время, что и побудило нас ограничиться указанным временем.

Результаты эксперимента отражены на графике (рис. 1), в таблице и на микрофотографиях (рис. 2).

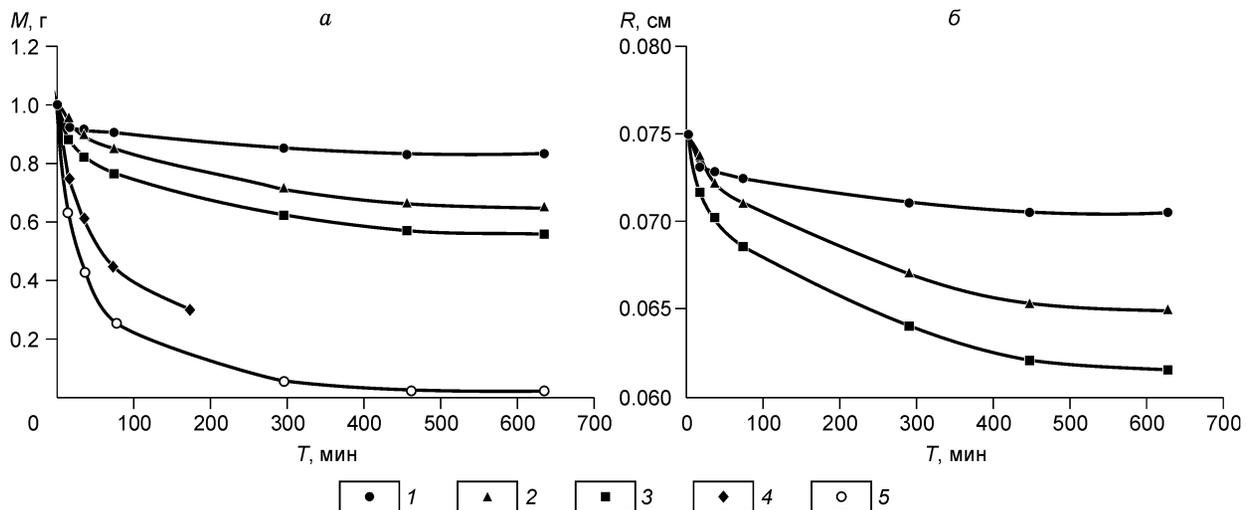


Рис. 1. График потери веса (M) минералов в процессе эксперимента (a); расчетные кривые изменения радиуса (R) зерен минералов в процессе эксперимента (b).

1 — пироп, 2 — оливин, 3 — пикроильменит, 4 — апатит, 5 — кимберлит.

Из таблицы и рис. 1 видно, что на начальных этапах эксперимента (до 80 мин) темпы потери веса максимальны. Потеря веса пироба в первые 15 мин выше, чем у оливина, однако далее ситуация меняется и оливин показывает существенно меньшую абразивную устойчивость. Меньшая устойчивость пироба на начальном этапе эксперимента связана с тем, что пиробы представлены в концентрате кимберлита остроугольными обломками и осколками, тогда как зерна оливина имеют более изометричную форму, поэтому у пироба вначале интенсивно обрабатывались контрастные элементы рельефа, обеспечивая повышенную потерю веса. По мере окатывания и сглаживания рельефа потеря веса у всех минералов приобретала закономерный характер, соответствующий их реальной абразивной устойчивости, а темпы потери веса снижались. Для алмазов потеря веса на всем протяжении эксперимента не зафиксирована.

Механогенный рельеф на всех минералах шероховатый, что обусловлено жесткими соударениями частиц друг с другом и со стенками капсулы. Лишь у алмазов на ребрах и вершинах октаэдра и на тупых ребрах осколка к концу периода экспериментальных исследований появилась слабая механогенная полировка, а на остром ребре скола появился очень тонкий рельеф выкрашивания.

Форма минералов по мере возрастания степени механического износа меняется от угловатой через угловато-округлую до округлой за счет истирания контрастных элементов рельефа. Однако форма зерен пироба до конца эксперимента (635 мин) оставалась главным образом угловато-округлой. При этом пониженные элементы рельефа, вогнутые сколы остаются не затронутыми механическим износом; не затронутые износом поверхности постепенно уменьшаются по площади. После 340 мин эксперимента большинство зерен пикроильменита приобрели округлую форму, являющуюся устойчивой формой износа. Но среди них появились зерна в форме гексагональных табличек, совершенно аналогичных тем, которые встречаются в древних ореолах прибрежно-морского типа (рис. 3).

Потеря веса минералов в процессе эксперимента (г/%)

Минерал	Время, мин							
	0	15	35	75	175	295	455	635
Пироп	<u>2.356</u> 100	<u>2.200</u> 93.3	<u>2.164</u> 91.8	<u>2.138</u> 90.7	—	<u>2.011</u> 85.3	<u>1.967</u> 83.5	<u>1.967</u> 83.5
Оливин	<u>1.405</u> 100	<u>1.341</u> 95.4	<u>1.258</u> 89.5	<u>1.198</u> 85.3	—	<u>1.010</u> 71.9	<u>0.934</u> 66.5	<u>0.918</u> 65.3
Пикроильменит	<u>3.872</u> 100	<u>3.399</u> 87.8	<u>3.188</u> 82.3	<u>2.972</u> 76.7	—	<u>2.421</u> 62.5	<u>2.203</u> 56.9	<u>2.154</u> 55.6
Кимберлит	<u>2.301</u> 100	<u>1.452</u> 63.1	<u>1.022</u> 44.4	<u>0.672</u> 27.2	—	<u>0.159</u> 6.9	<u>0.087</u> 3.8	<u>0.076</u> 3.3
Апатит	<u>1.888</u> 100	<u>1.394</u> 73.83	<u>1.149</u> 60.85	<u>0.832</u> 44.06	<u>0.552</u> 29.23	—	—	—



Рис. 2. Оптические микрофотографии индикаторных минералов в процессе эксперимента.

Ряды: *a* — до начала истирания минералов; *b* — 80 мин эксперимента; *c* — 220 мин эксперимента; *d* — 455 мин эксперимента; *e* — 635 мин эксперимента; *1* — пиропы, *2* — пикроильмениты, *3* — оливины, *4* — кимберлиты; ряд *f*: *1* — обломок кимберлита с пиропом из мезозойских отложений, Малоботубинский район; *2* — обломок кимберлита с пикроильменитом из мезозойских отложений, Малоботубинский район; *3* — апатит до начала истирания; *4* — апатит после 175 мин эксперимента. Увел. 5—25.

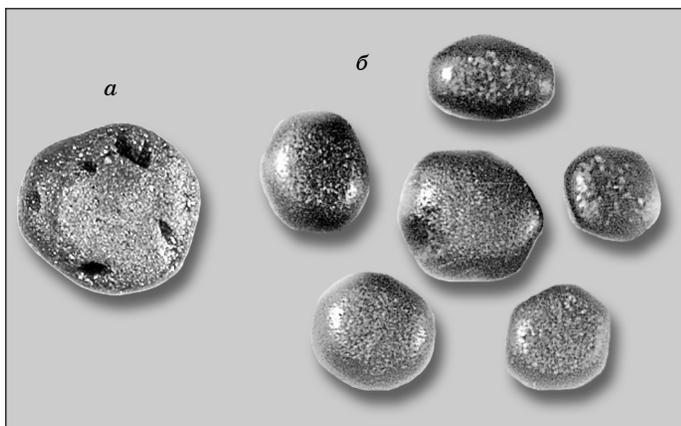


Рис. 3. Гексагональные таблочки пикроильменита.

a — полученные в процессе эксперимента, увел. 8; *б* — из мезозойских прибрежно-морских ореолов северо-востока Сибирской платформы, увел. 16 [Афанасьев и др., 2001].

В исходном материале присутствовали как зерна без трещин, так и в разной степени трещиноватые, имеющие чистые или заполненные вторичными продуктами трещины, что в целом характерно для кимберлитовых минералов. В процессе эксперимента лишь небольшое количество трещиноватых зерен

рассыпалось на более мелкие осколки, большинство же таких зерен истиралось без дробления, трещины сохранились до приобретения минералами устойчивой формы истирания. Это означает, что даже в высокоэнергетической среде вклад дробления минералов в сравнении с абразией невелик при условии однородной granulometрии.

На некоторых зернах в исходном материале были примазки и корочки кимберлита, которые также оказались устойчивыми. На одном из зерен пиропы корочка кимберлита, заполняющая углубление его рельефа, сохранялась до приобретения зерном высокой степени окатывания, участвуя в оформлении его овальной формы.

Фрагменты кимберлита были заведомо крупнее зерен минералов, поэтому их износ происходил несколько иначе, чем у минералов. Более мелкие минералы в высокоэнергетической среде оббивали фрагменты кимберлита по всей поверхности, из-за чего они достаточно долго сохраняли угловато-округлую форму. Из кимберлита выпадали отдельные выделения серпентина и далее вели себя как самостоятельные частицы. Темпы потери веса для кимберлита оказались, как и ожидалось, максимальными в сравнении с минералами. Но вместе с тем кимберлит показал более значительную устойчивость, чем предполагалось, его окатанные обломки сохранялись по достижении пиропами средней и высокой степени окатанности, а пикроильменитами — устойчивой формы износа (см. рис. 1, 2, таблицу). Мы полагаем, что повышенная устойчивость кимберлита связана не с твердостью (она низкая, 2—4 по шкале Мооса), а с высокой вязкостью преимущественно серпентинового матрикса.

Апатит продемонстрировал низкую абразивную устойчивость на уровне кимберлита. Алмаз не показал потерю веса на проведенной стадии эксперимента.

Результаты эксперимента позволяют расположить изученные минералы по мере снижения абразивной устойчивости в ряд: алмаз—пироп—оливин—пикроильменит—apatит—кимберлит.

Мы не стали продолжать эксперимент до полного уничтожения отдельных минеральных видов: выполаживание кривых потери веса по мере приобретения устойчивой формы истирания и снижение темпов износа показывает, что для этого потребуется еще весьма значительное время. Вместе с тем наиболее актуальная часть эксперимента (до стабилизации потери веса и приобретения минералами устойчивой формы износа) проведена. В зависимости от характера и темпов потери веса минералов эксперимент можно разделить на две части. Начальная (примерно до 80 мин) характеризуется максимальными темпами потери веса минералов, обусловленными преобладанием поверхностной абразии, т. е. удалением контрастных элементов рельефа. Во второй части эксперимента темпы потери веса снижаются, поверхностная абразия сменяется объемной, т. е. сокращением объема зерен вследствие удаления вещества минерала со всей его поверхности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведенный эксперимент подтвердил наши предположения о соотношениях абразивной устойчивости индикаторных минералов. В первую очередь он показал, что в ореолах прибрежно-морского типа по достижении пиропом устойчивой формы износа пикроильменит вследствие пониженной абразивной устойчивости действительно может исчезнуть полностью. В то же время устойчивость пикроильменита в сравнении с пиропом оказалась выше, чем нами предполагалось ранее [Афанасьев и др., 1994]. На завершающей стадии эксперимента, когда в значительной мере стабилизировались темпы потери веса минералов, доля оставшегося пикроильменита составила 55.6 %, тогда как пиропы — 83.5 %, т. е. потеря веса пикроильменита в 1.5 раза больше, чем пиропы, и эти цифры представляются более реалистичными, соответствующими природным процессам. По пятибалльной литологической шкале окатанности, наи-

Пироп	1	2	3	4	5	
Пикроильменит	1	2	3	4	5	Уничтожение

Рис. 4. Соотношение степени механического износа пироба и пикроильменита в древних ореолах рассеяния.

Классы окатанности: 1 — износ визуально не фиксируется; 2 — износ слабый; 3 — износ средний; 4 — износ сильный; 5 — износ максимальный (устойчивая форма износа).

более приемлемой для оценки степени износа индикаторных минералов, пикроильменит в процессе износа опережает пироп примерно на один балл (класс износа) (рис. 4), что согласуется с данными эксперимента.

Форма зерен в ходе эксперимента менялась от произвольной, главным образом обломочной, оскольчатой, через угловато-округлую до округлой. Для пироба, оливина и апатита устойчивой формой износа является овальная. Фрагменты кимберлита, благодаря повышенным в сравнении с минералами размером и анизотропии абразивных свойств вследствие полиминеральности, в ходе эксперимента сохраняли неправильную форму, и лишь после высвобождения мономинеральных серпентиновых выделений последние приобретали овальную форму.

Зерна пикроильменита также приобретали в основном овальную, часто уплощенную форму. Но на продвинутых стадиях эксперимента некоторые зерна превращались в таблички с гексагональными очертаниями (см. рис. 3). Подобные таблички пикроильменита широко распространены в древних прибрежно-морских ореолах и описаны нами как устойчивые формы механического износа пикроильменитов [Афанасьев и др., 2001]. Они имеют округленные контуры, поверхность шероховатая с более грубым рельефом на поверхностях, близких к пинакоиду. Четкие гексагональные очертания имеют таблички размером менее 1 мм, более крупные чаще имеют уплощенно-округлую форму.

Возможность псевдоидиоморфизации пикроильменита в процессе износа предполагалась нами ранее на основе измерений микротвердости [Афанасьев и др., 2001]. Изучение микротвердости производилось на образцах пикроильменита с ориентированными приполированными поверхностями, ориентировка которых производилась по скульптурам химического травления. Для поверхностей, близких к пинакоиду, среднее значение микротвердости по 30 замерам составляет $677 \cdot 10^7$ Н/м², а по двум произвольным плоскостям в поясе тройной оси, по каждой из которых проведено по 40 испытаний, соответственно $952 \cdot 10^7$ и $951 \cdot 10^7$ Н/м². Следовательно, величина микротвердости пикроильменита в плоскости пинакоида примерно в 1,4 раза ниже, чем по поверхностям, нормальным к нему, что и обуславливает возможность появления в процессе механического износа таблитчатой формы пикроильменитов как устойчивой. Плоскости, нормальные к пинакоиду, были приполированы произвольно и не показали при измерениях заметных различий в микротвердости, но, видимо, имеется анизотропия твердости и в поясе тройной оси, чем обуславливаются гексагональные очертания табличек. Экспериментальное получение гексагональных пластинок пикроильменита определенно показывает их происхождение как устойчивой формы механического износа. Это первый описанный случай псевдоидиоморфизации минерала за счет истирания.

Алмазы в процессе эксперимента практически не изменились, потеря веса для них не зафиксирована. По достижении исследованными в эксперименте минералами устойчивой формы износа у алмазов на ребрах и вершинах октаэдра и на тупых ребрах сколов осколка появилась лишь слабая механогенная полировка, полностью аналогичная так называемой „леденцовой“ скульптуре [Афанасьев и др., 2000]. Механогенная полировка является основной формой природного механического износа алмазов; даже если на их ребрах наблюдаются шероховатые поверхности, они все равно заполированы и блестят. Проведенный эксперимент, наряду с результатами изучения россыпей, показывает, что, когда на алмазах появляются слабые, но ясно видимые следы механического износа в форме полировки или выкрашивания острых ребер (например, россыпь Тарыдакская в Красноярском крае, россыпь Дьукуннахская в верховьях р. Аламджа (Якутия)), пикроильменит уничтожается полностью, а пироп приобретает овальную форму. Когда на алмазах наблюдаются существенные признаки полировки или шероховатые поверхности по ребрам, уничтожается и пироп (например, россыпи Калимантана, Урала, некоторые россыпи Бразилии, провинции Хунань в Китае и др.), тогда алмаз остается в одиночестве, сопровождаемый лишь гидравлическими спутниками; последними являются абразивно-устойчивые минералы, благодаря чему их убыль в процессе износа постоянно компенсируется новыми поступлениями, как правило, это кварц.

Таким образом, в зрелых россыпях, в которых алмазы имеют признаки механического износа, индикаторные минералы кимберлитов, включая пиробы, могут быть уничтожены абразией полностью. Для древних (протерозойских) россыпей вклад в уничтожение индикаторных минералов могут вносить и физико-химические изменения.

Принципиально важные результаты получены по износу кимберлита. В практике геолого-разведочных работ обломочки кимберлита в древних ореолах встречаются очень редко, из-за чего кимберлит считается механически неустойчивым. Однако нужно различать механическую и физико-химическую устойчивость.

Как показал эксперимент, механическая устойчивость кимберлита достаточно высока, его фрагменты сохранялись до достижения пиропами устойчивой формы износа. Устойчивость кимберлита к физическому выветриванию очень различная: в отвалах шурфов на кимберлитовых телах кимберлитовые обломки под действием климатических факторов могут разложиться за год, но могут и сохранять высокую прочность многие десятилетия. Однако химическая устойчивость кимберлита, особенно в условиях латеритного корообразования, минимальна, из-за этого кимберлитовые обломки отсутствуют в ореолах, прошедших эпоху латеритного выветривания. Сочетание этих трех факторов и определяет потенциальную возможность сохранения обломочков кимберлита в древних ореолах.

Оливин показывает вторую после пироба абразивную устойчивость, поэтому может сохраняться в прибрежно-морских ореолах наряду с окатанным пиропом, как, например, в нижневолжских алмазных конгломератах в Приленском районе [Леонов и др., 1976]. Но в химическом отношении он так же неустойчив, как кимберлит, и не встречается в ореолах, прошедших эпоху латеритного выветривания. Оливин практически без признаков износа прослежен нами по современному потоку рассеяния Верхнемунского кимберлитового поля в русловых отложениях р. Муна на расстоянии 110 км до устья р. Чукар и бесспорно протягивается дальше [Афанасьев, 1991; Афанасьев и др., 2001]. Данный пример показывает, что индикаторные минералы кимберлитов в современных аллювиальных платформенных обстановках могут переноситься, причем практически без износа, на расстояние значительно более 100 км. Вопрос их обнаружения связан лишь с необходимыми объемами опробования, которые должны экспоненциально возрастать по мере удаления от коренных источников. Очень слабый износ на индикаторных минералах в аллювиальных условиях и максимальный износ в прибрежно-морских обстановках [Афанасьев, 1991; Афанасьев и др., 2001], независимо от удаленности коренных источников, ясно указывает на зависимость наблюдаемой степени износа минералов не от удаленности коренных источников, а от литодинамических условий формирования их механических ореолов рассеяния.

ВЫВОДЫ

Исследованные минералы и обломочки кимберлита по абразивной устойчивости образуют ряд (в порядке убывания): алмаз—пироп—оливин—пикроильменит—апатит—кимберлит. Алмаз в процессе эксперимента не показал потерю веса. Для остальных соотношение абразивной устойчивости после стабилизации потери веса (без апатита, так как он был удален из эксперимента раньше) составляет 1 : 0.78 : 0.67 : 0.04.

В древних прибрежно-морских ореолах, представленных мономинеральной ассоциацией пиропов, возможно с примесью окатанных алмазов, микроильменит уничтожен процессами истирания полностью.

По достижении микроильменитом, оливином, апатитом округлой формы, являющейся устойчивой формой износа, пироп еще сохраняет угловато-округлую форму. По темпам износа пироп отстает от микроильменита примерно на один балл по пятибалльной шкале.

Благодаря анизотропии микротвердости зерна микроильменита в процессе износа могут приобретать форму гексагональной таблички как устойчивой формы механического износа.

Фрагменты невыветрелого кимберлита благодаря вязкости слагающего их материала, в первую очередь серпентина, показывают значительную абразивную устойчивость и сохраняются до достижения пиропами средней и высокой степеней окатанности, а микроильменитами — устойчивой формы износа.

В древних ореолах, прошедших в своем развитии этап латеритного выветривания, отсутствуют обломки кимберлита и оливина вследствие их химической неустойчивости. В ореолах, не испытавших условия латеритного выветривания, оливины и кимберлиты могут сохраняться, при этом оливины вместе с другими индикаторными минералами в аллювиальных потоках рассеяния могут переноситься на расстояние в сотни километров без заметного износа.

ЛИТЕРАТУРА

- Алмазные** месторождения Якутии / Ред. В.С. Соболев. М., Госгеолтехиздат, 1959, 525 с.
- Афанасьев В.П.** Закономерности эволюции кимберлитовых минералов и их ассоциаций при формировании шлиховых ореолов // Геология и геофизика, 1991 (2), с. 78—84.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н.** Минерагенция древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика, 1987 (1), с. 90—95.

Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений, 1999, т. 41, № 3, с. 281—288.

Афанасьев В.П., Соболев Н.В., Кириллова Е.А., Юсупов Т.С. Относительная абразивная устойчивость пиропа и пикроильменита — индикаторных минералов кимберлитов // Докл. РАН, 1994, т. 337, № 3, с. 359—362.

Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ СО РАН, 2000, 293 с.

Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2001, 276 с.

Кухаренко А.А. Минералогия россыпей. М., Госгеолтехиздат, 1961, 318 с.

Леонов Б.Н., Прокопчук В.И., Орлов Ю.Л. Алмазы Приленской области. М., Наука, 1976, 278 с.

Нестеренко Г.В. Происхождение россыпных месторождений. Новосибирск, Наука, 1977, 312 с.

Поляницын А.В. Об измельчении наносов под влиянием истирания // Метеорология и гидрология, 1966, № 9, с. 38—40.

Разумихин Н.В. К проблеме взаимоотношения между ведущими факторами россыпеобразования // Вестн. ЛГУ, 1973, № 18, с. 123—132.

Разумихин Н.В. Палеогеографические и гидрологические основы формирования аллювиальных россыпей. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1982, 256 с.

Харькив А.Д. Минералогические основы поисков алмазных месторождений. М., Недра, 1978, 136 с.

Шило Н.А. Основы учения о россыпях. М., Наука, 1981, 383 с.

Шумилов Ю.В. Физико-химические и литогенетические факторы россыпеобразования. М., Наука, 1981, 270 с.

Kuonen Ph.H. Experimental abrasion of sand grains // International Geological Congress. Report of the Twenty-First Session, Norden. 8 Submarine Geology. Copenhagen, 1960.

*Рекомендована к печати 22 мая 2007 г.
В.С. Шацким*

*Поступила в редакцию
20 февраля 2007 г.*