



УДК 550.4:549.211:548.535



ТИПОМОРФНЫЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯКУТИТОВ

В. А. Петровский¹, В. И. Силаев¹, А. Е. Сухарев¹, И. В. Смолева¹,
А. Л. Земнухов², Б. С. Помазанский³, С. С. Шевчук¹

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар,

²ОАО «Алмазы Анабары», Якутск

³НИГПАК «АЛРОСА» (ОАО), Мирный
petrovsky@geo.komisc.ru

Проведены минералого-геохимические исследования природных алмазов XI разновидности — якутитов. По изотопному составу углерода якутиты обнаруживают значительное своеобразие, полно не совпадая ни с одной из генетических популяций природных алмазов, включая и импактные. По изотопному составу азота якутиты скорее могут быть сопоставлены с мантийными, нежели с коровыми производными. В составе полиминеральных пленок на поверхности частиц якутитов значительную роль играют минералы, характерные для глубинного минералообразования — хромсодержащие шпинелиды, бадделеит, хромистое железо, карбиды тантала и, вероятно, ниобия. По комплексу свойств якутиты больше похожи на мантийные монокристалльные алмазы из кимберлитов и туффизитов уральского типа, чем на бразильские карбонадо.

Ключевые слова: *Сибирская платформа, якутиты, изотопный состав углерода и азота, полиминеральные пленки, бразильские карбонадо.*

TIPOMORFIC MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL PROPERTIES OF YAKUTITES

V. A. Petrovsky¹, V. I. Silaev¹, A. E. Sukharev¹, I. V. Smoleva¹,
A. L. Zemnukhov², B. S. Pomazanskiy³, S. S. Shevchuk¹

¹ Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktывkar

² OAO «Diamonds of Anabar», Yakutsk

³ NIGPAC «ALROSA» (OAO), Mirny

Conducted mineralogical and geochemical studies of natural diamonds XI variety — yakutite. The isotopic composition of carbon yakutite revealed significant identity, not fully coincide with any of the genetic populations of natural diamonds, including impact. The isotopic composition of nitrogen yakutite more likely to be associated with mantle, rather than crustal derivatives. As part polimineral films on the surface of the particles play a significant role yakutite minerals characteristic of deep mineral — chromium-containing spinels, baddeleyite, chromium iron, tantalum carbide and probably niobium. On a range of properties yakutite more like mantle single crystal diamonds from kimberlites and tuffizites Ural type than the Brazilian carbonado.

Key words: *Siberian platform, yakutites, isotopic composition of carbon and nitrogen, polymineral film, Brazilian carbonado.*

Целью настоящей работы стало выявление типоморфных свойств якутитов [3] — особой разновидности природных лонсдейлитсодержащих алмазов неопределенного генезиса, открытых в 1960-х гг. [11], но все еще

весьма мало изученных. Для исследований были использованы 30 образцов, отобранных геологами ОАО «Алмазы Анабара» из современных речных отложений в Прианабарском районе Сибирской платформы.

Исследованные образцы якутитов представляют собой частицы черного, темно-серого, темно-бурого цвета, неправильной угловатой формы, обычно с проявлением кливажности (рис. 1). Они характеризуются плотным скры-

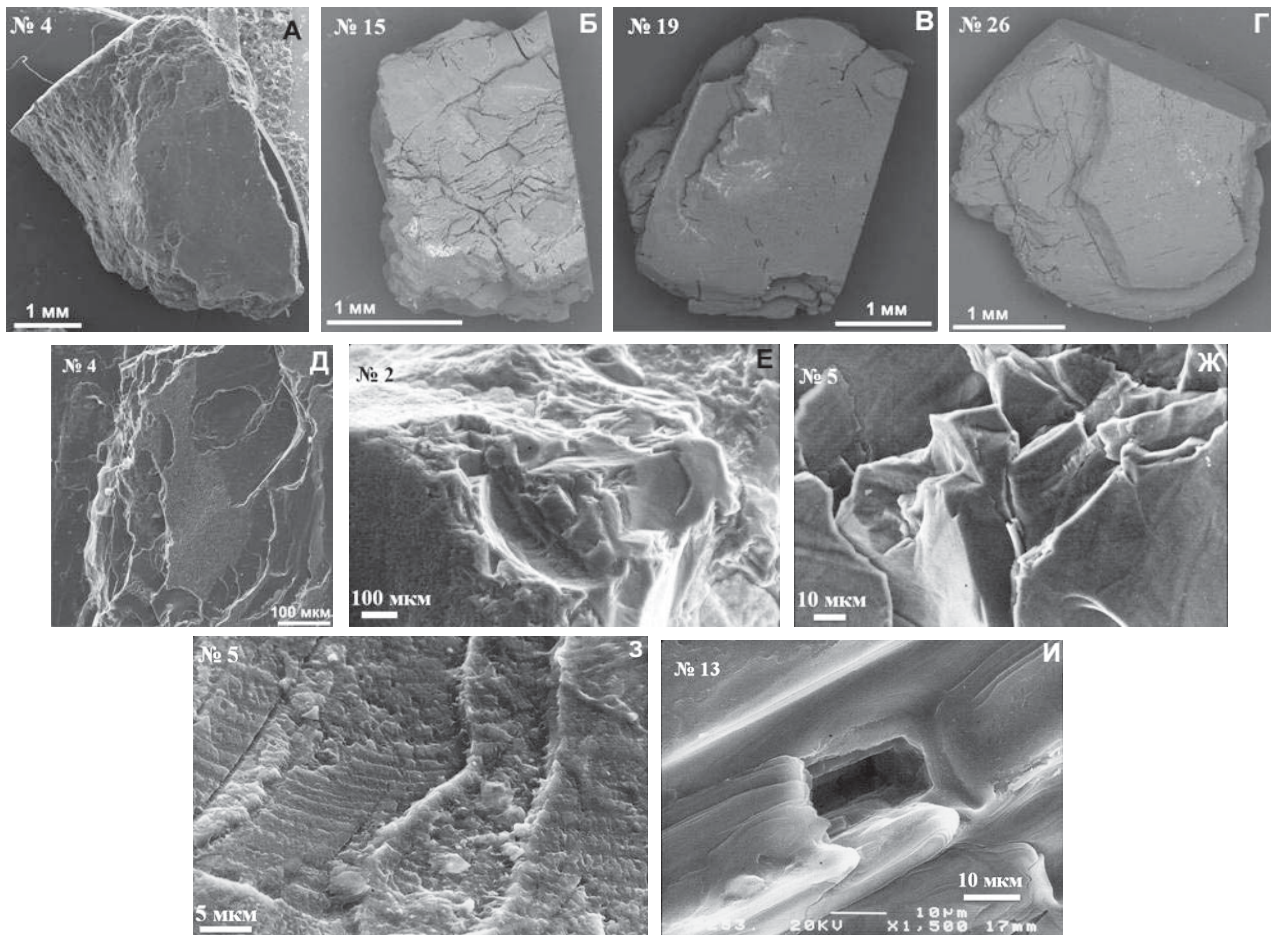


Рис. 1. Форма типичных частиц якутитов с проявлением кливажности, выраженной пластинчато-ступенчатым рельефом. СЭМ-изображения в режиме вторичных электронов

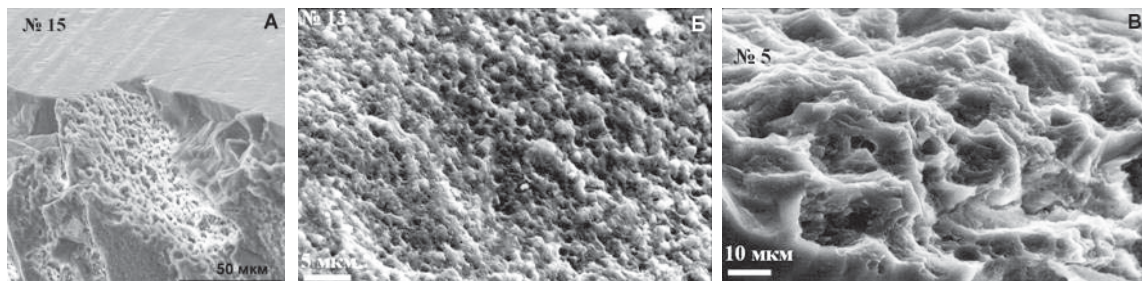


Рис. 2. Характер кавернозности на локальных участках поверхности частиц якутитов. СЭМ-изображения в режиме вторичных электронов

токристаллическим сложением, непрозрачны как в видимом, так и инфракрасном диапазонах. В тонких срезах, однако, приобретают более светлый коричневый цвет, становясь частично прозрачными и обнаруживая множество черных включений. На поверхности частиц часто встречаются микрокавернозные участки, появление которых, скорее всего, обусловлено кратковременным, но сильным растворением (рис. 2). В единичных случаях поверхность частиц осложнена чашеобразными впадинами с гладкими и микроступенчатыми стенками (рис. 3). Образование такой скульптуры можно объяснить налипанием газовых пузырьков. Кроме того, для исследуемых частиц весьма характерны

полиминеральные примазки и микропленки, присутствие которых легко обнаруживается даже при предварительном рентгеноспектральном микрозондовом анализе.

Изотопный состав углерода

Измерения изотопного состава углерода и азота производились на аналитическом комплексе, включающем в себя элементный анализатор Flash EA 1112, соединенный через газовый коммутатор Conflo IV с масс-спектрометром Delta V Advantage (фирмы Thermo Fisher Scientific). Полученные результаты показали, что алмазная фаза в якутитах варьируется по изотопному составу в пределах

значений $\delta^{13}\text{C}$ от -17 до -8 ‰ с модой при -12 ... -13 ‰ (табл. 1). Эти данные практически тождественны данным, ранее полученным для другой представительной коллекции якутитов [10]. Корреляция изотопного состава углерода с содержанием примеси лонсдейлита не установлена. В ходе эксперимента обнаружено, что по мере сжигания частиц якутитов изотопный состав углерода немного изменяется, что можно объяснить существованием в частицах якутитов некоторой изотопно-геохимической неоднородности. Практически у всех исследованных частиц края оказались на 12–13 % более изотопно-легкими по углероду, чем внутренние участки.



В сравнении с кимберлитовыми алмазами якутиты показали себя статистически значительно более изотопно-легкими, хотя диапазоны варьирования значений $\delta^{13}\text{C}$ в тех и других алмазах заметно перекрываются (рис. 4). В сравнении с попигайскими алмазами якутиты по углероду, напротив, статистически более изотопно-тяжелые. Наибольшее совпадение по диапазону колебаний $\delta^{13}\text{C}$ якутиты обнаруживают с монокристалльными алмазами из Эбеляхской россыпи, хотя моды в со-

ответствующих распределениях и на этот раз заметно расходятся — статистически эбеляхские алмазы по углероду изотопно несколько тяжелее, больше сближаются с кимберлитовыми алмазами экологитового парагенезиса.

На генеральной диаграмме варьирования изотопного состава алмазного углерода якутиты занимают промежуточное положение между кимберлитовыми и попигайскими алмазами, весьма контрастно обособляясь от бразильских карбонадо, ко-

торые характеризуются в 1.5–2 раза более легким углеродом (рис. 5). В рамках космогенно-мантийных образований якутиты изотопно коррелируются с C1–C2-хондритами, а по гипотетическому первоисточнику могут быть определены как угарногазовые производные.

Особый интерес вызывают определения изотопного состава азота, спорадически регистрируемого в якутитах. Значения изотопного коэффициента $\delta^{15}\text{N}$ для исследованных образ-

Таблица 1

Изотопный состав углерода и азота в якутитах

№ п/п	№ обр	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{15}\text{N}$, ‰
1	1	-13.4	-1.0
2	«	-12.8	Не обн.
3	2	-10.6	«
4	«	-9.8	«
5	3	-12.1	«
6	4	-12.9	«
7	6	-12.1	0.8
8	8	-13.2	Не обн.
9	«	-12.3	«
10	«	-12.3	«
11	«	-12.2	«
12	«	-12.1	«
13	9	-10.8	«
14	11	-12.6	«
15	«	-12.1	«
16	12	-9.2	«
17	«	-8.8	«
18	15	-12.9	«
19	«	-12.1	«
20	18	-13.9	«
21	19	-13.2	«
22	22	-9.5	«
23	23	-16.3	«
24	«	-16.1	«
25	24	-14.2	«
26	«	-13.3	«
27	25	-15.7	«
28	26	-9.0	«
29	«	-9.5	«
30	29	-8.7	«
31	«	-8.3	«
32	30	-16.2	«
33	«	-16.1	«
34	«	-15.1	«
35	«	-16.2	«
36	«	-15.8	«

Для образцов с содержанием лонсдейлитовой примеси от 1 до 10 %			
Среднее	-11.3	Единичное определение 0.8	
СКО	1.6		
Коэффициент вариации, %	14.2		
Для образцов с содержанием лонсдейлитовой примеси от 10 до 25 %			
Среднее	-14.3	Единичное определение -1.0	
СКО	2.1		
Коэффициент вариации, %	14.5		
Для образцов с содержанием лонсдейлитовой примеси более 25 %			
Среднее	-11.59	Не обн.	
СКО	2.53		
Коэффициент вариации, %	21.8		
Для всей коллекции			
Среднее	12.49	Единичные определения в диапазоне -1.0...0.8	
СКО	2.43		
Коэффициент вариации, %	19.5		

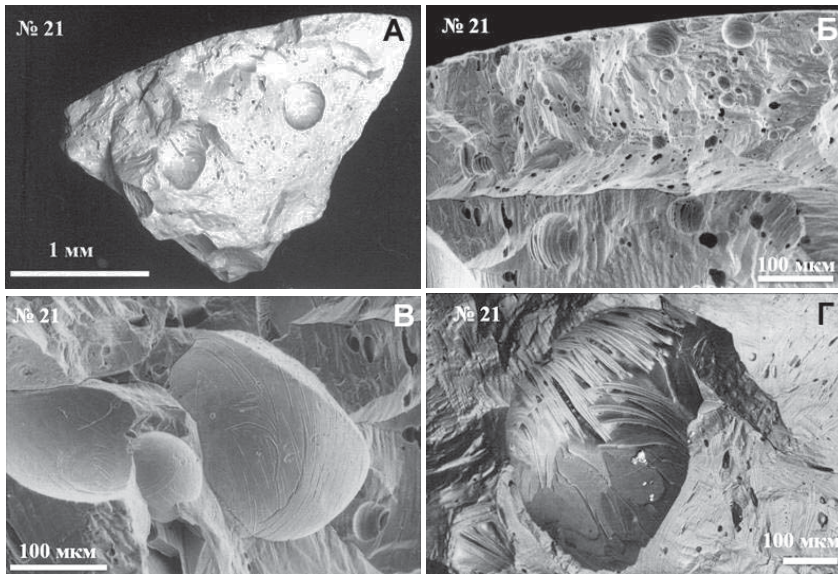


Рис. 3. Частица якутита со следами газовых пузырьков. СЭМ-изображение в режимах вторичных и упруго-отраженных электронов

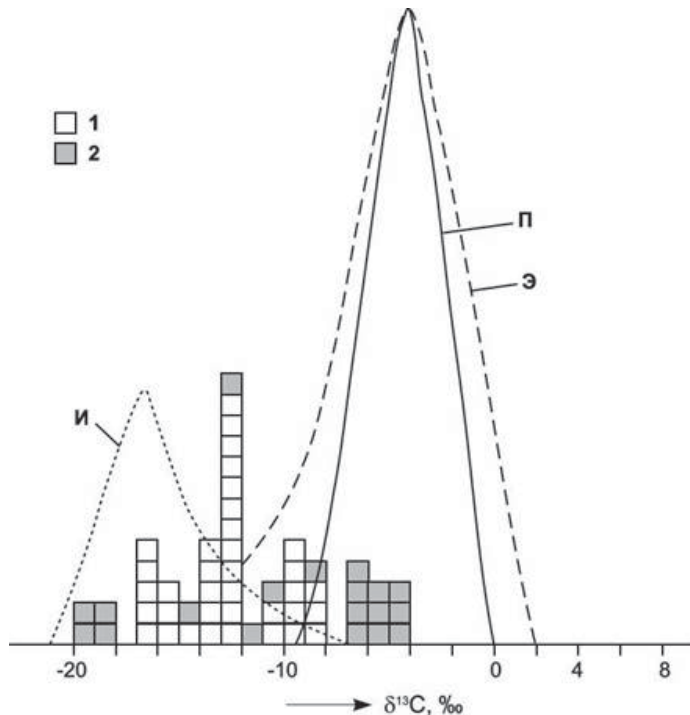


Рис. 4. Распределение значений коэффициента $\delta^{13}\text{C}$, характеризующее вариации изотопного состава углерода в якутитах (1) и алмазах из Эбеляхской россыпи (2). Вариационными кривыми показаны колебания изотопного состава углерода в кимберлитовых алмазах перидотитового (П) и экологитового (Э) парагенезисов, а также в алмазах импактного происхождения (И)



цов якутитов составили $-1...0.8\%$, что укладывается скорее в диапазон варьирования изотопного состава азота в мантийных алмазах, нежели в углеродистых веществах корового происхождения [7, 12].

Таким образом, по изотопному составу углерода якутиты обнаруживают значительное своеобразие, не совпадая полностью ни с одной из генетических популяций природных алмазов. При этом в ряду алмазов якутиты более всего отличаются именно от бразильских карбонадо, с которыми их когда-то пробовали отождествлять [2].

Ксеноминеральные пленки на поверхности якутитов

Для изучения ксеноминеральных примесей в якутитах были использованы аналитические сканирующие электронные микроскопы JEOL JSM-6390LV и VEGA TESCAN; JSM-6400. В режиме рентгеноспектрального микрозондового анализа эти примеси легко обнаруживаются уже по предварительным энергодисперсионным спектрам (рис. 6).

Проведенные исследования показали, что на частицах якутитов присутствуют ультратонкие полиминеральные пленки, иногда покрывающие значительную часть поверхности, но чаще наблюдающиеся в виде локальных примазок площадью $100-200\text{ мкм}^2$. Толщина пленок не превышает нескольких микрон. Их размещение большей частью контролируется микрорельефом, что является естественным для поверхностных микроминерализаций. Большой интерес вызывает тот факт, что выше отмеченные ямчато-кавернозные участки часто обнаруживаются именно под нарощими на поверхность якутитов полиминеральными пленками. Последнее свидетельствует о том, что локальное эпигенетическое растворение якутиты претерпевали еще до образования пленок, т. е. ранняя история якутитов не исчерпывается только фактом возникновения лонсдейлитсодержащего алмаза.

В составе пленок на поверхности якутитов нами выявлено около 50 минералов, что в несколько раз превышает данные наших предшественников [9, 10]. Обнаруженные нами минералы представляют все типы и многие из классов, относясь к простым веществам (самородные металлы и карби-

ды), галидам, халькогенидам, оксидам, силикатам и кислородным солям (табл. 2). Наиболее часто встречаются гидрослюды, гётит, титановые оксиды — ильменит и рутил, циркон, карбонаты, пироксены (рис. 7—12). В совокупности эти минералы образуют микропарастерезис, напоминающий так называемую биректинскую ассоциацию [4], которую считают типичной для якутитов. Кроме отмеченных минералов в составе исследуемых пленок выявлены шпинелиды ряда хромит-маг-

нетит, бадделит, множество самородно-металлических фаз, несколько карбидов. Эта группа минералов, очевидно, выходит за пределы ассоциации коровых минералов, отражая генетическую самобытность якутитов.

Размер индивидов в полиминеральных пленках для большинства минералов колеблется в пределах до 10 мкм , в случаях гётита и гидрослюды — до 100 мкм . Какой-либо корреляции между развитием пленок и содержанием в якутитах лонсдейлита нами

Таблица 2

Кадастр минералов, выявленных в полиминеральных пленках на поверхности частиц якутитов

№ п/п	Минерал	№ обр.	Частота встречаемости минеральных типов, %
<i>Самородные элементы и карбиды</i>			
1	Вольфрам самородный	13, 20	40.82
2	Железо самородное	21	
3	Железо никелистое	21	
4	Золото самородное	3, 4, 5	
5	Медь самородная	2	
6	Медь цинкистая	2	
7	Молибден самородный	1	
8	Цинк медистый	2	
9	Сплав Cu-Mo	1	
10	Сплав Cu-W	1	
11	Сплав Fe-Cr	1, 26	
12	Сплав Fe-Cr-Ni	19	
13	Сплав Cu-Pd	19	
14	Сплав Cu-Zn	2, 5	
15	Сплав Cu-Zn-Pb	2	
16	Сплав Cu-Sn	20	
17	Сплав W-Co-Fe	13	
18	Хамрабаевит, TiC	5	
19	Танталкарбид, TaC	4, 5, 19, 20	
20	Ниобийкарбид, NbC?	5, 20	
<i>Халькогениды</i>			
21	Сульфиды Cu-Zn	5	2.04
<i>Галиды</i>			
22	Галит	5	6.12
23	Хлориды K-Na	4, 5	
24	Хлориды K-Na-Mg	5	
<i>Оксиды, оксигидроксиды и гидроксиды</i>			
25	Бадделит	4, 14	26.53
26	Бадделит гафнийсодержащий	14	
27	Гётит	1, 2, 3, 5, 13, 14, 28	
28	Ильменит	1, 21	
29	Кадваладерит, Al(OH) ₃ , Cl 4H ₂ O	5	
30	Кварц	4, 5, 13, 14, 19, 26	
31	Корунд	4	
32	Магнетит	14	
33	Магнетит хромсодержащий (хроммагнетит)	1, 13, 14	
34	Оксиды Mn-Fe-Cr	21	
35	Рутил	4, 5, 26	
36	Тунгстит WO ₃ , H ₂ O	20	
37	Хромит	14	
<i>Силикаты и кислородные соли</i>			
38	Альбит	4, 5	24.49
39	Гидрослюды	1, 2, 3, 5, 13, 14, 21	
40	Калиевый полевой шпат	1	
41	Циркон	4, 14	
42	Циркон гафнийсодержащий	14	
43	Энстатит	4, 26	
44	Кальцит	4, 5	
45	Кальцит магнезиальный	5	
46	Ангидрит	5	
47	Апатит	1	
48	Гипс	5	
49	Фосфаты Mg, Ca, Fe	5, 14	

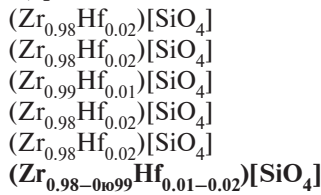


не обнаружено. Однако установлено, что пленки на частицах якутитов, наиболее обогащенных микроэлементами (данные ЛА МС-ИСП), оказались по минеральному составу наименее разнообразными. Это, возможно, указывает на то, что основную роль в формировании ассоциации микроэлементов в якутитах играют все-таки не плечные микроминерализации, а ксеноминеральные включения внутри частиц.

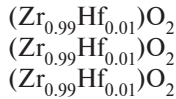
Определение состава минералов в пленках представляет значительную трудность в связи с дисперсностью минералов и взаимным тонким их прорастванием. Поэтому к настоящему времени более или менее достоверно определен состав только части минералов, указанных в рамке.

Статистический анализ показал, что в составе полиминеральных пленок на поверхности частиц якутитов по частоте встречаемости резко преобладают простые вещества — самородные металлы, их сплавы и карбиды, а силикаты и кислородные соли характеризуются небольшим распространением. Такое соотношение не только противоположно пропорциям между кристаллохимическими типами в земной коре, в которой резко преобладают как раз силикаты и кислородные соли, но и отличается сдвигом в сторону простых веществ даже в сравнении с ксеноминеральными примесями в карбонадо [8]. Не исключено, что выяв-

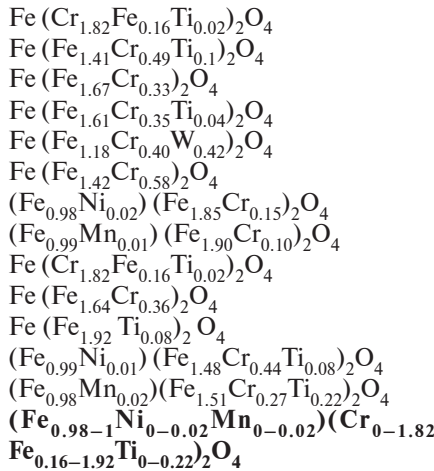
Циркон



Бадделейт



Ряд хромит—магнетит



Самородные металлы

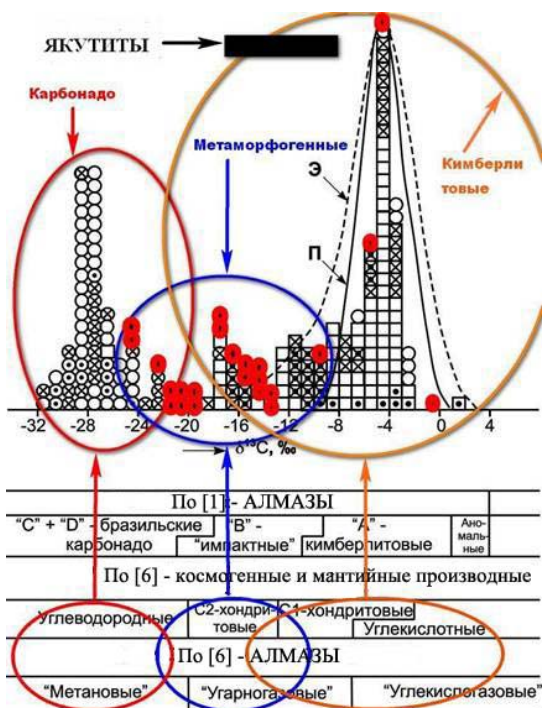
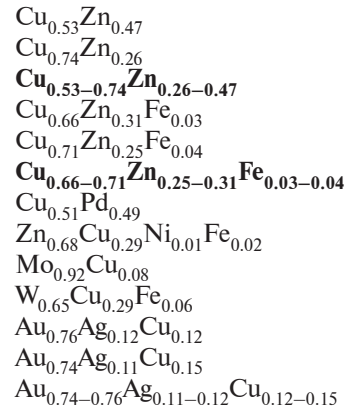
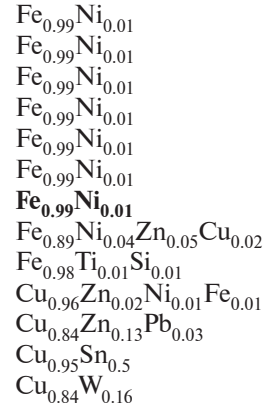
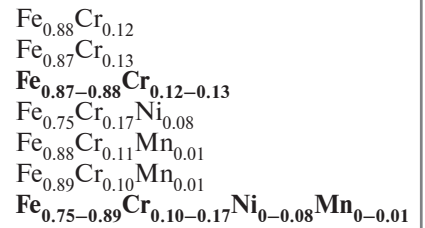
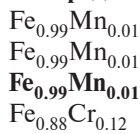


Рис. 5. Генеральная диаграмма изотопного состава углерода в алмазах различного происхождения

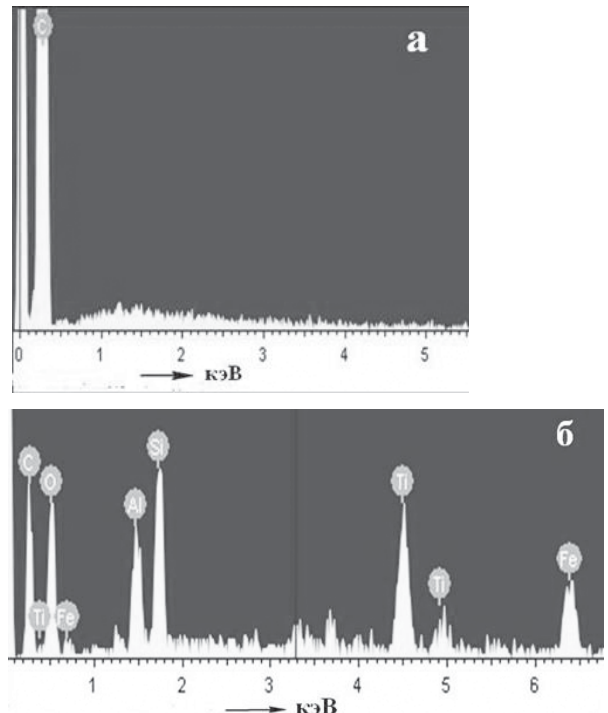


Рис. 6. Типичные ЭД-спектры, полученные с чистой поверхности якутита (а) и с его поверхности, покрытой ксеноминеральными пленками (б)

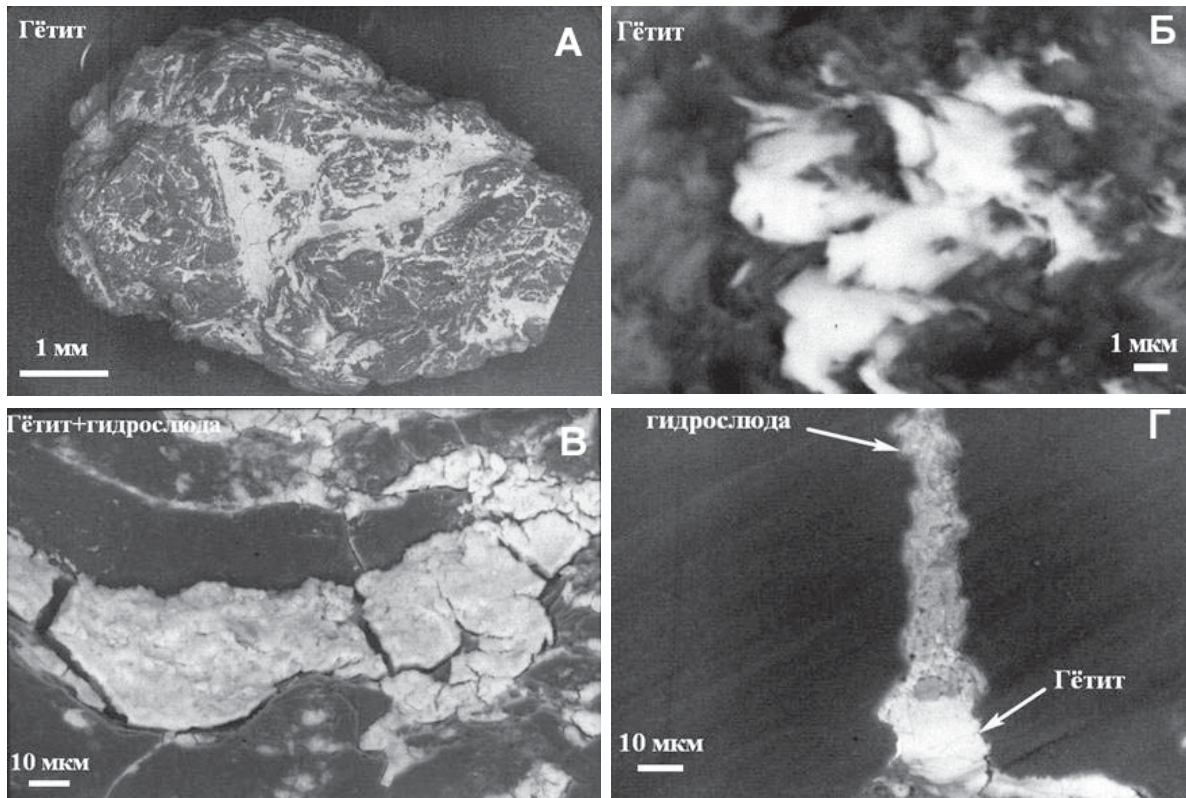


Рис. 7. Выделения гётита и гидрослюда. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

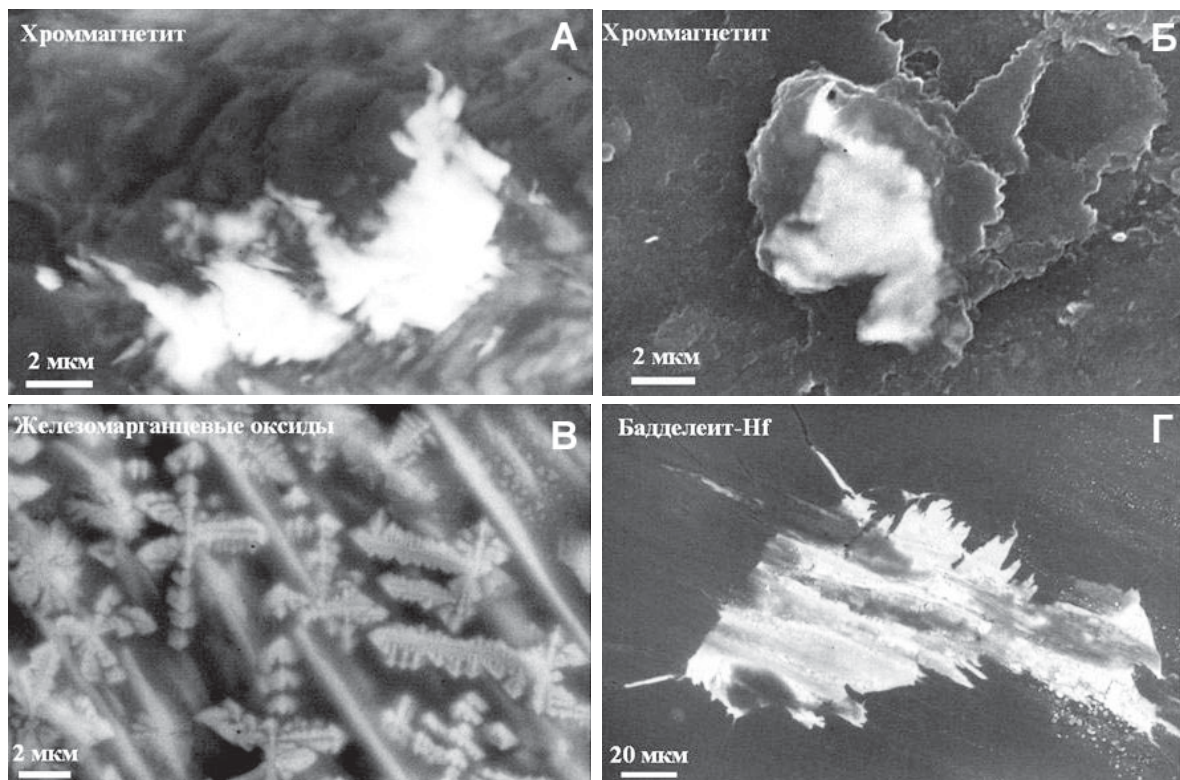


Рис. 8. Наиболее распространенные оксиды в пленках на поверхности якутитов. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

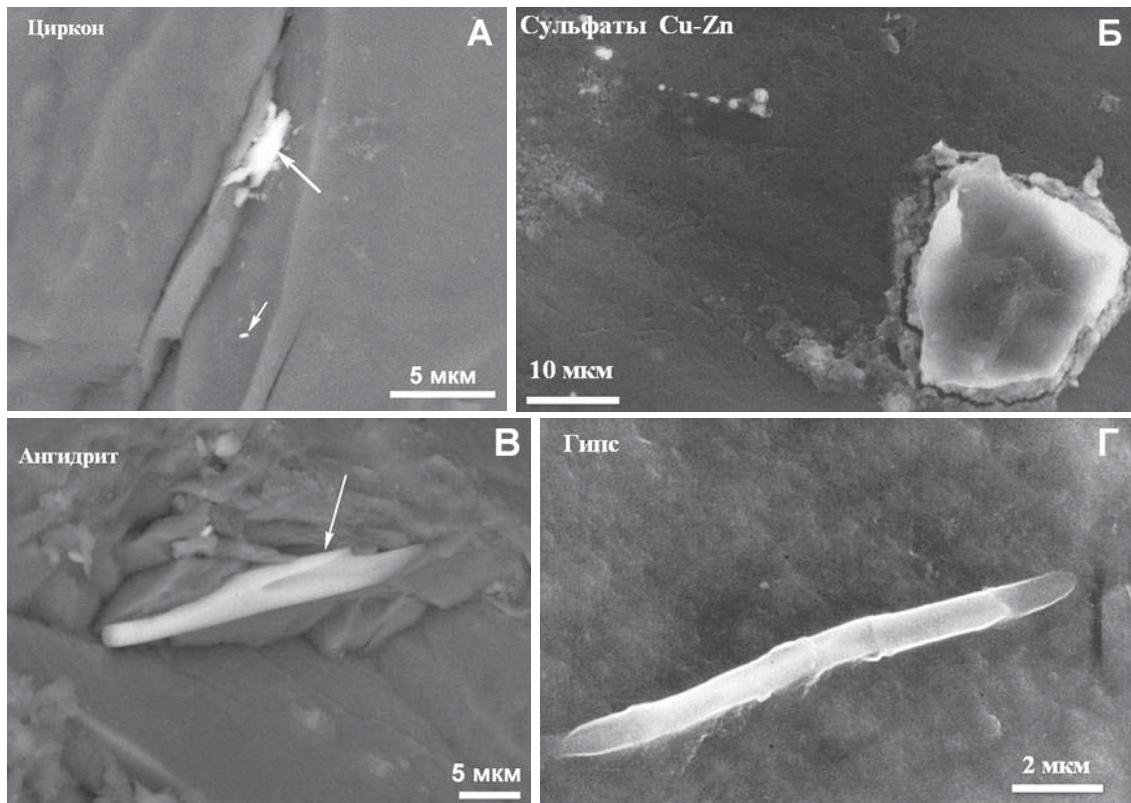


Рис. 9. Силикаты и кислородные соли в пленках на поверхности якутитов. СЭМ-изображения в режимах вторичных и упруго-отраженных электронов

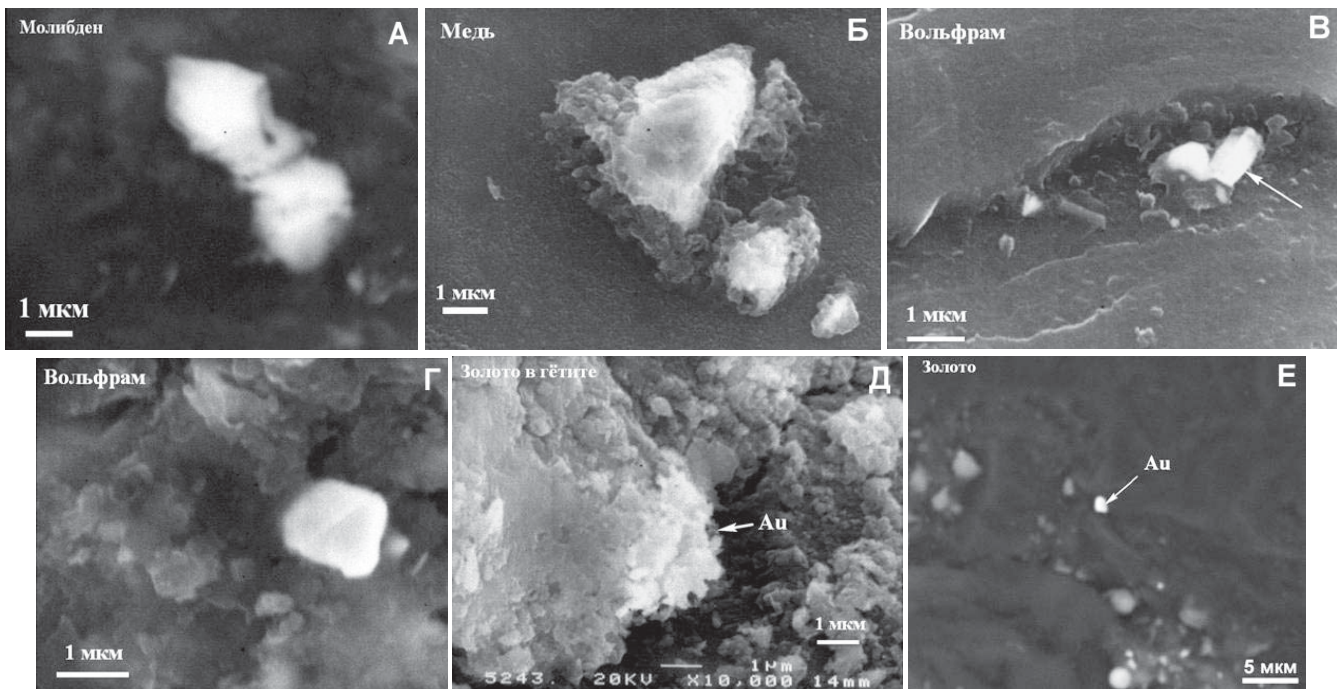


Рис. 10. Самородные металлы в пленках на поверхности частиц якутитов. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

ленный акцент на простые соединения в исследуемых полиминеральных пленках обусловлен малой размерностью соответствующих индивидов [5]. Нельзя также не отметить того, что в составе пленок на частицах якутитов значительную роль играют минералы, характерные скорее для глубинного, нежели корового

минералообразования, — хромсодержащие шпинелиды, бадделейт, хромистое железо, карбиды тантала и, вероятно, ниобия.

Работа выполнена при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ОАО) (договор НИР № 10/2011) и Проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 12-У-5-1026.

Литература

1. Галимов Э. М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия. 1984. № 8. С. 1091—1117.
2. Орлов Ю. Л., Каминский Ф. В. Карбонадо с лонсдейлитом — новая (XI) разновидность поликристаллических агрегатов алмаза // Докла-

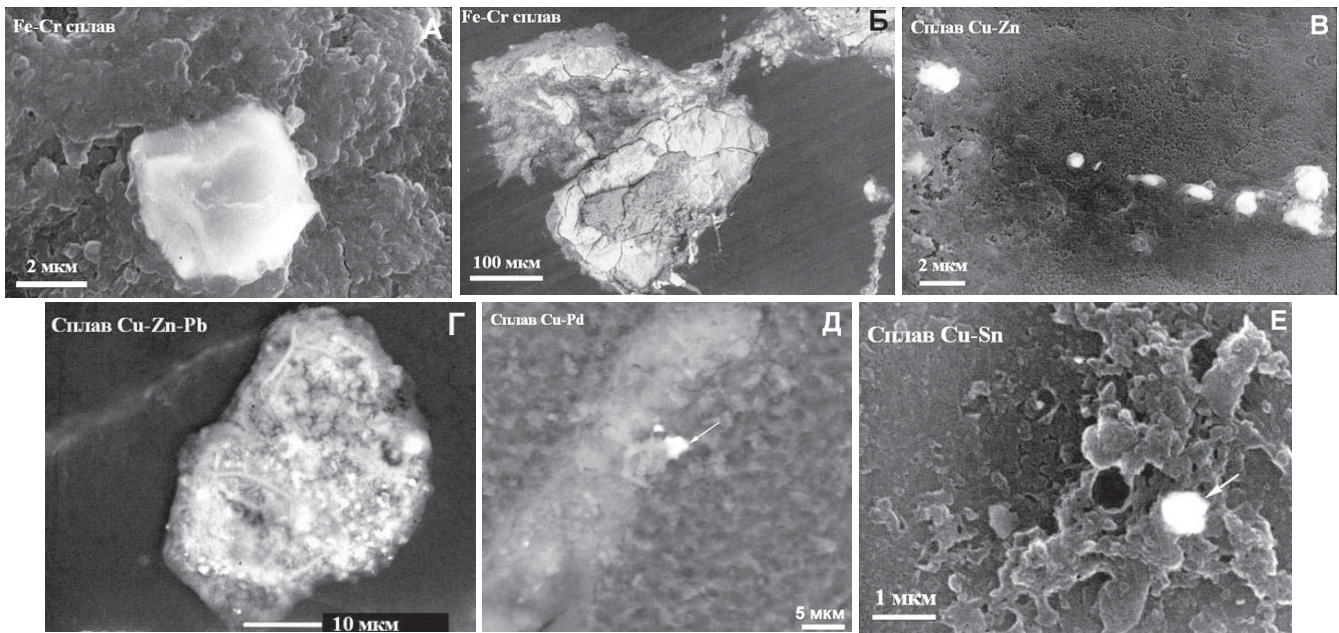


Рис. 11. Нестехиометричные сплавы в пленках на поверхности частиц якутитов. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

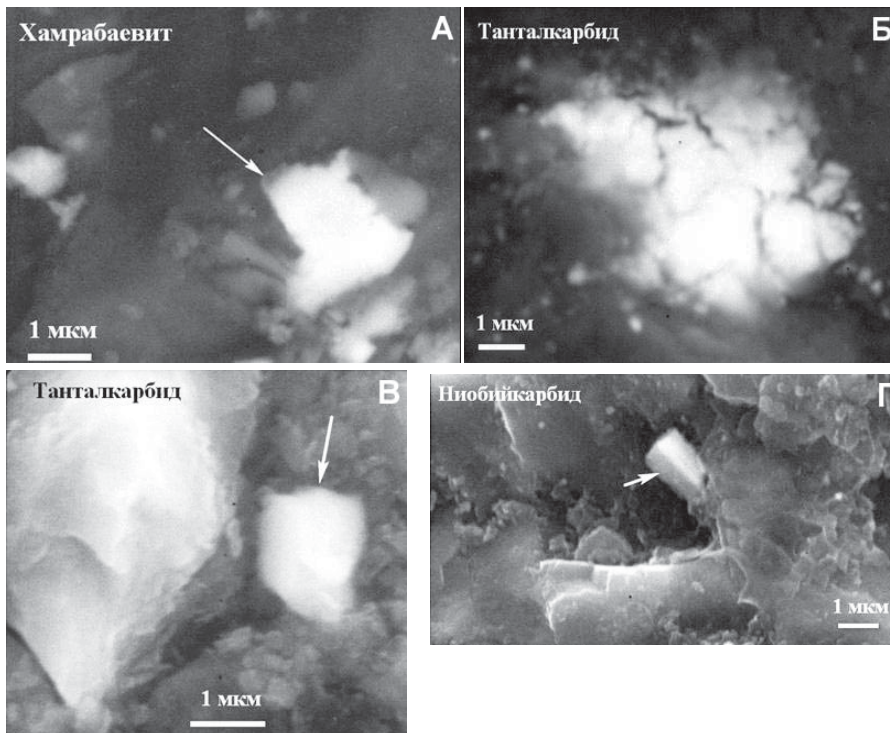


Рис. 12. Карбиды в пленках на поверхности частиц якутитов. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

ды АН СССР, 1981. Т. 256. № 2. С. 469—461.

3. Петровский В. А., Силаев В. И., Сухарев А. Е., Земнухов А. Л., Помазанский Б. С. Якутиты: новые результаты минералого-геохимических исследований // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии: Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар, 2013. С. 85—89.

4. Прокопчук Б. И. Алмазные россыпи и методика их прогнозирования и поисков. М.: Недра, 1976. 244 с.

5. Силаев В. И., Лютоев В. П., Чайковский И. И. и др. Фактор размерности индивидов в минералогии // Минералогическая интервенция в микро- и наномир: Материалы международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 67—72.

6. Силаев В. И., Петровский В. А., Сухарев А. Е. Изотопная неоднород-

ность углерода в мантийных производных, включая карбонадо. Сыктывкар: Геопринт, 2006. 40 с.

7. Силаев В. И., Смолева И. В., Антошкина А. И., Чайковский И. И. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Материалы научных чтений памяти П. Н. Чирвинского. Пермь: Изд-во ПГУ, 2012. № 15. С. 342—366.

8. Сухарев А. Е., Петровский В. А. Минералогия карбонадо и экспериментальные модели их образования. Екатеринбург: УРО РАН, 2007. 196 с.

9. Титков С. В., Горшков А. И., Магазина Л. О. и др. Бесформенные темные алмазы (якутиты) из россыпей Сибирской платформы и критерии их импактного происхождения // Геология рудных месторождений, 2004. Т. 46. № 3. С. 222—234.

10. Угальева С. С., Заякина Н. В., Павлушин А. Д., Олейников О. Б. Результаты комплексного минералогического исследования якутитов из россыпей Анабарского алмазоносного района // Отечественная геология, 2010. № 5. С. 37—45.

11. Чумак М. А., Бартошинский З. В. Якутит — новая разновидность алмаза // Геолог Якутии, 1968. № 27 (556). С. 1.

12. Cartigny P. Stable Isotopes and the Origin of Diamond // Elements, 2005. V. 1. P. 79—84.

Рецензент
к. г.-м. н. В. П. Лютоев