

Парагенетические особенности состава хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах (Якутия)

А. М. Хмельков[✉], Э. А. Власова

*Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО),
ул. Первооткрывателей, 1, п. Айхал, 678190, Республика Саха (Якутия),
Российская Федерация*

Аннотация

Введение: С использованием специализированной программы «MineralogicalAnalyse» были исследованы парагенетические особенности состава хромшпинелидов из непромышленной россыпи Дьюкунах (Якутия). Коренные источники алмазов, за счет которых сформировалась россыпь, не установлены, поэтому россыпь представляет поисковый интерес. Совместно с алмазами в россыпи присутствуют гранат и хромшпинелид.

Методика: Программа «MineralogicalAnalyse» специально создана для определения парагенетической принадлежности кимберлитовых минералов на основе их состава и способна распознавать среди хромшпинелидов 20 парагенезисов. Всего из отложений россыпи Дьюкунах было изучено 457 зерен хромшпинелидов. Состав хромитов предварительно был исследован на электронном микроанализаторе. С целью определения парагенетической специализации хромшпинелидов все анализы были подвергнуты пересчету с помощью программы «MineralogicalAnalyse».

Результаты и обсуждение: Детально описаны особенности состава хромшпинелидов из определяемых программой парагенезисов и их взаимоотношения. Установлено, что в россыпи Дьюкунах по составу преобладают хромшпинелиды некимберлитового генезиса, на долю которых приходится более 70%. Кимберлитовые хромшпинелиды имеют подчиненное значение (23.6%). Среди типичных кимберлитовых хромшпинелидов в отложениях россыпи преобладают разности из неалмазных перцолитов.

Выводы: Установленные в россыпи хромшпинелиды некимберлитового генезиса не могут ассоциировать с алмазами и гранатами в плане их общих первоисточников. Поэтому ассоциацию кимберлитовых минералов в россыпи Дьюкунах более правильно называть не как пироп-хромшпинелидовую, а как пироповую или алмаз-пироповую. Таким образом, программы «MineralogicalAnalyse» позволяет более достоверно судить о генезисе хромшпинелидов не только в кимберлитах, но и в россыпях.

Ключевые слова: минералы-индикаторы кимберлита, парагенезис, алмазоносный, хромшпинелиды, кимберлиты, россыпь.

Для цитирования: Хмельков А. М., Власова Э. А. Парагенетические особенности состава хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах (Якутия) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. №4. С. 36–45. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3125>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Хмельков Александр Михайлович, e-mail: st_56@mail.ru

Введение

Парагенезис минералов-индикаторов кимберлитов (МИК) имеет прямое отношение к алмазности кимберлитовых пород, так как состав минералов несет информацию о процессах глубинного минералообразования. Поэтому определение парагенезиса МИК позволяет судить не только о глубинных источниках минералов в кимберлитах, но и о степени алмазности их источников.

Кимберлитовые тела различаются как набором минеральных парагенезисов, так и их количественными соотношениями. При этом состав минералов каждого парагенезиса типоморфен. При общей трансформации минеральной ассоциации в процессе ореолообразования, набор МИК различных парагенезисов и их соотношения слабо меняются. Данное обстоятельство позволяет проводить сравнительный анализ парагенетических особенностей состава минералов из шлиховых ореолов и кимберлитовых тел.

С помощью специализированной программы «MineralogicalAnalyse» был изучен химический состав хромшпинелидов из верхнепалеозойской россыпи Дьюкунах. Россыпь расположена в бассейне р. Алымджа, в пределах Моркокинского алмазного района Якутской алмазной провинции (ЯАП). В геологическом строении россыпи принимают участие терригенные отложения лапчанской свиты среднего карбона, ботубинской свиты среднего-верхнего отдела карбона, а также боруллойской свиты верхнего отдела перми и современные отложения. Несмотря на относительно повышенную алмазность лапчанской свиты, россыпь Дьюкунах является непромышленной. Тем не менее, она представляет поисковый интерес, так коренные источники алмазов, за счет которых сформировались отложения россыпи, до сих пор не установлены. В ближайшем окружении кимберлитовые тела отсутствуют, и вопрос переноса алмазного материала в пределы россыпи до сих пор является дискуссионным. Совместно с алмазами в россыпи имеют широкое распространение гранат и хромшпинелид при полном отсутствии пикроильменита.

Теоретическая часть

Для пересчета микронзондовых анализов и определения парагенетической принадлежности МИК на основе их состава, в том числе хромшпинелидов, была специально создана программа «MineralogicalAnalyse» [1].

Основу эталонной базы программы химических составов хромшпинелидов составили данные из опубликованных источников [2-8], которые были существенно дополнены собственными анализами авторов. Подавляющая часть составов из эталонной базы представлена анализами хромшпинелидов из глубинных ксенолитов в кимберлитах [3, 6]. Помимо составов хромшпинелидов непосредственно из кимберлитов, в базу программы «MineralogicalAnalyse» были внесены составы ферришпинелей «серкинского» типа [9] и хромшпинелей «курунгского» типа [2] некимберлитового генезиса, а также шпинелидов из базальтоидов [7,

8], имеющих широкое распространение в ореолах рассеяния. Не учет данных составов при парагенетической классификации хромшпинелидов из шлиховых ореолов неизбежно приведет к существенному искажению результатов, в том числе при определении парагенезиса непосредственно кимберлитовых разностей.

В результате детального анализа составов хромшпинелидов из различных источников с привлечением статистических методов было определено 20 парагенетических групп, различающиеся по химизму и степени алмазности их источников. Составы по данным парагенетическим группам были внесены в базу программы «MineralogicalAnalyse» в качестве эталонов, используя которые программа определяет парагенетическую специализацию хромшпинелидов.

К хромшпинелидам высокоалмазного парагенезиса нами отнесены разности из включений в алмазах и сростков с ними с характерным для них составом. К потенциально алмазному парагенезису – хромшпинелиды преимущественно из алмазных ксенолитов, незначительно из неалмазных, также с типоморфным для них составом. К хромитам неалмазных парагенезисов отнесены разности исключительно из неалмазных ксенолитов и имеющие некимберлитовый генезиса с соответствующими составами. Ниже приводится перечень хромшпинелидов из определяемых парагенетических групп и их аббревиатуры, которые программа «MineralogicalAnalyse» автоматически присваивает каждому составу:

- 1) из высокоалмазных дунитов и гарцбургитов (включения в алмазах перидотитового парагенезиса) – ВАДГ; 2) из потенциально алмазных гарцбургитов с высокохромистым шпинелидом – ПАГВ; 3) из неалмазных лерцолитов с высокохромистым шпинелидом – НЛВ; 4) из неалмазных лерцолитов со среднехромистым шпинелидом – НЛС; 5) из неалмазных лерцолитов с низкохромистым шпинелидом – НЛН; 6) из неалмазных гранатовых вебстеритов и гарцбургитов с низкохромистым шпинелидом – НГВГН; 7) из неалмазных лерцолитов и пироксенитов с низкохромистым шпинелидом – НЛПН; 8) из неалмазных магнезиальных алькремитов – НМА; 9) из неалмазных магнезиально-кальциевых алькремитов – НМКА; 10) из неалмазных катаклазированных лерцолитов – НКЛ; 11) из зональных гранатов и сростков с ними – НЗГ; 12) гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки из неалмазных ксенолитов, в том числе катаклазированных лерцолитов – НГКШС; 13) высокожелезистые шпинелиды из зональных гранатов – НЗГЖ; 14) из неалмазных шпинелевых дунитов – НШД; 15) из неалмазных шпинелевых вебстеритов (с плагиоклазом и графитом) – НШВ; 16) из неалмазных флогопитовых пироксенитов – НФП; 17) из неалмазных глиммеритов (шпинелевых) – НГ; 18) ферришпинели «серкинского» типа некимберлитового генезиса – НСТ; 19) хромшпинелиды «курунгского» типа некимберлитового генезиса – КТ; 20) типичные шпинелиды из базальтоидов – ШБ.

В таблице приведены средние составы хромшпинелидов по парагенетическим группам, а на рисунке 1 показана дендрограмма результатов кластерного анализа составов, построенная с использованием пакета «Statistical». Дендрограмма показывает схожесть и различия хромшпинелидов различных парагенезисов по составу и их взаимоотношения между собой.

Из рисунка 1 видно, что составы хромшпинелидов четырех парагенезисов (ВАДГ-, НЛВ-, КТ- и ПАГВ-парагенезисы) объединились в одну кластерную группу на относительно низком уровне связывания. Хромшпинелиды всех четырех парагенезисов представлены высокохромистыми разностями, при этом хромшпинелиды КТ-парагенезиса представлены некимберлитовой разновидностью «курунгского» типа [2]. По большинству оксидов составы хромшпинелидов данных парагенезисов перекрываются с учетом доверительных интервалов. Из них наиболее близки по химизму высокохромистые хромшпинелиды из неалмазоносных лерцолитов (НЛВ-парагенезис) и разности «курунгского» типа (КТ-парагенезис). Хромшпинелиды «курунгского» типа отличаются как от разностей НЛВ-парагенезиса, так и от хромшпинелидов других парагенезисов данной кластерной группы более низкими содержаниями магния (в среднем 10.61 мас.% MgO) и титана (в среднем всего 0.04 мас.% TiO₂) при более высоких параметрах по марганцу (в среднем 0.38 мас.% MnO) и закисному же-

лезу (в среднем 17.21 мас.% FeO) (табл.). Источниками некимберлитовых хромшпинелидов «курунгского» типа предполагаются породы ультраосновных массивов [2]. Они имеют достаточно широкое распространение в ореолах рассеяния в пределах Мало-Ботуобинского, Ыгыаттинского и Моркокинского алмазоносных районов ЯАП, где их содержание по отдельным водотокам достигает 80% от общего количества хромшпинелидов (реки Алымджа, Левый Нижний Вилюйкан и др.). Хромшпинелиды КТ-парагенезиса встречаются и непосредственно в кимберлитах в качестве ксеногенного материала, однако их содержание обычно не превышает 10–15% от общей массы кимберлитовых разностей.

Среди разностей типичных кимберлитовых парагенезисов данной общей кластерной группы также существуют некоторые отличия. Так, хромшпинелиды ВАДГ- и ПАГВ-парагенезисов помимо повышенной хромистости, которая в обеих разностях превышает 62 мас.% Cr₂O₃ [6], в отличие от хромшпинелидов из неалмазоносных лерцолитов обладают более низкой глиноземистостью и титанистостью (табл.). Одновременно хромшпинелиды ВАДГ-парагенезиса, по сравнению с разностями из потенциально алмазоносных гарцбургитов, характеризуются более низкой магниезальностью (в среднем 12.40 мас.% против 15.14 мас.% MgO) и более высоким содержанием закисного железа (в среднем 14.19 мас.% против 8.07 мас.% FeO).

Табл. Средние составы хромшпинелидов по парагенетическим группам
[Tabl. Average compositions of chromspinelides according to paragenetic groups]

№ п.п. [№ in order]	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	Парагенезис [Paragenesis]
1	12.40	5.44	0.29	63.69	0.27	14.19	3.15	ВАДГ
2	15.14	6.95	0.28	63.26	0.29	8.07	4.32	ПАГВ
3	12.41	9.51	0.72	56.10	0.29	15.59	5.54	НЛВ
4	15.47	21.22	0.23	46.45	0.31	12.07	3.92	НЛС
5	15.38	30.39	0.19	36.71	0.23	11.40	3.22	НЛН
6	17.07	41.16	0.12	26.06	0.14	9.76	2.76	НГВГН
7	19.14	47.84	0.26	19.17	0.21	9.19	2.65	НЛПН
8	20.87	51.21	0.16	10.87	0.13	0.12	4.19	НМА
9	22.03	64.60	0.08	2.48	0.05	8.74	1.72	НМКА
10	14.18	7.79	4.96	44.39	0.57	13.96	14.80	НКЛ
11	8.88	14.00	2.19	36.98	0.41	22.02	9.13	НЗГ
12	10.36	5.39	3.09	49.16	0.34	19.45	12.24	НГКШС
13	8.12	6.76	4.06	36.98	0.32	23.91	18.29	НЗГЖ
14	13.53	31.50	0.12	33.06	0.13	16.53	4.45	НШД
15	15.62	60.35	0.09	6.60	0.00	17.26	0.08	НШВ
16	17.17	49.53	0.62	7.78	0.00	14.06	11.05	НФП
17	6.06	0.15	0.78	46.91	0.00	23.46	23.52	НГ
18	12.39	7.84	4.69	42.74	0.36	18.09	14.13	НСТ
19	10.61	9.35	0.04	60.29	0.38	17.21	2.06	КТ
20	7.57	15.74	5.07	31.09	0.28	27.09	12.73	ШБ

На рисунке 2 приведена традиционная для хромшпинелидов диаграмма в координатах Cr_2O_3 - Al_2O_3 , на которой показано положение средних составов хромшпинелидов по парагенетическим группам. На данном рисунке точки средних составов хромшпинелидов всех четырех описанных выше парагенезисов располагаются в относительной близости друг от друга в высокохромистой низкоглиноземистой области. При этом хромшпинелиды ПАГВ-парагенезиса попадают в область алмазной ассоциации [10] совместно с разновидностями ВАДГ-парагенезиса.

Среди достаточно близких по составу хромшпинелидов других парагенезисов, располагающихся на низ-

ком уровне связывания (рис. 1), следует отметить разности из неалмазоносных катаклазированных лерцолитов (НКЛ-парагенезис) и ферришпинели «серкинского» типа (НСТ-парагенезис) некимберлитового генезиса [9]. Ферришпинели НСТ-парагенезиса отличаются от разновидностей НКЛ-парагенезиса более высоким содержанием закисного железа при более низких параметрах по хрому и магнию (табл.). На диаграмме Cr_2O_3 - Al_2O_3 точки средних составов шпинелидов НСТ-парагенезиса и НКЛ-парагенезиса располагаются в непосредственной близости друг от друга в умеренно-хромистой области (рис. 2).

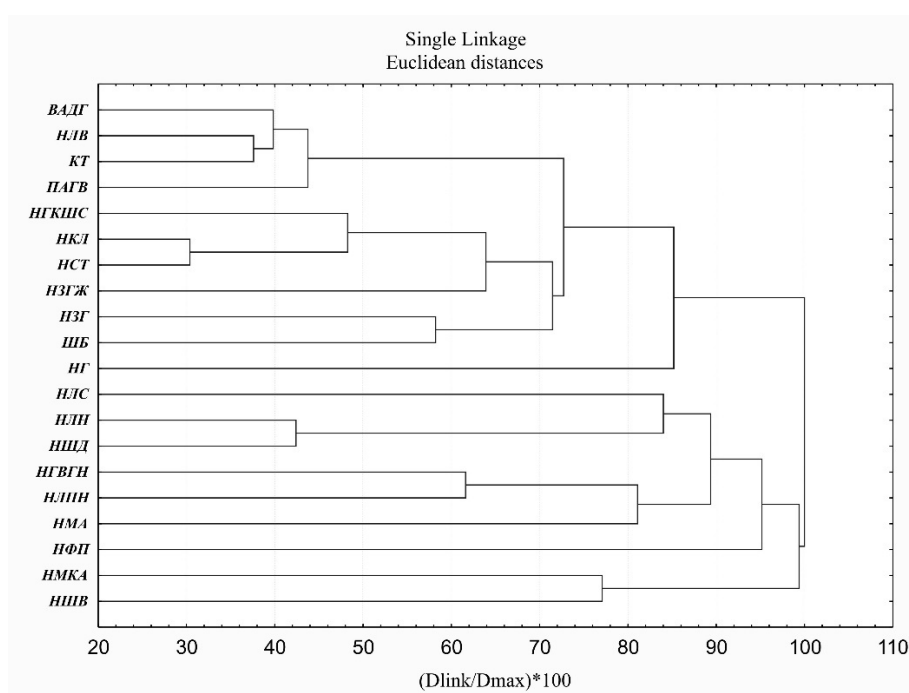


Рис. 1. Результаты кластерного анализа составов хромшпинелидов различных парагенетических групп.
[Fig. 1. Results of the cluster analysis of chromspinelides compositions from various paragenetic groups.]

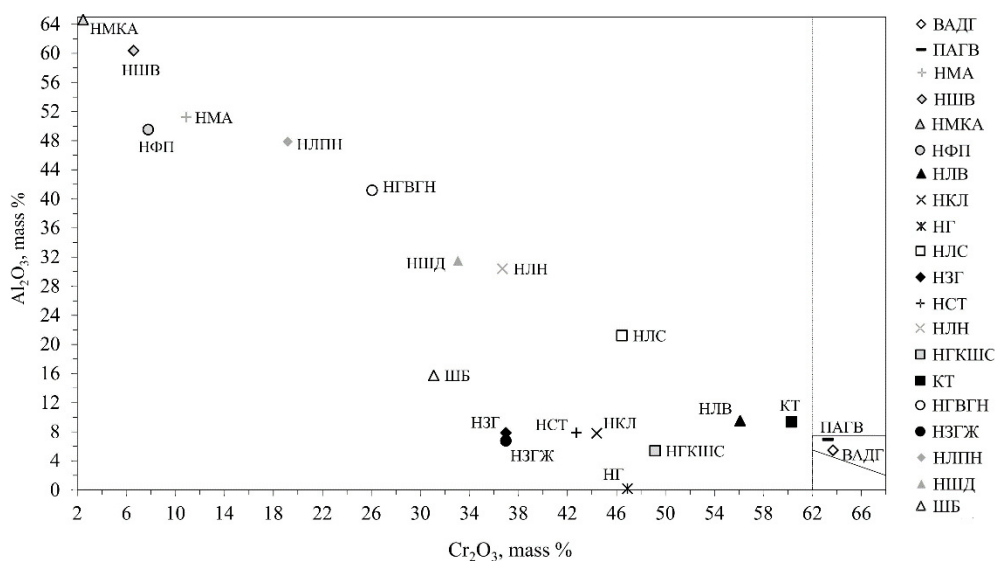


Рис. 2. Положение средних составов хромшпинелидов из парагенетических групп на диаграмме Cr_2O_3 - Al_2O_3 .
[Fig. 2. Position of average chromspinelides compositions from paragenetic groups on the Cr_2O_3 - Al_2O_3 diagram.]

Ферришпинели «серкинского» типа получили свое название по водотоку, где первоначально был детально изучен их состав (р. Серки) [9]. Источниками их, предположительно, являются породы основного (щелочно-основного) состава, в том числе кимберлитоподобные типа щелочных базальтоидов. Ферришпинели НСТ-парагенезиса могут иметь место непосредственно и в кимберлитах в качестве ксеногенного материала, но доля их обычно не превышает 20% среди общего количества данного минерала. Наиболее широко шпинелиды НСТ-парагенезиса распространены в современных ореолах рассеяния в пределах Муно-Тюнгского и Приленского алмазоносных районов ЯАП, где их содержание достигает 80–100% от общего количества хромшпинелидов (бассейны рек Серки, Тюнг, Чимидиан и др.).

Схожесть по составу с хромшпинелидами НСТ- и НКЛ-парагенезисов проявляют разности из гранат-клинопироксен-шпинелевых сростков (НГКШС-парагенезис). Хотя на кластерной дендрограмме данные составы располагается на достаточно высоком уровне связывания (рис. 1). Хромшпинелиды НГКШС-парагенезиса встречаются исключительно в неалмазоносных ксенолитах, в том числе в катаклазированных лерцолитах [6]. Однако при одинаково высокой титанистости и близкой хромистости, разности НГКШС-парагенезиса отличаются более низкой магниальностью и глиноземистостью (табл.). На диаграмме в координатах $Cr_2O_3-Al_2O_3$ (рис. 2) точка состава хромшпинелидов НГКШС-парагенезиса несколько удалена как от разностей «серкинского» типа, так и от шпинелидов НКЛ-парагенезиса.

Несколько схожий состав (рис. 1) имеют низкохромистые хромшпинелиды из неалмазоносных лерцолитов (НЛН-парагенезис) и из неалмазоносных шпинелевых дунитов (НШД-парагенезис). В то же время, хромшпинелиды из неалмазоносных шпинелевых дунитов, в отличие от шпинелей НЛН-парагенезиса [6], характеризуются более низкой хромистостью (в среднем 33.06 мас.% против 36.71 мас.% Cr_2O_3) и более высоким содержанием закисного железа (в среднем 16.53 мас.% против 11.40 мас.% FeO) (табл.). Разности НШД-парагенезиса были установлены в неалмазоносных ксенолитах шпинелевых дунитов из трубок Ноябрьская и Обнаженная Бенчимэ-Куойкского поля ЯАП. На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точки средних составов хромшпинелидов данных двух парагенезисов располагаются в относительной близости друг от друга в низкохромистой умеренноглиноземистой области (рис. 2).

Хромшпинелиды остальных парагенезисов достаточно индивидуальны по составу, о чем свидетельствует их расположение на значительном уровне связывания друг от друга на дендрограмме (рис. 1). Наиболее отличительными составами обладают разности из неалмазоносных флогопитовых пироксенитов (НФП-парагенезис) и из неалмазоносных глиммеритов (НГ-парагенезис). Так, шпинелиды НФП-парагенезиса имеют аномально низкую хромистость (в среднем 7.78

мас.% Cr_2O_3) и повышенное содержание глинозема (в среднем 49.53 мас.% Al_2O_3), в то время как хромшпинелиды из неалмазоносных глиммеритов характеризуются аномально низким содержанием Al_2O_3 (в среднем всего 0.15 мас.%) при средних параметрах по хромистости (в среднем 46.91 мас.% Cr_2O_3) и повышенном содержании общего железа (в среднем 46.98 мас.% FeO_{tot}) (табл.). На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точки средних составов хромшпинелидов данных парагенезисов также занимают индивидуальное положение. Хромшпинелиды НФП-парагенезиса располагаются в высокоглиноземистой низкохромистой области, тогда как хромшпинелиды НГ-парагенезиса расположены в низкоглиноземистой умереннохромистой области (рис. 2). Хромшпинелиды НГ-парагенезиса были установлены в ксенолитах неалмазоносных шпинелевых глиммеритов из тр. Слюдянка, а разности НФП-парагенезиса – в неалмазоносных ксенолитах флогопитовых пироксенитов из тр. Поисковая ЯАП.

Типичные шпинелиды из базальтоидов (ШБ-парагенезис) характеризуются высокой титанистостью (в среднем 5.07 мас.% TiO_2) и железистостью (в среднем 39.82 мас.% FeO_{tot}) при пониженных содержаниях магния (в среднем 7.57 мас.% MgO) и хрома (в среднем 31.09 мас.% Cr_2O_3) [7, 8] и по данным параметрам отличаются от большинства кимберлитовых хромшпинелидов. По составу трапповые шпинелиды несколько схожи с разностями НЗГ-парагенезиса [6], в первую очередь по содержанию магния и глинозема (табл.). Хотя на кластерной дендрограмме составы шпинелидов данных парагенезисов располагаются на достаточно высоком уровне связывания (рис. 1). В отличие от шпинелидов из базальтоидов, разности НЗГ-парагенезиса обладают более низкой титанистостью (в среднем 2.19 мас.% против 5.07 мас.% TiO_2) и более низким содержанием суммарного железа (в среднем 31.15 мас.% против 39.82 мас.% FeO_{tot}). Различия шпинелидов данных двух парагенезисов хорошо видно и на диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$, на которой их составы достаточно разобщены друг от друга (рис. 2). Как отмечалось, трапповые шпинелиды пользуются широким распространением как в древних, так и в современных ореолах рассеяния. Причем не только в районах с широким развитием пород трапповой формации. К тому же трапповые шпинелиды могут иметь место и непосредственно в кимберлитах в качестве ксеногенного материала. Поэтому без учета трапповых шпинелидов результаты определения парагенетической принадлежности хромшпинелидов всегда будут нести существенные искажения.

Для высокожелезистых шпинелидов из зональных гранатов (НЗГЖ-парагенезис) характерно повышенное содержание суммарного железа (в среднем 42.2 мас.% FeO_{tot}) при одновременно умеренной хромистости (в среднем 36.98 мас.% Cr_2O_3), низкой глиноземистости (в среднем 6.76 мас.% Al_2O_3) и высоком содержании титана (в среднем 4.06 мас.% TiO_2) [6]. По данным параметрам шпинелиды НЗГЖ-парагенезиса близки фер-

ришпинелям НСТ-парагенезиса и разностям из катаклазированных лерцолитов (рис. 1), однако отличаются от последних несравнимо более высоким содержанием закисного железа и более низким содержанием MgO (табл.). Поэтому на кластерной дендрограмме (рис. 1) состав шпинелидов НЗГЖ-парагенезиса располагается на внушительном уровне связывания от составов разностей НСТ- и НКЛ-парагенезисов. На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точка состава шпинелидов НЗГЖ-парагенезиса также несколько дистанцировалась как от состава ферришпинелей «серкинского» типа, так и от состава хромшпинелидов из катаклазированных лерцолитов (рис. 2).

Довольно индивидуальный состав имеют среднехромистые шпинелиды из неалмазоносных лерцолитов (НЛС-парагенезис), для которых характерно умеренное содержание хрома (в среднем 46.45 мас.% Cr_2O_3) при низкой титанистости (в среднем 0.23 мас.% TiO_2) и повышенном содержании глинозема (в среднем 21.22 мас.% Al_2O_3) [6]. Хромшпинелиды НЛС-парагенезиса несколько схожи по составу с разностями НЛН- и НШД-парагенезисов (рис. 1), отличаясь лишь более высокой хромистостью и низкой глиноземистостью (табл.). Состав хромшпинелидов НЛС-парагенезиса на диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ расположен на значительном удалении от составов разностей НЛН- и НШД-парагенезисов (рис. 2).

Исходя из кластерной дендрограммы, схожие составы имеют низкохромистые шпинелиды из неалмазоносных гранатовых вебстеритов и гарцбургитов (НГВГН-парагенезис) и неалмазоносных лерцолитов и пироксенитов (НЛПН-парагенезис), хотя и располагаются они на достаточно большом уровне связывания (рис. 1). При общей низкой хромистости хромшпинелидов обоих парагенезисов, разности НГВГН-парагенезиса в отличие от хромшпинелидов НЛПН-парагенезиса обладают более высоким содержанием Cr_2O_3 (в среднем 26.06 мас.% против 19.17 мас.%) и более низким содержанием глинозема (в среднем 41.16 мас.% против 47.84 мас.% Al_2O_3) [6]. Хромшпинелиды данных парагенезисов довольно существенно отличаются по составу от разностей всех остальных парагенезисов, располагаясь от них на значительном удалении по уровню связывания (рис. 1). На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точки средних составов хромшпинелидов данных парагенезисов располагаются в относительной близости друг от друга в высокоглиноземистой области (рис. 2).

Шпинелиды из неалмазоносных магниезиальных (НМА-парагенезис) и магниезиально-кальциевых (НМКА-парагенезис) алькремитов [6] кардинально отличаются по составу от хромшпинелидов остальных парагенезисов (рис. 1). Их общей особенностью является аномально высокое содержание глинозема, превышающего 50 мас.% Al_2O_3 , при одновременно пониженной хромистости (табл.). Так, в разностях НМКА- и НМА-парагенезисов содержание Cr_2O_3 в среднем составляет всего 2.48 и 10.89 мас.% Cr_2O_3 , соответственно. Составы шпинелидов данных двух парагене-

зисов существенно отличаются и друг от друга, располагаясь на разных уровнях связывания по результатам кластерного анализа (рис. 1). Хромшпинелиды НМКА-парагенезиса, помимо более низкой хромистости, обладают более высокой глиноземистостью (табл.) по сравнению с разностями НМА-парагенезиса (в среднем 64.60 мас.% против 51.21 мас.% Al_2O_3). Кроме этого, для хромшпинелидов НМА-парагенезиса почти не характерно железо в закисной форме (в среднем всего 0.12 мас.% FeO). В шпинелидах из магниезиально-кальциевых алькремитов содержание FeO составляет в среднем 8.74 мас.%. На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точки составов хромшпинелидов данных парагенезисов закономерно располагаются в левом верхнем углу графика в высокоглиноземистой области, на заметном расстоянии друг от друга (рис. 2).

Шпинелиды НШВ-парагенезиса были установлены в неалмазоносных ксенолитах шпинелевых вебстеритов (в парагенезисе с плагиоклазом и графитом) из трубки Ноябрьская Бенчимэ-Куойкского кимберлитового поля ЯАП. Для шпинелидов данного парагенезиса характерно высокое содержание глинозема (в среднем 60.35 мас.% Al_2O_3) при одновременно низких параметрах по хромистости (в среднем 6.60 мас.% Cr_2O_3) и титанистости (в среднем 0.09 мас.% TiO_2) (табл.). По составу шпинелиды НШВ-парагенезиса несколько схожи с разностями НМКА-парагенезиса, в первую очередь по высокому содержанию глинозема. Хотя на кластерной дендрограмме их составы располагаются на значительном удалении друг от друга по уровню связывания (рис. 1). Шпинелиды НШВ-парагенезиса, в отличие от разностей НМКА-парагенезиса, обладают более высоким содержанием закисного железа (в среднем 17.26 мас.% против 8.74 мас.% FeO) при более низких параметрах по магнию (в среднем 15.62 мас.% против 22.03 мас.% Mg) (табл.). На диаграмме $Cr_2O_3-Al_2O_3$ точка состава шпинелидов НШВ-парагенезиса расположена в левом верхнем углу в высокоглиноземистой области (рис. 2).

Методика исследований

Непосредственно химический состав хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах был определен в ЦАЛ АК «АЛРОСА» на электронно-зондовой системе «Superprobe-8800R» фирмы «Джеол» с рентгеноспектральной приставкой LINK-ISIS-300 фирмы «Оксфорд» при энергетическом разрешении 133 Эв (аналитик А. С. Иванов). Концентрации элементов определены с относительной ошибкой менее 5% и чувствительностью до 10п *ppm*. Определения выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 10 нА. Контроль при изучении состава хромшпинелидов осуществлялся с помощью минеральных стандартов, аттестованных в ИГМ СО РАН г. Новосибирска.

Всего из отложений погребенной россыпи Дьюкунах было изучено 457 зерен хромшпинелидов. Химические составы хромшпинелидов, полученные в результате микронзондового анализа зерен, непосред-

ственно авторами работы были подвергнуты обработке в специализированной программе «MineralogicalAnalyse» с целью определения их парагенетической принадлежности. Алгоритм пересчета микронзондовых анализов и отнесения хромшпинелидов к определенному парагенезису основан не на расчете дискриминантных функций [3, 11], а на использовании чисто химических составов. Определение парагенетической принадлежности хромшпинелидов осуществляется программой путем сопоставления их химических составов с составами минералов эталонных парагенезисов из базы программы. Программа «MineralogicalAnalyse» учитывает процентное содержание каждого оксида (в мас.%) и осуществляет определение парагенетической специализации минерала по его составу с привлечением статистических методов на основе макросов. Парагенезис, к которому относится минерал с конкретным составом, устанавливается по минимальному значению евклидова расстояния, с учетом среднего значения и доверительных интервалов по оксидам. В конечном итоге каждому индивидуальному составу программой присваивается аббревиатура из начальных букв соответствующего парагенезиса минерала.

Программа «MineralogicalAnalyse» работает непосредственно с таблицами, созданными в программе MS Excel. После инсталляции программы в диалоговом окне листа MS Excel появляется дополнительная вкладка «Минанализ». В выплывающем меню вкладки выбирается нужный минерал и вариант пересчета составов с учетом общего железа или его разделения на двух- и трехвалентную формы. По результатам пересчета программа в автоматическом режиме отстраивает сводную таблицу и гистограмму распределения минерала по парагенетическим группам. Распределение хромшпинелидов из древней россыпи Дьюкунах в соответствии с парагенетическими группами по результатам пересчета их составов с использованием программы «MineralogicalAnalyse» показано на рисунке 3.

Результаты исследований

Результаты исследований показали, что среди хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах по составу преобладают разности некимберлитового генезиса (рис. 3). Так основная масса исследованных зерен представлена ферришпинелями «серкинского» типа (НСТ-парагенезис) при достаточно высоком содержании шпинелидов из базальтоидов (ШБ-парагенезис), на долю которых приходится 38.5% и 35.9%, соответственно. Общее количество шпинелидов некимберлитового генезиса (НСТ-, ШБ-, КТ-парагенезисы) по данной древней россыпи в сумме составляет 76.4% (рис. 3). Хромшпинелиды типичного кимберлитового генезиса также присутствуют в верхнепалеозойских отложениях россыпи Дьюкунах, однако они имеют резко подчиненное значение, составляя в сумме всего 23.6% (рис. 3).

Среди типичных кимберлитовых хромшпинелидов, исходя из их состава, в отложениях россыпи Дьюкунах преобладают разности из неалмазных лерцолитов с высоко- (НЛВ-парагенезис), средне- (НЛС-парагенезис) и низкохромистым (НЛН-парагенезис) хромшпинелидом. Однако доля хромшпинелидов каждого из данных парагенезисов незначительная и не превышает 10% (рис. 3). Незначительное распространение в древних отложениях россыпи имеют разности из неалмазных гранатовых вебстеритов и гарцбургитов с низкохромистым шпинелидом (НГВГН-парагенезис) и высокожелезистые шпинелиды из зональных гранатов (НЗГЖ-парагенезис), содержание которых не превышает одного процента. Кроме этого отмечены хромшпинелиды из гранат-клинопироксен-шпинелевых сростков (НГКШС-парагенезис), доля которых также незначительная (1.5%). Важно отметить присутствие в отложениях россыпи Дьюкунах хромшпинелидов, по составу соответствующих разностям из высокоалмазных дунитов и гарцбургитов (ВАДГ-парагенезис), хотя доля их незначительная и составляет всего 0.2% (рис. 3). Даже при пересчете по отношению к типичным кимберлитовым разностям содержание хромшпинелидов ВАДГ-парагенезиса возрастает лишь до 0.9%.

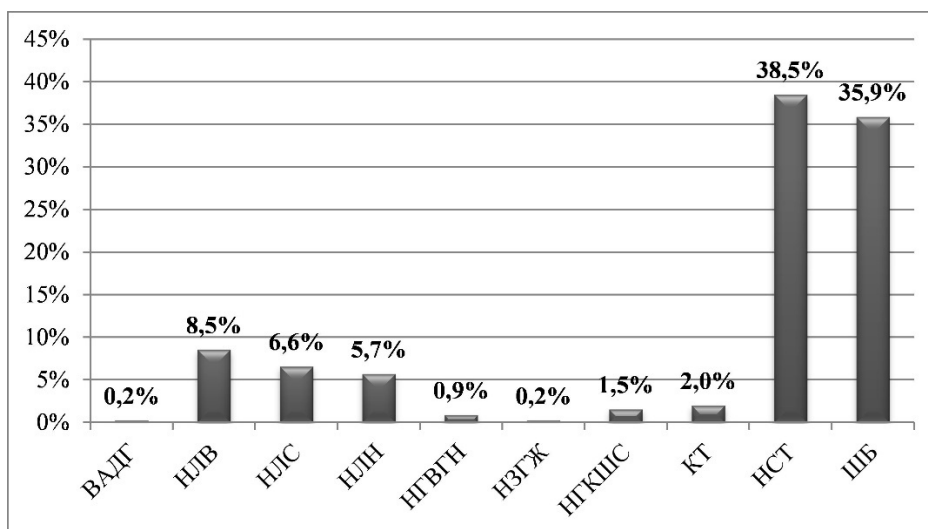


Рис. 3. Распределение хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах по парагенетическим группам на основе их состава (n=457).

[Fig. 3. Distribution of chromspinelides from Dyukunakh placer according to paragenetic groups based on their composition (n=457).]

Заключение

Как показали результаты исследований состава хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах с использованием программы «MineralogicalAnalyse», в верхнепалеозойских отложениях россыпи среди хромшпинелидов преобладают «ложные» минералы-индикаторы кимберлитов, содержание которых в сумме превышает 70%. По причине высокой доли среди хромшпинелидов россыпи разностей некимберлитового генезиса, поисковая значимость хромшпинелидов в этом районе ничтожна. Связано это с тем, что выделить из общей массы хромшпинелидов по морфологии только типично кимберлитовые разности достаточно трудно, особенно если минеральная ассоциация прошла механическую обработку. Подвергать же рентгеноспектральному анализу каждое зерно невозможно. При этом важно отметить, что ни ферришпинели «серкинского» типа (НСТ-парагенезис), ни трапповые шпинелиды (ШБ-парагенезис), преобладающие в древней россыпи Дьюкунах, генетически не могут ассоциировать не только с алмазами, но и с гранатами в плане их общих первоисточников по причине разных термодинамических условий образования. Исходя из этого, ассоциацию кимберлитовых минералов в верхнепалеозойских отложениях россыпи Дьюкунах более правильно характеризовать не как пироп-хромшпинелидовую, как принято считать, а как пироповую или алмаз-пироповую.

Преобладание в россыпи Дьюкунах среди хромшпинелидов некимберлитовых разностей невозможно объяснить только с позиций интенсивного механического износа минеральной ассоциации с накоплением узкого по химии диапазона минералов. Вероятнее всего и феррихромиты «серкинского» типа, и шпинелиды из траппов являются захваченными в процессе миграции минералогического материала, являясь в верхнепалеозойских осадках по своей сути седиментационной примесью (гидравлическими спутниками) по отношению к кимберлитовым минералам. Однако, несмотря на то, что сами по себе эти разновидности хромшпинелидов являются «ложными» минералами-индикаторами кимберлита, они могут оказать помощь в решении проблемы направления сноса материала в древнюю россыпь Дьюкунах. Анализ шлихо-минералогических обстановок сопредельных к россыпи территорий и определение места распространения узнаваемых по составу феррихромитов «серкинского» типа, может помочь в решении данного спорного вопроса.

Таким образом, использование программы «MineralogicalAnalyse» позволяет более достоверно судить не только об источниках данного минерала в

кимберлитах, но и о генезисе шпинелидов в россыпях, что способствует более качественному проведению прогнозных построений. Определяемые программой парагенетические группы хромшпинелидов на сегодня наиболее полно характеризуют парагенетическое разнообразие состава данного минерала из кимберлитов и связанных с ними ореолов рассеяния.

Благодарности. Авторы выражают огромную благодарность Гриценко Андрею Викторовичу за помощь в создании программы «MineralogicalAnalyse» и написание алгоритма пересчета анализов.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмельков А. М., Власова Э. А. Парагенезисы гранатов из кимберлитов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 4. С. 9–19.
2. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных Н. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741.
3. Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Марфунин А. С., Михайличенко О. А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: Изд-во МГУ, 1991. 240 с.
4. Богатиков О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А., Кудрявцева Г. П., Васильева Е. Р., Вержак В. В., Веричев Е. М., Парсадания К. С., Посухова Т. В. Архангельская алмазоносная провинция. М.: Изд-во МГУ, 1999. 524 с.
5. Каминский Ф. В. Алмазоносность некимберлитовых изверженных пород. М.: Недра, 1984. 173 с.
6. Кротков В. В., Кудрявцева Г. П., Богатиков Е. П., Валуев Е. П., Вержак В. В., Гаранин В. К., Заостровцев А. А., Кононова В. А., Литинский Ю. В., Пашкевич И. Р., Степанов А. Н., Фортыхин В. С. Новые технологии разведки алмазных месторождений. М.: ГЕОС, 2001. 310 с.
7. Округин А. В., Панков В. Ю., Махотько В. Ф. Аксессуары шпинелиды в траппах Сибирской платформы // *Типоморфные особенности рудных минералов эндогенных образований Якутии*. Якутск. 1983. С. 54–68.
8. Рябов В. В., Золотухин В. В. Минералы дифференцированных траппов. Новосибирск, Наука, 1977. 393 с.
9. Хмельков А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). Новосибирск, АРТА, 2008. 252 с.
10. Соболев Н. В. О минералогических критериях алмазоносности // *Геология и геофизика*, 1971. № 3. С. 70–80.
11. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М., Мир, 1983. 300 с.

Paragenetic features of the composition of chromespinelides from Dyukunakh placer (Yakutia)

A. M. Khmelkov[✉], E. A. Vlasova

*PJSC ALROSA: Vilyuiskaya Exploration Expedition, 1 Pervootkryvateley ul.,
Aikhal 678190, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

Abstract

Introduction: In our study, we investigated the paragenetic features of the composition of chromespinelides from the noncommercial Dyukunakh placer (Yakutia) using the specialized software MineralogicalAnalyse. The ore bodies of diamonds, due to which the placer was formed, have not been identified yet. Therefore, the placer is of exploratory interest. Besides diamonds, the placer also contains garnet and chromespinelide.

Methodology: The main function of the MineralogicalAnalyse programme is to determine the paragenesis of kimberlite minerals based on their composition. It is able to recognise the chromespinelides of 20 paragenesis. A total of 457 chromespinelide grains from the deposits of the Dyukunakh placer were studied. The composition of the chromites was preliminarily analysed using an electron microprobe. All the results were then recalculated using MineralogicalAnalyse in order to determine the paragenetic features of the chromespinelides.

Results and discussion: The article details the composition of the chromespinelides with paragenesis that can be determined by the programme and described their relationships. The study determined that over 70% of the chromespinelides in the Dyukunakh placer are of non-kimberlite genesis. Kimberlite chromespinelides are of subordinate importance (23.6%). Among the typical kimberlite chromespinelides in the placer sediments varieties from non-diamondiferous lherzolites prevail.

Conclusions: Non-kimberlite genesis chromespinelides found in the placer cannot be associated with diamonds and garnets in terms of common ore bodies. Therefore, it would be correct to refer to the association of kimberlite minerals in the Dyukunakh placer not as to pyrope-chromespinelide, but as to pyrope or diamond-pyrope association. Thus, the MineralogicalAnalyse programme provides more reliable data regarding the genesis of chromespinelides not only in kimberlites, but also in placers.

Keywords: kimberlite tracer minerals, paragenesis, diamondiferous, chromespinelides, kimberlites, placer.

For citation: Khmelkov A. M., Vlasova E. A. Paragenetic features of the composition of chromespinelides from Dyukunakh placer (Yakutia). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 4, pp. 36–45. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3125>

Acknowledgments: The authors are very grateful to Andrey V. Gritsenko for help in creating the «MineralogicalAnalyse» program and writing analysis recalculation algorithm.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Aleksandr M. Khmelkov, e-mail: st_56@mail.ru

REFERENCES

1. Khmelkov A. M., Vlasova E. A. Paragenезисы гранатов из кимберлитов. [Garnet paragenesis from kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no 4, pp. 9–19. (In Russ., abstract in Eng.).
2. Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E. S., Safyannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh N. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadei v svyazi s problemoi «lozhnykh» indikatorov kимберлитов. [Features of the morphology and composition some chromespinelides to diamondiferous areas in connection with the problem of «false» indicators kimberlites]. *Geology and geophysics*, 2000, vol. 41, no 12, pp. 1729–1741. (In Russ.).
3. Garanin V. K., Kudryavtseva G. P., Marfunin A. S., Mikhailichenko O. A. *Vklyucheniya v almaze i almazonosnye porody*. [Inclusions in diamond and diamondiferous rocks]. Moscow, MGU publ., 1991, 240 p. (In Russ.).
4. Bogatikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'eva E. R., Verzhak V. V., Verichev E. M., Parsadanyan K. S., Posukhova T. V. *Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya*. [Arkhangelsk diamondiferous province]. Moscow, MGU publ., 1999, 524 p. (In Russ.).
5. Kaminskii F. V. *Almazonosnost' nekимберлитовыkh izverzhennykh porod*. [Diamondiferous non-kimberlitic igneous rocks]. Moscow, Nedra publ., 1984, 173 p. (In Russ.).
6. Krotkov V. V., Kudryavtseva G. P., Bogatikov E. P., Valuev E. P., Verzhak V. V., Garanin V. K., Zaostrovtshev A. A., Kononova V. A., Litinskii Yu. V., Pashkevich I. R., Stepanov A. N., Fortygin V. S. *Novye tekhnologii razvedki almaznykh mestorozhdenii*. [A new technologies exploration of diamond deposits]. Moscow, GEOS, 2001, 310 p. (In Russ.).
7. Okrugin A. V., Pankov V. Yu., Makhot'ko V. F. *Aktsessornyye shpinelidy v trappakh Sibirskoi platform*. [Accessory spinelides in traps of the Siberian platform]. *Tipomorfnye osobennosti rudnykh mineralov endogennykh obrazovaniy Yakutii*. Yakutsk, 1983, pp. 54–68. (In Russ.).
8. Ryabov V. V., Zolotukhin V. V. *Mineraly differentsirovannykh trappov*. [Minerals of differentiated traps]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 393 p. (In Russ.).
9. Khmelkov A. M. *Osnovnyye mineraly kимберлитов i ikh evolyutsiya v protsesse oreolobrazovaniya (na primere Yakutskoi almazonosnoi provintsii)*. [The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halation (on the example of the Yakutian diamondiferous province)]. Novosibirsk, ARTA, 2008, 252 p. (In Russ.).
10. Sobolev N. V. O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti. [About mineralogical criteria of diamondiferous]. *Geology and geophysics*, 1971, no 3, pp. 70–80. (In Russ.).
11. Douson D. *Kimberlity i ksenolity v nikh*. [Kimberlites and xenoliths in them]. Moscow, Mir, 1983, 300 p. (In Russ.).

Хмельков Александр Михайлович – к.г.-м. н., ведущий геолог, ветеран АК «АЛРОСА» (ПАО), Айхал, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; E-mail: st_56@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9334-3843>

Власова Эльвира Александровна – геолог II категории, АК «АЛРОСА» (ПАО), Вилюйская геологоразведочная экспедиция, Айхал, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; E-mail: KulaninaEA@alrosa.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1225-0376>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Aleksandr M. Khmelkov – PhD in Geol-Min., leading geologist, veteran of ALROSA (PJSC), Aikhal, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; E-mail: st_56@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9334-3843>

Elvira A. Vlasova – geologist II category, ALROSA (PJSC), Vilyuiskaya geological expedition, Aikhal, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; E-mail: KulaninaEA@alrosa.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1225-0376>

The authors have read and approved the final manuscript.