

А.А. Бочнева, Н.Г. Патык-Кара

СТРУКТУРА МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ КАК КРИТЕРИЙ РАСПОЗНАВАНИЯ АЛМАЗОНОСНЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Постановка задачи и характеристика материала

Данные минералогического анализа аллювия рек, получаемые при шлиховой съемке и поисках, являются важнейшим источником информации о минеральном составе пород, развитых в области питания [5]. На высокую информативность этих минеральных ассоциаций обращал внимание В.П. Батурин [1], введший понятие «терригенно-минералогическая провинция» для определения областей, поставляющих в аллювий определенные комплексы кластогенных минералов. Поскольку эти ассоциации имеют сложный поликомпонентный состав и включают минералы, поступавшие из разных источников и претерпевшие различные преобразования на пути миграции, качественное сопоставление этих данных зачастую не дает однозначной информации об источниках сноса и эволюции сложившихся минеральных парагенезисов. Это заставляет исследователей использовать различные методы свертки поликомпонентной минералогической информации [13, 7, 8].

При этом приходится учитывать, что в процессе переноса и формирования парагенезисов кластогенных минералов, с одной стороны, происходит их «очищение» от малоустойчивых минералов, а, с другой, их пополнение минералами, поступающими из различных частей бассейна, часто путем многократного переотложения [6]. При анализе алмазоносных площадей следует также учитывать, что высокая устойчивость и миграционная способность алмаза [5, 12], намного превосходящая миграционную способность его генетических спутников (пироп, пикроильменит, хромшпинелиды, хромдиопсид, циркон, апатит), приводит к тому, что сам алмаз входит в состав ассоциаций, образованных транзитными устойчивыми минералами, несущих информацию о строении бассейна питания в целом, в том числе о присутствии в нем осадочных пород, которые могли выступать в качестве промежуточных коллекторов алмаза [9].

Основной задачей нашего исследования является изучение минеральных ассоциаций разновозрастных потенциально алмазоносных промежуточных коллекторов, выявление дополнительных характери-

стик промежуточных коллекторов для решения прогнозных и оценочных задач, что дает возможность уточнения информации об источниках сноса и эволюции сложившихся минеральных парагенезисов ассоциаций в процессах переноса и переотложения.

Район и объекты исследования

В качестве района исследования был выбран старейший алмазоносный район Республики Саха (Якутия) – Мало-Ботуобинский (рис. 1А), известный своими алмазоносными кимберлитовыми трубками (Мир, Интернациональная и др.), и алмазоносными россыпями. В строении исследуемого района участвуют разновозрастные осадочные породы – от ордовика до четвертичной системы, нижнетриасовые траппы и кимберлиты среднепалеозойского возраста [9, 12]. Источниками алмазов в четвертичных россыпях послужили как сами кимберлиты, которые являются первоисточниками алмазов, так и промежуточные коллекторы, в качестве которых рассматриваются более древние терригенные породы осадочного платформенного чехла – каменноугольно-пермского, верхнетриасового-нижнеюрского возраста, породы укугутской свиты нижней юры и неоген-четвертичные отложения (рис. 1Б), однако промышленные концентрации алмазов обнаружены пока только породах укугутской свиты [9].

В настоящей работе минеральные ассоциации заведомо алмазоносной укугутской свиты не рассматриваются. Объектом анализа являются минеральные ассоциации потенциальных осадочных коллекторов алмазов, среди которых наибольший интерес представляют два комплекса пород – песчано-глинистые отложения среднекарбового-раннепермского и песчано-галечные отложения позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста.

Исходный материал представлен данными количественного минералогического анализа (более 2000 проб), полученных при шлиховом опробовании аллювия рек и осадочного комплекса пород. На начальном этапе подготовки данных вся информация была профильтрована, в результате чего все признаки (минералы) были разделены на 2 группы: информативные при-

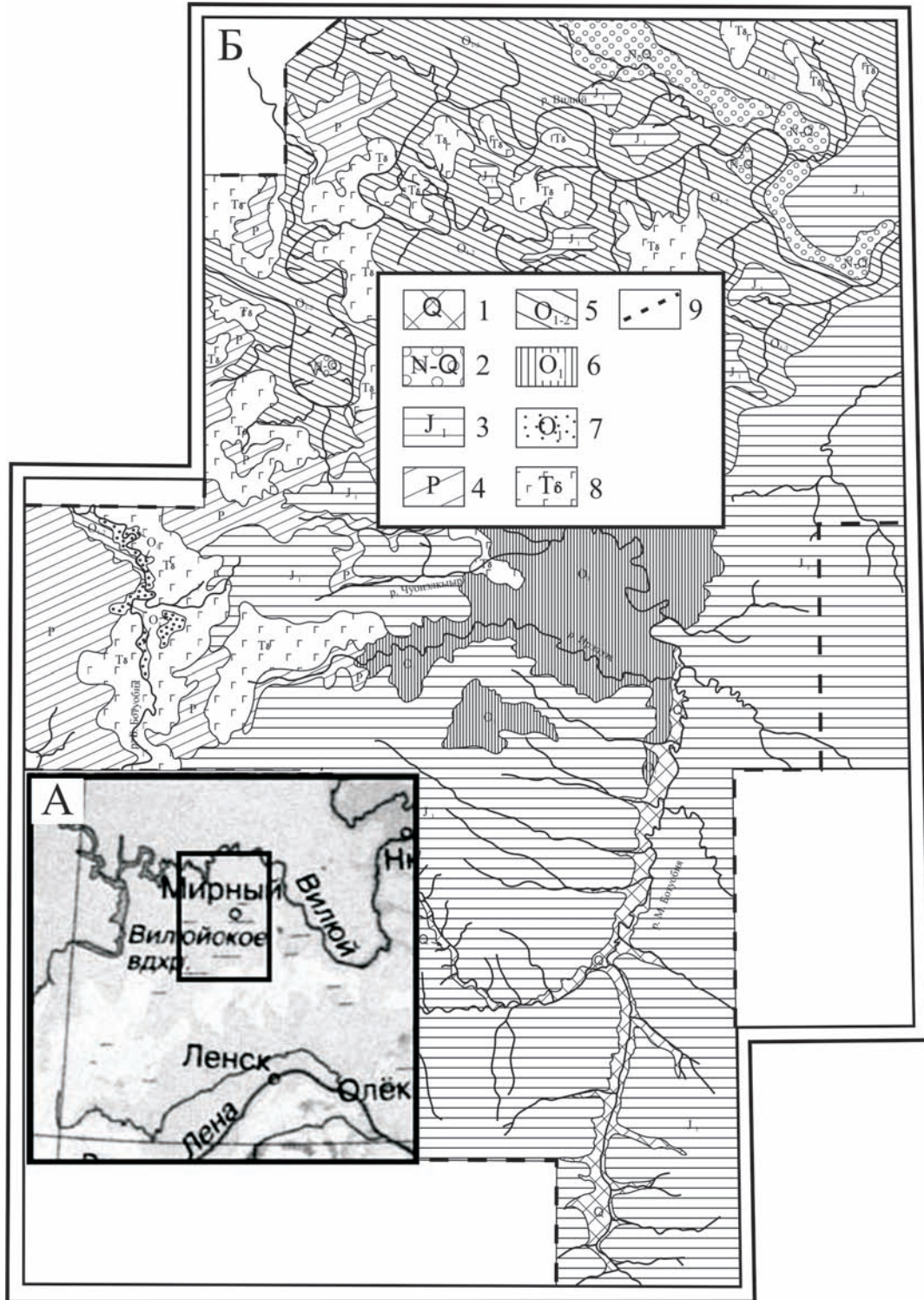


Рис. 1. Расположение района работ (А) и схема геологического строения Мирнинского алмазоносного района (Б) (рамками карты ограничена площадь, охарактеризованная данными количественного минералогического анализа, использованными в настоящей работе)

- 1 – аллювиальные и аллювиально-делювиальные галечники, пески, суглинки четвертичные;
- 2 – аллювиальные галечно-песчаные отложения древних долин позднеплиоценовые-раннеплейстоценовые;
- 3 – пески, песчаники, глины, галечники нижнеюрские (морские отложения);
- 4 – пески, песчаники, глины, галечники пермские (континентальные отложения);
- 5 – алевролиты, глины, галечниковые конгломераты ранне-среднеордовикские;
- 6 – переслаивание песчано-аргиллитовых толщ, известняков, мергелей и доломитов усть-кутского яруса раннего ордовика;
- 7 – скарнированные карбонатные породы усть-кутского яруса раннего ордовика;
- 8 – пластовые и неправильные секущие интрузии траппов верхнетриасовые;
- 9 – граница представительного опробования

знаки (21 минерал) и малоинформативные признаки, характеризующиеся дисперсией, близкой к нулю, и поэтому исключенные из дальнейшего анализа.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи были выбраны методы геостатистики, хорошо зарекомендовавшие себя при решении аналогичных задач в других районах [3, 11, 8, 7 и др.]: 1) кластерный анализ, который позволяет на основе меры сходства объединить в кластеры минералы с наиболее тесными взаимосвязями и, таким образом, выделить минеральные парагенезисы, и 2) одна из модификаций факторного анализа – Метод Главных Компонент, при использовании которого выделяются минеральные ассоциации, характерные для потенциально алмазоносных промежуточных коллекторов, определяется упорядоченность или неоднородность минерального поля.

Метод кластеризации Варда [15, 16] был выбран как оптимальный для имеющихся данных, поскольку он характеризуется использованием методов дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами. В качестве меры сходства было выбрано расстояние Чебышева, которое вычисляется по формуле: расстояние $(X, Y) = \text{Максимум}|X_i - Y_i|$ [2].

Метод главных компонент является одной из модификаций факторного анализа. Суть метода главных компонент заключается в линейном преобразовании n -исходных признаков в n -новые переменные путем обобщения первых по определенным критериям так, чтобы каждая новая переменная вносила максимально большой вклад в суммарную дисперсию [2, 4, 10]. Метод главных компонент позволяет выявить ассоциации конкордантных и дискордантных признаков (минералов) в многомерном пространстве исследуемой площади и установить их площадное распределение. Иными словами, с помощью этого метода выделяются несколько уровней неоднородности в распределении минеральных ассоциаций, что, в свою очередь, дает возможность отследить локальные факторы (которые не всегда видны на общем фоне) формирования определенных минеральных ассоциаций. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при анализе поликомпонентных геохимических и минеральных полей и многомерных пространств [3, 8, 11].

Комплексное использование выбранных методов позволяет выявлять как наиболее тесно связанные минералы, так и минеральные ассоциации, состав которых непосредственно описывает как общую, так и частную изменчивость [14].

Обсуждение полученных результатов

В ходе исследования с помощью кластерного анализа было выявлено, что в исходном массиве

данных присутствуют группы минералов, характеризующиеся различными взаимосвязями, выделяемыми на разных уровнях.

Самые сильные связи характеризуют следующие группы минералов: циркон – рутил, сфен – апатит, турмалин – хромит и некоторые другие (рис. 2).

Нетрудно видеть, что пара циркон – рутил представляет собой типичную ассоциацию высокоустойчивых рудных минералов, характерных для хорошо сортированных песчаных толщах конечных бассейнов седиментации, а пара сфен – апатит отражает влияние магматических коренных источников ультраосновного-щелочного состава. На следующем уровне (расстояние 25-27) формируются ассоциации вида: рутил – циркон – апатит – сфен – анатаз – хлорит – шпинель – турмалин – хромит и вида: дистен – ставролит – лейкоксен, которые в конечном счете (на расстоянии 67) образуют ассоциацию из 12 минералов вида: рутил – циркон – апатит – сфен – анатаз – хлорит – шпинель – турмалин – хромит – дистен – ставролит – лейкоксен. В этой группе присутствуют как магматические минералы, так и минералы метаморфического происхождения, в том числе высоко устойчивые кластогенные минералы, способные сохраняться в условиях длительного переноса и переотложения (циркон, дистен, рутил, ставролит). Им противостоит ассоциация из 9 минералов вида: пирит – лимонит – ильменит – роговая обманка – гроссуляр – андрадит – эпидот – альмандин – магнетит, которая характеризуется весьма слабыми связями и объединяется на расстоянии 165; причем образование первых кластеров происходит на расстоянии 67-100. В ней преобладают минералы «магматического» происхождения, свойственные развитым в районе траппам и кимберлитам, такие как пирит, лимонит, ильменит, роговая обманка, магнетит.

Внутри групп наиболее тесные корреляционные связи, выявляемые на первом уровне, характеризуют следующие группы минералов:

1. Пирит – лимонит – ильменит;
2. Роговая обманка – гроссуляр – андрадит – эпидот;
3. Альмандин – магнетит;
4. Рутил – циркон;
5. Апатит – сфен;
6. Анатаз – хлорит – шпинель – турмалин – хромит;
7. Дистен – ставролит – лейкоксен.

Кластеры 3, 5 и 6 характеризуют группу магматогенных пород, а кластеры 4 и 7 отражают влияние метаморфизованных осадочных пород исследуемого района, тем самым подтверждая роль последних в формировании минеральных ассоциаций современного аллювия.

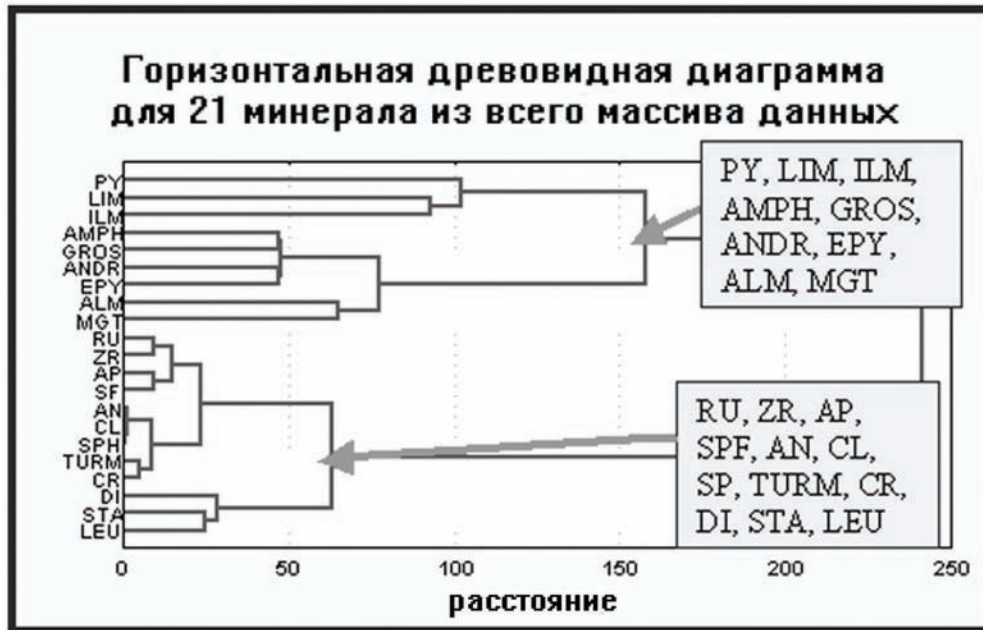


Рис. 2. Горизонтальная древовидная диаграмма для 21 минерала из всего массива данных. Символами обозначены минералы: ru – пирит, lim – лимонит, ilm – ильменит, amph – амфибол (роговая обманка), gros – гроссуляр, andr – андрадит, epy – эпидот, alm – альмандин, mgt – магнетит; ru – рутил, zr – циркон, ap – апатит, spf – сфен, an – анатаз, cl – хлорит, sp – шпинель, turm – турмалин, cr – хромит, di – дистен, sta – ставролит, leu – лейкоксен

Для сопоставления минеральных ассоциаций разновозрастных комплексов пород, участвующих в питании аллювия, был использован метод Главных Компонент, который позволил выявить следующие особенности. Наиболее высокие «веса» 1-ой и 2-ой ГК, свидетельствующие о значительной упорядоченности минеральных ассоциаций, характерны для пород двух стратиграфических уровней: среднекарбонного-раннепермского комплекса пород (соответственно 25,46 и 16,19 %) и для отложений позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста (соответственно 36,94 и 18,99 %), которые рассматриваются, наряду с укугутской свитой нижнеюрского возраста, в качестве главных потенциальных промежуточных коллекторов алмазов [9] (рис. 3). Этот факт подтверждает представления о том, что терригенные породы, обладающие свойствами промежуточного коллектора, как правило, характеризуются большей сорти-

рованностью материала, которая достигается в прибрежной и литоральной зонах конечных бассейнов седиментации, либо в аллювиальных свитах. Для минеральных ассоциаций потенциальных промежуточных коллекторов характерно также практическое отсутствие минералов с малой миграционной способностью и доминирование в составе ассоциаций более устойчивых минералов. Осадочные формации, формировавшиеся между указанными возрастными интервалами, характеризуются более слабыми корреляционными связями и менее упорядоченными минеральными ассоциациями.

Методом Главных компонент были проанализированы также отдельно две группы, выделенные ранее с помощью кластерного анализа (см. рис. 2). В результате были получены схемы распределения значений Главных Компонент для каждой из двух группы минералов (рис. 4).

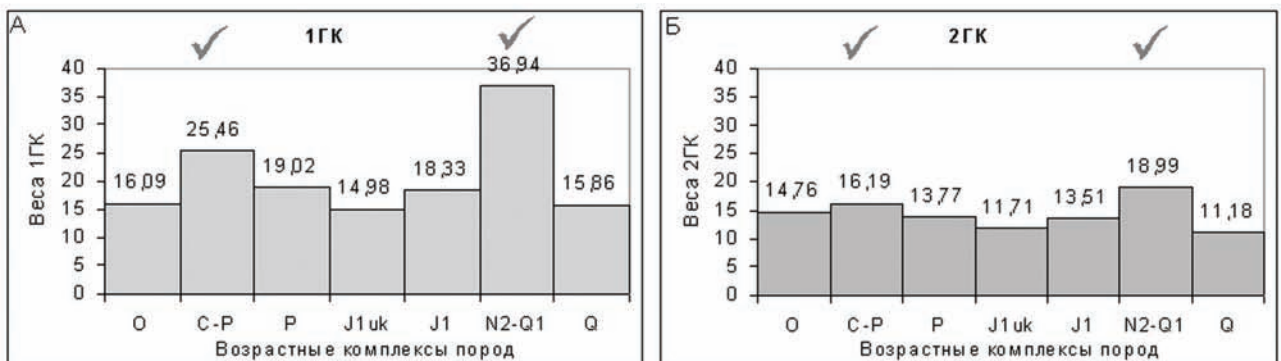


Рис. 3. Гистограммы распределения 1ГК (А) и 2ГК (Б) ГК по породам разного возраста

Пространственная изменчивость значений ГК по площади изученного района достаточно отчетливо согласуется с особенностями его геологического строения. В пределах ее площади обособляются несколько областей повышенных положительных значений 1ГК массива, состоящего из минералов «магматогенной» ассоциации (9 минералов): пирит, лимонит, ильменит, роговая обманка, гроссуляр, андрадит, эпидот, алмадин, магнетит, которая имеет вид $[Mgt_{0,74}/Alm_{-0,66} Epy_{-0,58}]$. Как и следует ожидать, самая компактная область положительных значений 1ГК в общих чертах совпадает с областью развития траппов (рис. 4А), в то время как области развития осадочных пород характеризуются ее отрицательными значениями, в пределах которой находятся все известные алмазоносные россыпи.

Вторая ГК (2ГК), рассчитанная для этой ассоциации минералов, имеет вид $[Ilm_{0,70}/Amph_{-0,52} Lim_{-0,50}]$; область ее повышенных положительных значений совпадает, в основном, с площадями развития юрских пород, а также частично – неоген-четвертичных отложений (рис. 4Б). Именно в этой области располагаются и большая часть алмазоносных россыпей.

Области распространения повышенных значений 1ГК, рассчитанной для массива из 12 минералов, состоящего преимущественно из минералов метаморфических и осадочных пород, и имеющей вид: $[Sta_{0,70} Di_{0,68} Ru_{0,68} Zr_{0,59}]$, коррелируются с областями развития пород ордовикского и пермского возраста (рис. 4В-Г). Вторая ГК (2ГК) для этой ассоциации имеет вид $[-/Sph_{-0,74} Ap_{-0,74}]$. Контурные ее повышенных значений совпадают с областями рас-

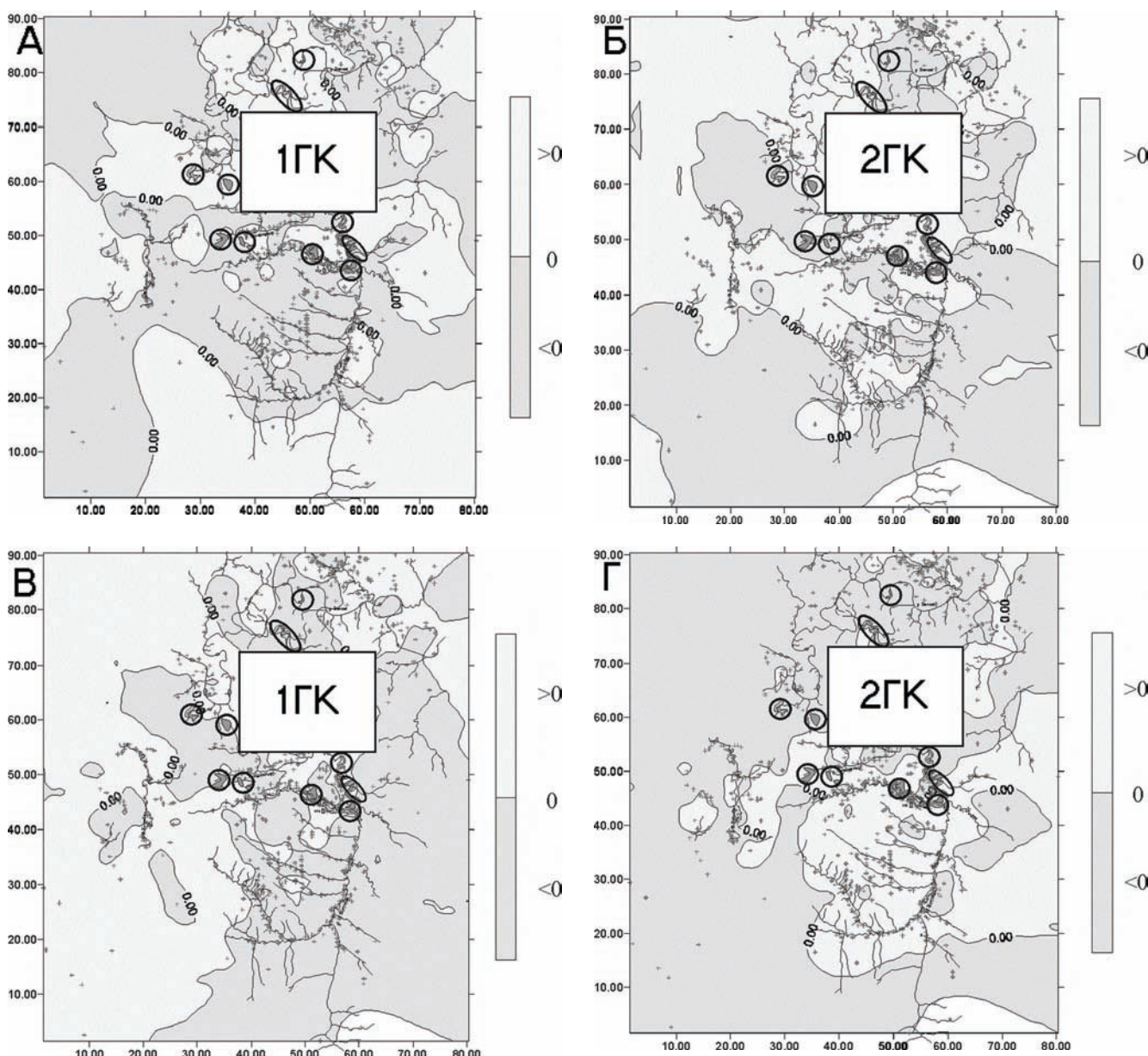


Рис. 4. Схема распределения значений 1ГК и 2ГК для массива из 9 минералов («магматогенная» ассоциация) (А-Б) и из антагонистичной ей ассоциации из 12 минералов (В-Г).
 Позиция алмазоносных россыпей (черные пунсоны) дана по В. Т. Подвысоцкому [9]

пространения ордовикского, пермского и частично юрского возраста. Все известные алмазоносные россыпи располагаются в области отрицательных значений как 1ГК, так и 2ГК (см. рис. 4В-Г). По сравнению с рассмотренной выше «магматогенной» ассоциации, распределение обеих ГК для данной ассоциации на площади более прихотливо.

Сопоставим между собой минеральный состав пород среднекарбонového-раннепермского и позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста, которые рассматриваются как потенциальные промежуточные алмазоносные коллектора и которые, как было указано выше (см. рис. 3), характеризуются наиболее упорядоченными ассоциациями минералов. Минеральные ассоциации пород среднекарбонového-раннепермского возраста, выделяемые 1ГК, включают достаточно длинный ряд минералов со значимыми факторными нагрузками (табл. 1), значения которых достигают 0.95, что отражает влияние этих минералов на ассоциацию в целом. Минеральный парагенезис группы 1 имеет вид пирит – лимонит – магнетит – ильменит – эпидот – альмандин (в 1ГК) и гроссуляр-альмандин-андрадит (во 2ГК). В данном случае «антагонистами» выступают ильменит, эпидот и альмандин по отношению к пириту, лимониту и магнетиту (в 1ГК) и андрадит по отношению к гроссуляру и альмандину (2ГК). В минеральную ассоциацию группы 2, выделенную 1ГК, входят минералы как магматических, так и метаморфогенных пород. Эта ассоциация имеет вид: сфен – лейкоксен – рутил – циркон – дистен – ставролит – анатаз; при этом минералы с отрицательными факторными нагрузками в ней отсутствуют.

Для пород позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста также характерны минеральные ассоциации с большими факторными нагрузками (до 0,87) (табл. 1). Минеральная ассоциация в 1ГК группы 1 имеет вид: гроссуляр – магнетит – альмандин – андрадит – лимонит, при чем гроссуляр противопос-

тавляется всем остальным минералам. Минеральный парагенезис во 2ГК, имеющий вид: роговая обманка – эпидот, характеризует как магматические, так и контактово-метасоматические породы. Минеральная ассоциация в 1ГК в группе 2 представлена минералами: ставролит – рутил – дистен – хромит – анатаз – циркон – шпинель, состав которой имеет большое сходство с аналогичной ассоциацией в породах среднекарбонového-раннепермского возраста. Во 2ГК шпинель противопоставляется сфену и апатиту.

Важной особенностью минерального состава сопоставляемых комплексов пород является значительное сходство составов ГК: ассоциации рутил – циркон – дистен – ставролит – анатаз и магнетит – альмандин – лимонит (в 1ГК), шпинель – апатит (во 2ГК) [12].

Гетерогенный характер минеральных ассоциаций рассматриваемых комплексов пород затрудняет интерпретацию их составов. Тем не менее, несмотря на разнородность первичных источников минералов и разные пути их миграции в процессах переноса и перетложения, в составе анализируемых минеральных ассоциаций сохраняются «первичные» связи между некоторыми минералами, указывающие на их происхождение. Даже анализируя совокупно весь массив данных, без подразделения их по комплексам пород, можно выделить две такие группы минералов, которые занимают позицию в разных четвертях диаграммы факторных нагрузок (рис. 5). Это пара «сфен-апатит» (аксессуарные минералы щелочных пород) и группа «рутил – ставролит – дистен» (минералы кристаллических пород высоких ступеней метаморфизма).

Более отчетливо корреляционные связи между минералами выступают при анализе дифференцированных массивов данных (рис. 6). Например, для минеральных ассоциаций пород среднекарбонového-раннепермского возраста группа «рутил – ставролит – дистен» дополняется другими взаимо-

Таблица 1

Минеральные ассоциации промежуточных коллекторов

Разновозрастные промежуточные коллектора	Группы минералов, выделенные кластерным анализом	1ГК	2ГК
Среднекарбонové-раннепермские породы	Группа 1 (9 мин-лов)	Py 0,74 Lim 0,73 Mgt 0,64 /Ilm -0,74 Epy -0,52 Alm -0,51	Gros 0,71 Alm 0,60 /Andr -0,71
	Группа 2 (12 мин-лов)	Sph 0,95 Leu 0,93 Ru 0,91 Zr 0,81 Di 0,80 Sta 0,76 An 0,70 /-	Sp 0,73 Turm 0,69 /Ap -0,57
Позднеплиоценовые-раннеплейстоценовые породы	Группа 1 (9 мин-лов)	Gros 0,51 /Mgt -0,78 Alm -0,73 Andr -0,73 Lim -0,60	Amph 0,90 Epy 0,75 /-
	Группа 2 (12 мин-лов)	Sta 0,87 Ru 0,81 Di 0,80 Cr 0,75 An 0,73 Zr 0,69 Sp 0,56 /-	Sph 0,91 Ap 0,82 /Sp -0,52

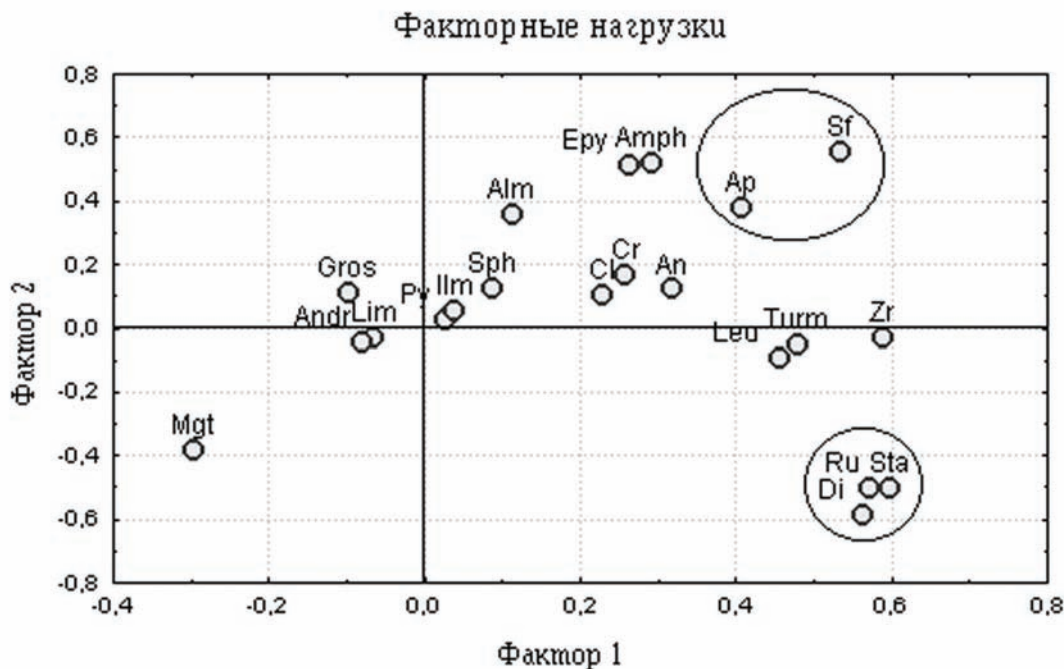


Рис. 5. Факторные нагрузки для 21 минерала из общего массива

связанными минералами, образуя устойчивый парагенезис: шпинель – апатит – анатаз – циркон – рутил – сфен – ставролит – дистен – лейкоксен (рис. 6А). В породах позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста состав этой минеральной ассоциации сохраняется, но происходит некоторое ослабление корреляционных связей между минералами (рис. 6В). На этом фоне особенно заметна неинформативность «магматической» группы минералов (рис. 6Б, Г).

Таким образом, минеральный парагенезис шпинель – апатит – анатаз – циркон – рутил – сфен – ставролит – дистен – лейкоксен в целом характеризует достаточно высокую упорядоченность, возникающую при достаточной «зрелости» и сортированности пород; она является типичной для промежуточных коллекторов.

Выводы

Таким образом, в процессе свертки поликомпонентных систем, каковыми являются минеральные ассоциации четвертичного аллювия, полученные по данным шлихоминералогического анализа, было установлено следующее:

1. Удалось выявить некоторые особенности структуры минерального поля алмазоносного района, сложенного разнообразными комплексами магматических и метаморфизованных осадочных пород широкого возрастного диапазона.

2. С помощью кластерного анализа в изученном массиве данных, образованном более чем 2000 проб, удалось выделить две группы минералов, характеризующиеся неодинаковыми корреляционными связями. Более тесными связями обладает достаточ-

но обширная (12) группа кластогенных минералов, для которых можно предположить их происхождение из метаморфизованных осадочных пород. Более слабыми связями обладает группа минералов предположительно «магматогенного» происхождения (поступавшие при размыве траппов и кимберлитов).

3. Ассоциация из 12 минералов вида рутил – циркон – апатит – сфен – анатаз – хлорит – шпинель – турмалин – хромит – дистен – ставролит – лейкоксен, характеризующаяся наиболее высокими внутренними корреляционными связями, может рассматриваться в качестве дополнительного признака, указывающего: а) на то, что данный комплекс терригенных пород обладает потенциальными свойствами промежуточных коллекторов алмазов, и б) на то, что указанные породы вносят важный вклад в формирование минерального облика четвертичных аллювиальных отложений.

4. Среди осадочных пород различного возраста были выявлены два промежуточных коллектора, характеризующиеся высокой упорядоченностью минералов. Контуры россыпных месторождений Мало-Ботуобинского алмазоносного района совпадают с областью отрицательных значений 1ГК и 2ГК. С помощью Метода Главных Компонент были выделены минеральные ассоциации, характерные для промежуточных коллекторов, а также тенденция унаследования минеральных ассоциаций от пород среднекарбонного-раннепермского возраста до пород позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 02-05-64673 и научной школы НШ-2082.2003.05.

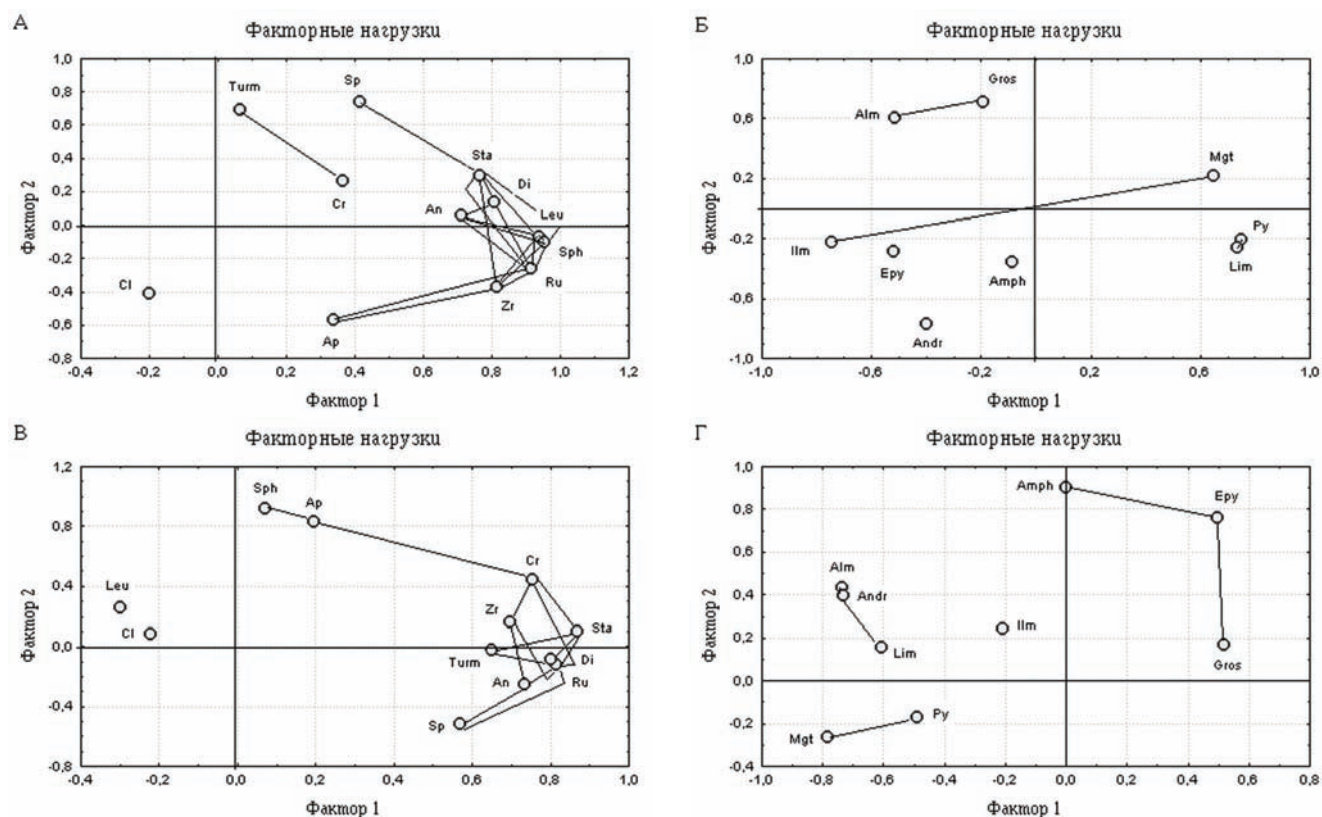


Рис. 6. Факторные нагрузки для массива из 9 и 12 минералов среднекарбового-раннепермского (А-Б) и позднелиценного-раннеплейстоценового (В-Г) возраста (линии проведены между теми минералами с коэффициентом корреляции более 0,5)

ЛИТЕРАТУРА

1. Батурич В.П. Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. Москва, 1947. – 338 с.
2. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. (+CD). – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
3. Верховская Л.А., Сорокина Е.П. Математическое моделирование геохимического поля в поисковых целях. М.: Недра. 1981. – 245 с.
4. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии: Пер. с англ. В 2 кн. / Пер. Голубевой В.А., Под ред. Родионова Д.А. Кн.2. М.: Недра, 1990. – 427 с.
5. Кухаренко А.А. Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 230 с.
6. Патык-Кара Н.Г. Россыпи в системе седиментогенеза // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 5. С. 494-508.
7. Патык-Кара Н.Г., Бардеева Е.Г., Бочнева А.А., Чиждова И.А. Факторный анализ при изучении типоморфных минеральных ассоциаций и характера их распределения // Материалы Всероссийского Симпозиума «Геология, генезис и вопросы освоения комплексных месторождений благородных металлов». – М.: ООО «СВЯЗЬ-ПРИНТ», 2002. С. 317-319.
8. Патык-Кара Н.Г., Шевелев А.Г. Использование метода главных компонент в изучении пространственного распределения минеральных ассоциаций прибрежно-морских россыпей. Тез. докл. IX Всесоюз. Сов. по геологии россыпей. Ч.3. – Бишкек, 1991. С. 189-195.
9. Подвысоцкий В.Т. Терригенные алмазоносные формации Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – 276 с.
10. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: Инфра-М, 1995. – 384 с.
11. Формации и седиментогенез материковой окраины (на примере шельфовых зон Северо-Востока СССР) / Под ред. Б.Х. Егизарова. – Л.:Недра, 1981. – 196 с.
12. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра, 1997. – 600 с.
13. Шур В.И., Патык-Кара Н.Г. Минеральные ассоциации кайнозойских отложений оловорудных районов Восточной Якутии // Литология и полезные ископаемые. – Москва, 1983. – № 5. – С. 39-46.
14. Bochneva A. Selecting of Mineral Assemblages of Diamond-Bearing Intermediate Hosts By Geostatistical Methods // Abstracts of Annual Conference of International Association for Mathematical Geology, Great Britain, Portsmouth, 2003, CD-version.
15. Ward, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58. – P. 236-243.
16. Tryon, R. C. (1939). Cluster Analysis. Ann Arbor, MI: Edwards Brothers.