



КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА АЛМАЗОНОСНОСТИ ПОИСКОВЫХ ПЛОЩАДЕЙ ВОСТОЧНОГО БЕЛОМОРЬЯ

Представлены этапы и стадии количественного морфогенетического анализа индикаторных минералов кимберлитов и примеры использования данного метода для паспортизации уже открытых тел и типизации поисковых ореолов. Сделан прогноз на выявление новых тел на территории Восточного Беломорья.

Ключевые слова: кимберлиты, алмазы, поисковые ореолы, шлиховой анализ.

Изучение минералов-спутников алмаза (МСА) в разновозрастных вторичных ореолах, сопровождающих кимберлиты Архангельской провинции (ААП), выявило поисковые особенности данной территории [22]: низкие содержания индикаторных минералов кимберлитов (ИМК), хорошая сохранность кратерных фаций и незначительный эрозионный срез, значительная мощность перекрывающих отложений, слабая динамическая активность современных водотоков. Отмеченные факторы усложняют проведение систематических шлихоминералогических исследований на территории Восточного Беломорья и требуют совершенствования применяемых методик.

Были изучены ИМК на нескольких поисковых участках, охватывающих площади развития вторичных ореолов вблизи месторождения им. М.В.Ломоносова (Золотицкий, Пионерский участки), трубки им. В.Гриба и трубок Верхотинской группы (Белореченский), в пределах Кепинского поля (Пинежская, Долматовская, Емецкая площади). Проанализированы сотни проб из перекрывающих кимберлиты палеозойских отложений, а также из разновозрастных и разнофациальных четвертичных (рис. 1). Исследования включали оптические наблюдения и покристальное описание ИМК и разделение их по морфогенетическим типам; электронно-микроскопическое изучение особенностей микроморфологии ИМК и количественную обработку эталонных изображений; обобщение результатов электронно-зондовых микроанализов ИМК с последующей статистической обработкой полученных данных по программам кластерного и дискриминантного анализов; обобщение данных изучения ИМК спектроскопическими методами (оптическая спектроскопия и колориметрия, ИК-спектроскопия, термомагнитный анализ).

Для восстановления истории миграции ИМК выполнен количественный морфогенетический анализ, методика которого разрабатывалась с учётом современного состояния минералогических методов поисков и разведки месторождений алмаза [3, 4, 13, 17, 20]. Анализ показывает, что выделение химико-гене-



Посухова Татьяна Владимировна

кандидат геолого-минералогических наук
доцент
tposukhova@mail.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова»,
г. Москва

Гаранин Виктор Константинович

доктор геолого-минералогических наук
научный руководитель
vgaranin@mail.ru

ФГБУН Минералогический музей
им. А.Е.Ферсмана РАН,
г. Москва



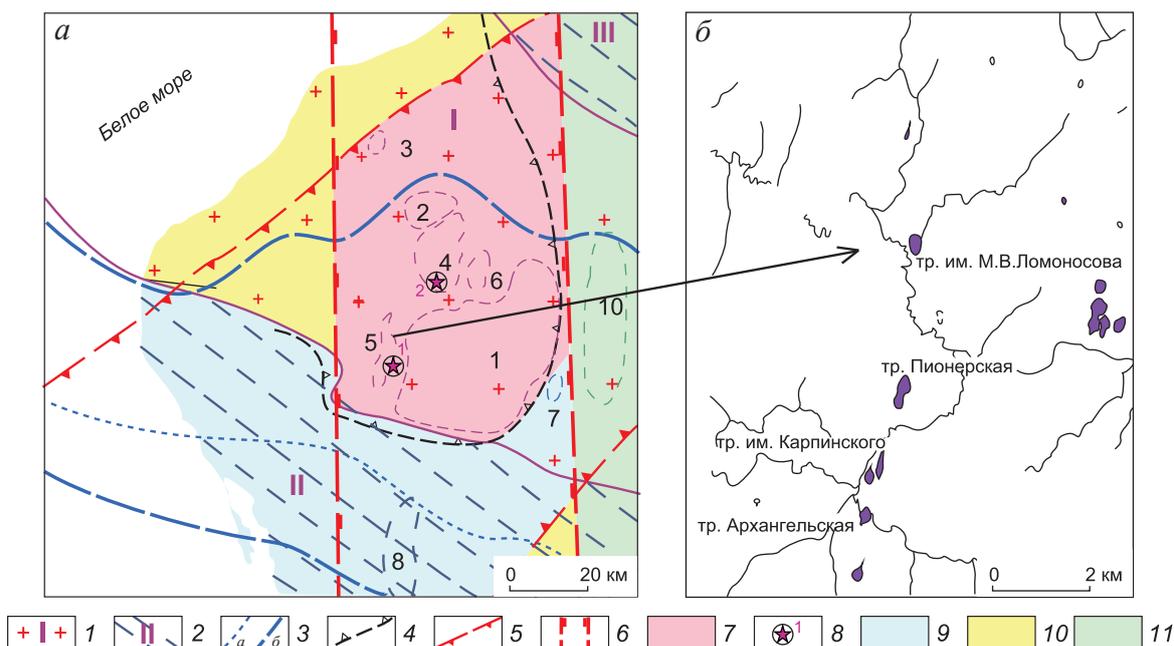


Рис. 1. СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВ И ПРОЯВЛЕНИЙ СОПУТСТВУЮЩЕГО МАГМАТИЗМА (а), РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ОРЕОЛОВ (б) В АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ (по В.В.Третьяченко, 2008 г.):

1 – Кольско-Кулойский (I), 2 – Беломорский (II), Мурманский (III) блоки; 3 – зона палеопротерозойской тектоно-термальной переработки (а – предполагаемые границы зоны, б – осевая линия Главного Беломорского шва); 4 – области повышенного электрического сопротивления глубинных горизонтов земной коры, выделенные по данным МТЗ; формационно-минерагенические зоны: 5 – Архангельская, 6 – Зимнебережная; кимберлитовая область (щёлочно-ультраосновного вулканизма) Юго-Восточного Беломорья: 7 – Зимнебережный район алмазоносных кимберлитов – беспироксеновых пикритов (1 – Кепинское, 2 – Мегорское, 3 – Мельское, 4 – Черноозёрское, 5 – Золотицкое, 6 – Верхотинское поля), 8 – месторождение алмазов им. М.В.Ломоносова (1), трубка им. В.Гриба (2), 9 – Архангельский район фельдшпатоидных пикритов – оливиновых мелилититов (7 – Суксомское, 8 – Чидвинско-Ижмозерское поля), 10 – районы с неясными перспективами алмазоносности; 11 – Сояна-Пинежский район развития базальтовых трубок (10 – Турьинское поле)

тических групп ИМК на основании бинарных и тройных диаграмм не всегда даёт однозначные результаты, а сложные и слишком детальные схемы покристального описания алмазов и МСА не подходят для массовых исследований. Особенно большие трудности возникают при обработке проб, отобранных на территории ААП, в кимберлитах которой значительную часть составляют так называемые «низкопутниковые» разности, отличающиеся низким выходом высокобарных минералов в тяжёлой фракции, их мелкими размерами и высокой засорённостью проб ксеногенным материалом из вмещающих пород. Кроме того, в применяемых схемах не всегда увязываются морфология, состав и свойства минералов, и поэтому они не могут быть основой комплексных морфогенетических исследований. Для выявления и изучения морфогенетических особенностей ал-

маза и сопутствующих ему минералов в рассмотренных объектах Восточно-Европейской платформы был применён комплексный подход, включающий поэтапные минералогические исследования с последующей математической обработкой полученных данных.

На первом этапе проводится покристальное описание алмазов и МСА по простым унифицированным схемам (рис. 2). На этой основе выделяются морфологические группы алмазов и МСА, количественно оценивается степень их распространённости в соответствии с методикой, описанной в работах [1, 2, 16]. Главное отличие предлагаемых схем – сокращение групп по ведущим индикаторным признакам (окраска, степень сохранности, характер поверхности), добавление такой важной характеристики, как характер внутреннего строения и исключение из рассмотрения оценки сте-

а



б

Цвета	Код	Сохранность	Код
Изумрудно-зелёный	1	Целый	1
Светло-изумрудно-зелёный	2	Колотый 1/2	2
Светло-травяно-зелёный	3	Колотый 1/3	3
Травяно-зелёный	4	Колотый 1/4	4
Оранжевый	5	Колотый 2/3	5
Красный	6	Колотый 3/4	6
Красно-фиолетовый	7	Осколок	7
Фиолетовый	8	Колотый	8
Фиолетово-красный	9		
Оранжево-красный	10		
Светло-фиолетово-красный	11		
Светло-фиолетовый	12		
Розово-фиолетовый	13		
Красно-оранжевый	14		
Светло-красно-фиолетовый	15		
Жёлтый	16		

Рис. 2. УНИФИЦИРОВАННЫЕ СХЕМЫ ПОКРИСТАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ЗЁРЕН ГРАНАТА В ШЛИХОВЫХ ПРОБАХ, ПО ДАННЫМ АВТОРОВ (а), ПО ДАННЫМ В.К.СОБОЛЕВА, 1987 (б)

пени износа на основании визуально-оптических исследований. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку рельеф округло-овальных зёрен с матированной поверхностью может быть сформирован в разных обстановках: как непосредственно в кимберлитовом расплаве вследствие магматической коррозии, так и в экзогенных условиях при механическом истирании. Определить эти различия можно только с применением растровой электронной микроскопии, что предусмотрено на втором этапе.

На *втором этапе* алмазы и МСА изучаются методами растровой электронной микроскопии, включая количественную обработку изображений. По полученным результатам выделяются морфогенетические группы (рис. 3).

Первая группа – минералы мантийных парагенезисов. Скульптура поверхности таких зёрен (ямчато-бугорчатая у гранатов, шипастая у ильменита, треугольно-слоистая у хромитов) обусловлена сохранением первичных кристаллизационных форм, взаимодействием с кимберлитовым расплавом или механической абразией при формировании трубочных тел [5].

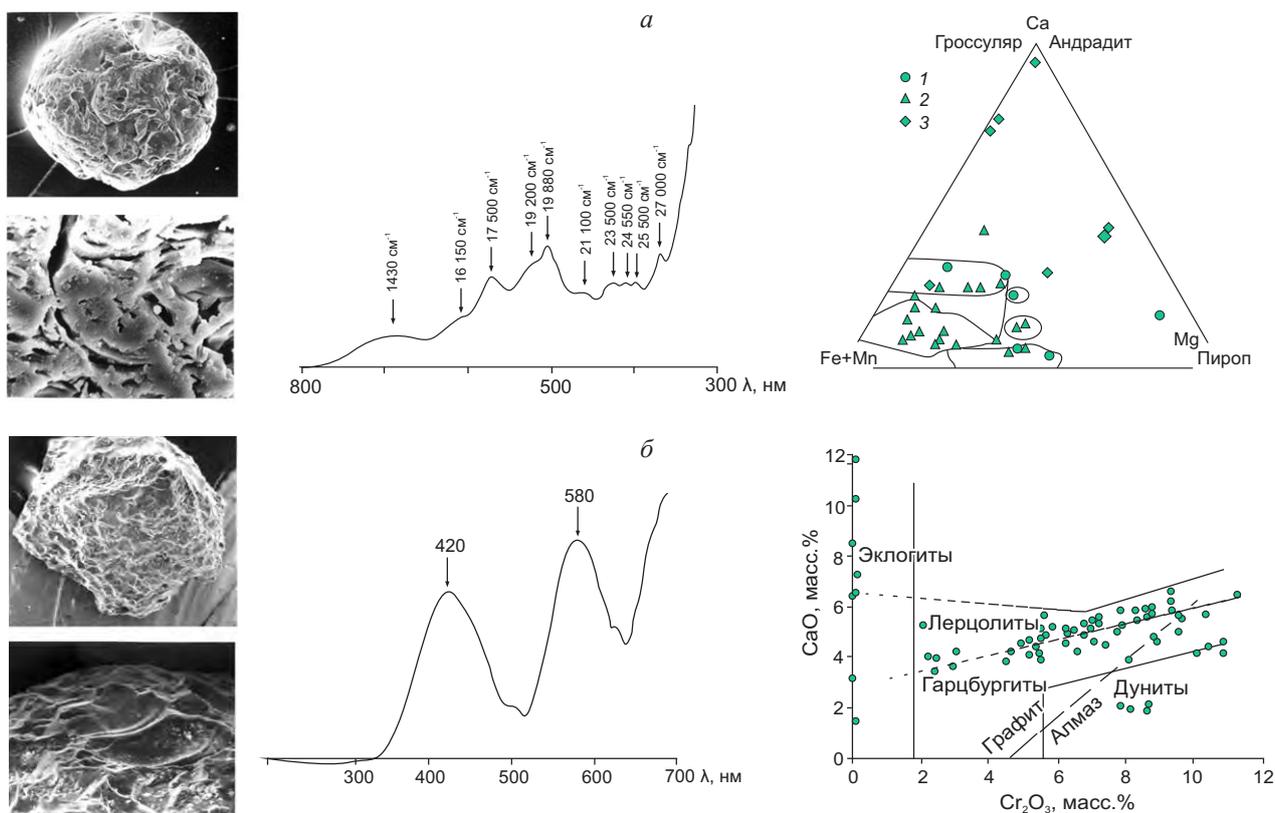


Рис. 3. МИКРОМОРФОЛОГИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ГРАНАТОВ РАЗНЫХ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА И СОПУТСТВУЮЩИХ ОРЕОЛОВ:

а – Mn-содержащие альмандины из вмещающих метаморфитов, *б* – ксенокристы Cr-пиропов из мантийных парагенезисов; 1 – гранаты из концентратов обогащения; 2 – то же, с минеральными включениями; 3 – гранаты из ксенолитов метаморфических пород

Вторая группа – зёрна из вмещающих пород, засоряющие пробы. На их поверхности в РЭМ наблюдаются скульптуры (ямки и каналы травления, фасетки, выбоины), характерные для процессов гипергенной коррозии и механогенного износа [9, 12].

Третья группа – зёрна, характерные для подвергавшихся выветриванию верхних горизонтов трубок, туфогенно-осадочных пород и вторичных коллекторов. Их морфологические особенности (разнообразные вторичные корки) сформировались при коррозионном растворении.

Четвёртая группа – зёрна ИМК с геометрически правильным (черепитчатым) микрорельефом поверхности, который может образовываться как в процессе растворения, так и в результате регенерации сколовых поверхностей при метасоматозе и диагенезе.

Весьма важную генетическую информацию может дать количественная оценка электронно-микроскопических изображений. В настоящее время разработано несколько методик, позволяющих установить разницу высот двух точек образца, измерить угол между гранями кристаллов, определить абсолютные пространственные координаты, используя геометрию параллельных проекций. Путём обмера стереопар можно получить количественную оценку разных топографических деталей, в том числе степени сохранности зёрен с использованием комплекса РЭМ-ЭВМ [21]. В данной методике контур частицы представляется в полярных координатах зависимостью радиуса *R* от центрального угла θ .

Полученная функция раскладывается в ряд Фурье по формуле:

$$R_{\theta} = R_0 - \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \theta + B_n \sin \theta),$$

где: R_0 – средний радиус проекции зерна, A_n , B_n – амплитуды Фурье (коэффициенты тригонометрических функций), n – номер гармонического ряда.

Тогда, задавая n , можно описать любой контур с любой точностью. Чтобы исключить влияние масштаба снимка и размера зерна, высчитываются среднеквадратичные значения амплитуд, нормированные по среднему радиусу частицы:

$$P_n = 1/R_0[(A_n^2 + B_n^2)/2]^{1/2}.$$

Среднеквадратичные значения амплитуд по первому десятку гармоник являются количественной мерой формы частиц (степень отклонения проекции зерна от круга), а по второму и третьему десяткам гармоник – величины мелких неровностей, определяющих характер поверхности (микрорельеф).

На *третьем этапе* проверяется генетическая принадлежность зёрен по результатам спектроскопических исследований и электронно-зондового микроанализа. Применение методов оптической спектроскопии, ИК-спектроскопии и термомагнитного анализа позволяет экспрессно выделять минералы кимберлитового генезиса (пиропы, хромшпинелиды, пикроильмениты) от засоряющих пробу ксеногенных зёрен из вмещающих пород (альмандины, ферришпинелиды, низкомагнезиальные ильмениты) (см. рис. 3). При статистической обработке результатов электронно-зондовых микроанализов осуществляется разделение на химико-генетические группы [1, 8] с использованием методов кластерного и дискриминантного анализов. Данный метод статистической обработки фактического материала выгодно отличается от использования традиционных бинарных и тройных диаграмм тем, что его применение не требует большого количества зёрен. Достаточно присутствия в пробе нескольких зёрен ИМК из малораспространённых химико-генетических групп, чтобы типизовать ореол.

Была проведена оценка эффективности данной методики на примере ряда тестовых объектов (Мало-Ботубинский район Якутии, кимберлиты Харамайского поля, четвертичные отложения Белоруссии). Установлено, что применение предложенной схемы позволяет разделять минералы на морфогенетические группы, количественные соотношения между которыми закономерно изменяются в вертикальном разрезе тел и в различных типах кимберлитовых пород [6, 10]. Полученные

результаты показывают, что предложенная методика даёт возможность выявлять и изучать типоморфизм ИМК и проводить типизацию коренных источников и ореолов [9, 11, 12, 15].

Задача типизации поисковых ореолов требует выявления типоморфных особенностей уже открытых кимберлитовых тел [18]. Типоморфные особенности также можно определить, используя методику количественного морфогенетического анализа. На основе данной методики нами были изучены кимберлитовые тела ААП и проведена их паспортизация.

Кимберлиты трубки им. В.Гриба отличаются наиболее высокими качественными и количественными характеристиками алмазного сырья на территории ААП [7], поэтому особенности ИМК месторождения могут быть взяты за основу при выявлении положительных поисковых морфогенетических признаков. Результаты морфогенетических исследований показали, что особенности ИМК хорошо сопоставляются с высоким качеством алмазов. Все зёрна МСА в кимберлитах трубки крупные, преобладающий минерал – *ильменит*. Наиболее распространены зёрна ильменита «в рубашке» – 55%, которая формируется [15] при метасоматической переработке. Поликристаллические агрегаты, возникающие при рекристаллизации [5], также достаточно распространены (38%). Зёрна с шероховатой наждачной поверхностью, образующейся при агрессивном воздействии кимберлитового расплава [9], не характерны. По составу минерал относится к промежуточным членам ряда ильменит–гейкилит. Он характеризуется высокими содержаниями MgO 10,25–16,55 и Cr_2O_3 0,18–7,38 масс. %, низкими – FeO 17,80–27,45 и MnO (до 1,15, в среднем 0,24 масс. %). Все проанализированные зёрна отнесены к алмазоносным парагенезисам. Для *гранатов* характерны крупные размеры (>2 мм), слабое развитие специфических форм магматической коррозии, широкое проявление мантийного метасоматоза и катаклаза, развившееся в повышенной трещиноватости и развитии зональных амфибол-флогопитовых кайм, образующихся при воздействии Na-K-флюида [2]. Установлены гранаты особой цветовой группы (красно-коричневые), которые являются продуктами дезинтеграции мантийных ильменитсодержащих перидотитов. *Клинопироксены* также крупные и несут явные следы катаклаза и мантийного метасоматоза (скульптуры регенерации, трещины, ши-

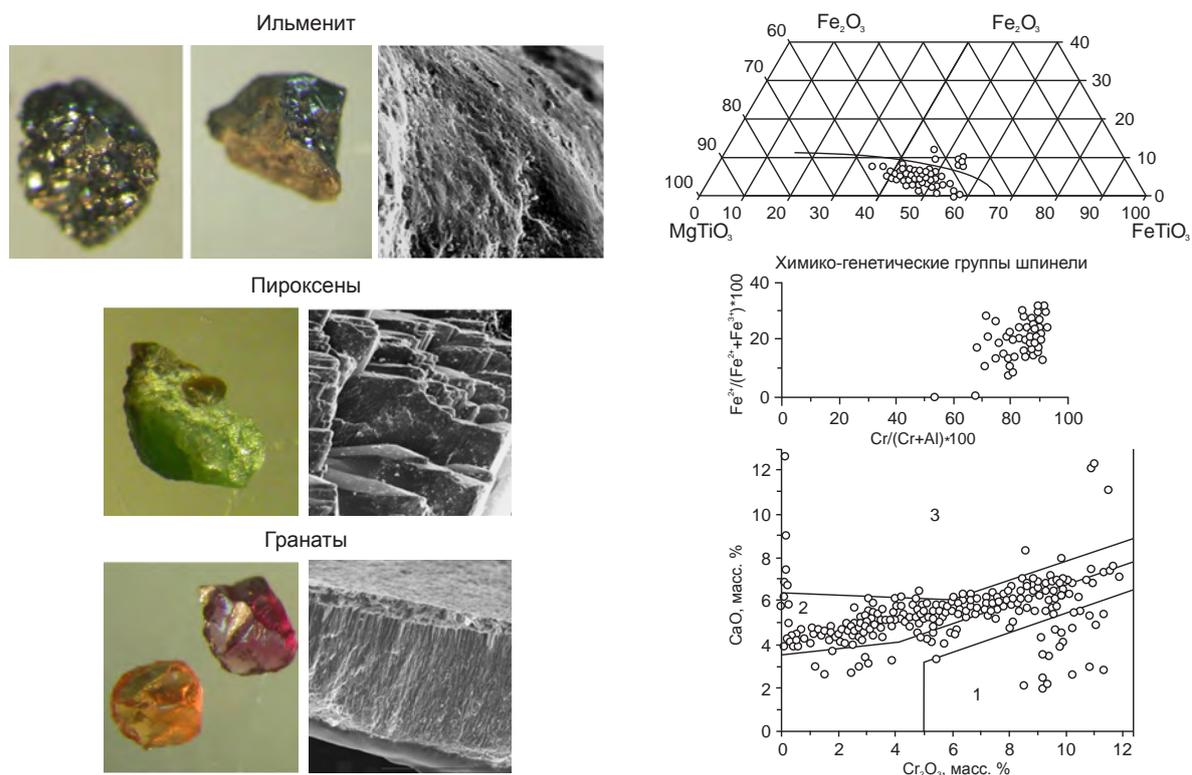


Рис. 4. ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА ИМК В КИМБЕРЛИТАХ ТРУБКИ ИМ. В.ГРИБА

рокое развитие включений и сростков с флогопитом). Отмечается значительное количество тёмных железистых разностей, типичных для ильменитовых парагенезисов. Хромитов очень мало, и среди них отсутствуют сложные вициальные многогранники. Выделены четыре химико-генетические группы, все они высокохромистые (Cr_2O_3 более 45 масс. %), велика доля хромитов из высокоалмазоносных дунитов и гарцбургитов (24%).

По результатам проведённых исследований установлены главные типоморфные морфогенетические особенности ИМК в кимберлитах трубки им. В.Гриба: крупные (до 1 см) зёрна ИМК с каймами и регенерационными скульптурами на гранатах и пироксенах, поликристаллические желваки ильменита «в рубашке», присутствие ИМК из высокоалмазоносных перидотитовых парагенезисов, включая ильменитсодержащие, с признаками метасоматического замещения и катаклаза, слабой резорбции (рис. 4).

Кимберлиты месторождения им. М.В.Ломоносова по содержанию и качеству алмазного сырья уступают таковым трубки им. В.Гриба. Месторождение расположено в пределах Золотицкого

поля и объединяет пять основных промышленно-алмазоносных трубок (Архангельская, им. М.В.Ломоносова, Пионерская, им. Карпинского-1 и 2) и трубку с низкими забалансовыми содержаниями алмазов – Поморскую. Породы характеризуются низким выходом минералов тяжёлой фракции (0,1–40 г/т), в том числе МСА. Наиболее распространены хромшпинелиды при подчинённых количествах гранатов и клинопироксенов и отсутствии ильменита. Мантийные ксенолиты редки и подвержены сильным вторичным изменениям. Мегакристаллы (дискретные нодулы) пикроильменита, бедного хромом клинопироксена и титанистого граната не обнаружены.

Результаты морфогенетических исследований показывают, что в кимберлитах месторождения все зёрна ИМК мелкие, преобладают хромшпинелиды. Характерно присутствие зёрен без элементов огранки и эндемичных сложноогранённых с блоковым строением и специфичным «подушкообразным» рельефом поверхности. Выявлены сложный изоморфизм в октаэдрической позиции ($Cr^{3+}-Al^{3+}-Fe^{3+}$) с участием Ti и широкий изоморфизм между Mg и Fe^{2+} с участием Mn в тетраэд-

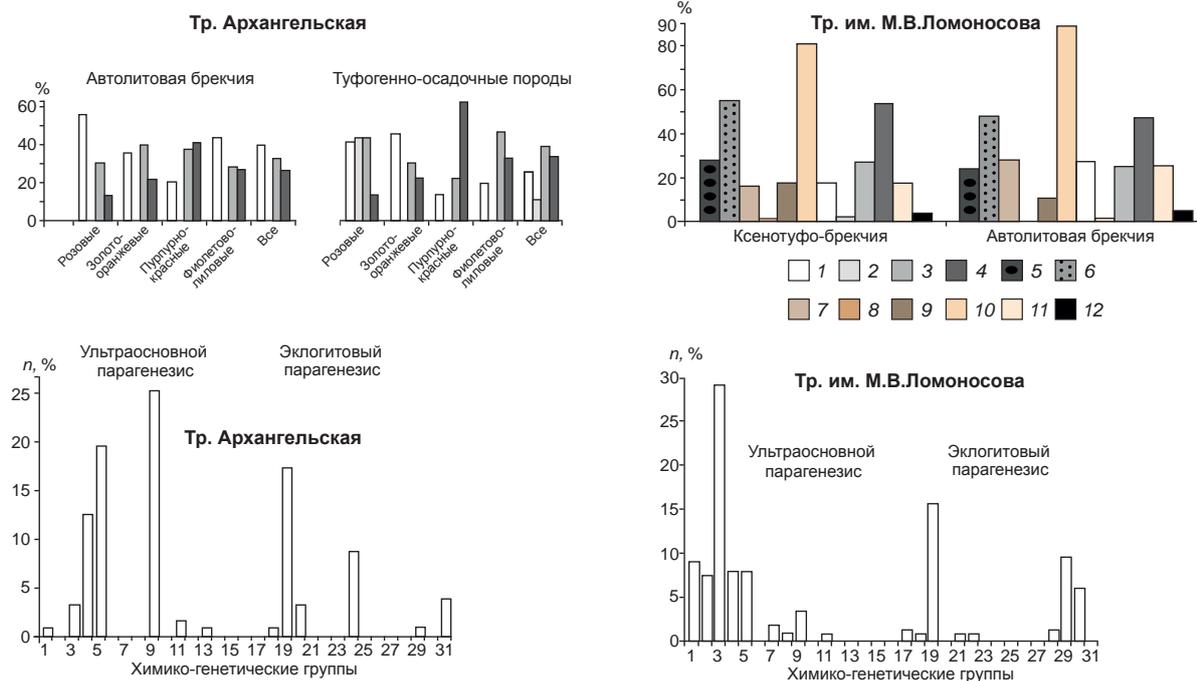


Рис. 5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЁРЕН ГРАНАТОВ РАЗЛИЧНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ И ХИМИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГРУПП (1–31) В РАЗНЫХ ТРУБКАХ ЗОЛОТИЦКОГО ПОЛЯ ААП:

1 – гладкие; 2 – черепитчатые; 3 – тонкоматированные; 4 – ямчато-бугорчатые; 5 – целые и повреждённые; 6 – расколотые и обломки; 7 – осколки; 8 – огранённые; 9 – округло-овальные; 10 – неправильные; 11 – с включениями; 12 – в рубашке

рической координации. Выделены 13 химико-генетических групп хромшпинелидов [1], относящихся к глубинным ультраосновным парагенезисам. Постоянно встречаются зёрна, состав которых отражает условия, характерные для генетических спутников алмаза: $Cr_2O_3 > 62$ и $Al_2O_3 < 7,5$ масс. % [23]. Особую группу представляют *микрористаллические хромшпинелиды* из связующей массы кимберлитов. Среди них широко развиты высокохромистые пикрохромиты 1-й группы при малой распространённости титаномагнетитов и магнетита 8–10-й групп. Отсутствуют микрористаллические выделения ильменита и рутила.

Распределение морфологических групп *гранатов* существенно варьирует по отдельным трубкам (рис. 5), что можно использовать при паспортизации диатрем. В тр. им. Карпинского-1 высока доля целых зёрен (>40%) и с элементами огранки (10%). Для тр. Архангельская установлено наиболее высокое содержание зёрен округло-овальной формы (40%). В тр. им. М.В.Ломоносова преобладают зёрна с ямчато-бугорчатой поверхностью, а в трубке им. Карпинского-1 – зёрна с черепитчатой

скульптурой (до 40%), характерной для процессов регенерации. Доля зёрен «в рубашке» во всех трубках мала (1–10%). Изучена распространённость различных морфологических типов зёрен МСА в диатремовых и кратерных частях трубок. Отмечены различия в соотношениях целых и расколотых зёрен и различная степень засорённости кимберлитов ксеногенным материалом из вмещающих пород. По оптико-спектроскопическим характеристикам, химическому составу и результатам анализа минеральных включений выделены три главные генетические группы:

- гранаты *метаморфического происхождения*, количество которых в кратерных фациях может увеличиваться до 30–40%;
- гранаты *ультраосновного парагенезиса*, характерные для жерловых фаций, среди которых преобладают гранаты из алмазоносных минеральных ассоциаций (49%);
- гранаты *эклогитового парагенезиса* из ксенолитов глубинных пород мантии (8,9%) и из эклогитоподобных пород.

Клинопироксены найдены только в мелких классах крупности (<2 мм). Целые зёрна редки, преобладают расколотые зёрна и обломки (50–60%). В тр. Архангельская много выделений с шероховатой поверхностью, а в тр. им. М.В.Ломоносова в эруптивной брекчии верхних горизонтов отмечаются многочисленные зёрна с пирамидально-черепитчатым рельефом (до 60%). Пироксены мало-железистые (FeO 2,36 масс. %), богаты магнием (MgO 17,86 масс. %) и в меньшей степени кальцием (CaO 17,11 масс. %) и сравнительно бедны глинозёмом (Al₂O₃ 1,60 масс. %). Характерны значительное содержание хрома (0,14–5,11 масс. % Cr₂O₃) и наличие зёрен с низким отношением Al₂O₃/Na₂O. Выделены 12 химико-генетических групп [1], которые по-разному распределены в отдельных трубках, что можно использовать для паспортизации диаметра. Главными группами являются:

- включения и сростки с алмазом;
- гранат-клинопироксен-хромшпинелевые сростки;
- слабоалмазоносные равномерно-зернистые и катаклазированные лерцолиты;
- слабоалмазоносные равномерно-зернистые вебстериты и пироксениты.

В каждой трубке морфогенез ИМК проходил в разных условиях, что определило типоморфные характеристики изученных объектов, которые могут быть использованы при их паспортизации и типизации ореолов. Вместе с тем, полученные данные позволяют отметить общие типоморфные особенности ИМК в кимберлитах месторождения им. М.В.Ломоносова: присутствие только мелких (<0,5 мм) овализованных ксенокристов ИМК из мантийных перидотитов и эклогитов, включая алмазоносные парагенезисы и эндемичные сложногранённые кристаллы хромшпинелидов блокового строения со специфичным «подушкообразным» микрорельефом поверхности и с примесью титана.

Кимберлиты трубок Верхотинского и Кепинского полей отличаются наиболее низкими качественными и количественными характеристиками алмазного сырья, поэтому могут служить эталонными объектами для выявления поисковых морфогенетических признаков, указывающих на низкую алмазоносность пород. В трубках Кепинского поля зёрна ИМК мелкие, *ильменит* – преобладающий минерал. Высокомагнезиальные и высокохромистые разновидности, типичные для трубки

им. В.Гриба, редки, характерна повышенная железистость. В двух трубках обнаружен ильменит в ассоциации с оранжевым гранатом и клинопироксеном из ксенолитов ильменитовых эклогитов. Большинство зёрен мелкие со специфичным «шипастым» микрорельефом (рис. 6), формирующимся при магматической коррозии (наждачный микрорельеф, преобладание зёрен в «рубашке», трещиноватость, каналы и ямки травления), что прямо коррелирует со слабой продуктивностью этих трубок. *Гранаты* отличаются высокими содержаниями фиолетовых разновидностей, отнесённых к ультраосновным алмазоносным парагенезисам (6,5% – дуниты и гарцбургиты, 36,1% – равномерно-зернистые лерцолиты). Характерны низкая степень сохранности зёрен, преобладание осколков и зёрен с кавернозным рельефом. Зафиксированы зёрна с келифитовой каймой, имеющей однородный флогопитовый состав и мелкозернистую текстуру, образование которых связано с воздействием существенно калиевого флюида и кристаллизацией из расплава [1]. *Хромшпинелиды* отличает полное отсутствие выделений округло-овальной формы. Доминируют разнообразные по составу октаэдрические микрокристаллы (высокохромистые и умеренно-титанистые субальюмоферрихромиты, высокотитанистые субальюмомагнетиты, хромистые титаномагнетиты), для которых характерны изоморфизм типа $Cr^{3+} \rightarrow Ti^{4+} + Fe^{3+}$ и присутствие структур распада твёрдых растворов в ряду хромшпинели–титаношпинели–ферришпинели. Специфика составов хромшпинелидов выражается в повышенных содержаниях оксидов железа, двуоксидов титана и глинозёма, что свидетельствует о высокой окисленности среды минералообразования.

В оливиновых мелилититах Верхотинского поля зёрна ИМК мелкие, *ильменит* отсутствует. Редкие выделения *граната* неправильной формы, округлых зёрен мало, зёрен с огранкой и гладкой поверхностью не обнаружено, но много с шероховатой и черепитчатой, что говорит о существенной постмагматической переработке поверхности минералов. Выделено восемь химико-генетических групп [1], включая алмазоносные: хромистые пиропы, кноррингит-уваровитовые пиропы, уваровит-кноррингитовые пиропы. *Клинопироксены* Верхотинского и Кепинского полей отличаются отсутствием целых зёрен, зёрен в «рубашке» и с гладкой поверхностью. Характерны зёрна с из-

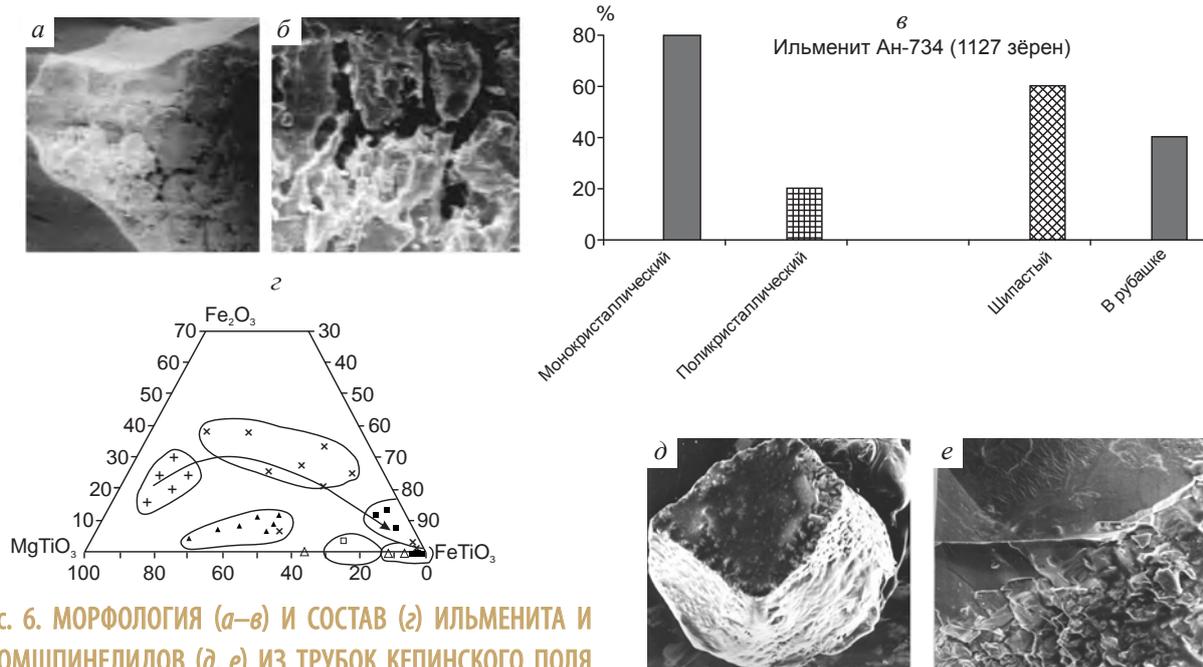


Рис. 6. МОРФОЛОГИЯ (а–в) И СОСТАВ (г) ИЛЬМЕНИТА И ХРОМШПИНЕЛИДОВ (д, е) ИЗ ТРУБОК КЕПИНСКОГО ПОЛЯ

менённой, корродированной поверхностью, что может свидетельствовать о реакционном взаимодействии с расплавом. Химический состав их довольно разнообразен: MgO от 16,27 до 19,98, CaO от 17,03 до 20,53%. Тренды составов для отдельных трубок существенно различаются, что можно использовать для их паспортизации. Отношение Ca/(Ca+Mg) в трубках Верхотинского поля равно 48–49, что отвечает температуре кристаллизации 900–940°C.

Таким образом, изученные диатремы существенно различаются по набору минералов-спутников алмаза, относящихся к различным глубинным и коровым парагенезисам, что подчёркивает различия в условиях их глубинного морфогенеза и позволяет проводить их паспортизацию с учётом типоморфных особенностей. Полученные материалы выявляют значимые отличия в распространённости различных морфогенетических групп ИМК в изученных трубках ААП, представленных тремя основными ассоциациями: гранат-клинопироксен-хромшпинелевой для месторождения им. М.В.Ломоносова, клинопироксен-гранат-ильменитовой для тр. им. В.Гриба и гранат-хромшпинель-ильменитовой для трубок Кепинского поля. Эти отличия – основа для решения вопросов типизации и локализации поисковых ореолов.

В целях реконструкции геологических условий формирования и типизации поисковых орео-

лов сопоставлена распространённость различных морфологических типов зёрен ИМК в диатремах и сопровождающих трубки вторичных ореолах в палеозойских и четвертичных отложениях. В ореолах выявлено наличие зёрен ИМК трёх основных морфогенетических типов: зёрна, сохранившие первичный магматогенный или гидротермально-коррозионный рельеф, сформированный при коррозионном растрескивании под воздействием агрессивной карбонатной среды; зёрна из кор выветривания с признаками гипергенной коррозии; зёрна с сильным механическим износом.

Неравномерное распределение морфогенетических групп ИМК в разновозрастных и разнофациальных отложениях Зимнебережного района позволило выделить здесь несколько типов вторичных промежуточных коллекторов [14, 19].

Ореолы ближнего сноса с повышенными концентрациями МСА установлены в базальных горизонтах аллювиальных и дельтовых фаций урзугской свиты в районе Золотицкого поля. Они приурочены к районам трубок Пионерская, им. Карпинского, Архангельская, Снегурочка и находятся в непосредственной близости от них, на удалении <4 км. На зёрнах МСА первично-магматический рельеф хорошо сохранён. Процесс истирания проявлен слабо.

Ореолы дальнего сноса, в которых ИМК сильно изношены, претерпели прибрежно-морскую про-

работку, неоднократно переотложены и потеряли связь с первоисточником, обнаружены на Емецкой, Пинежской и Долматовской площадях.

Ореолы смешанного типа – это полигенные и полихронные ореолы рассеяния МСА. В пробах присутствуют зёрна с разной степенью механического износа. Данные ореолы сформировались в раннем и среднем карбоне в разных палеогеографических обстановках.

1. В условиях континентального сноса – зёрна МСА имеют среднюю и слабую степени износа, на их поверхности прослеживаются гидротермальные или гипергенные формы коррозии. Ведущим процессом преобразования минералов является коррозионное растрескивание, преобладают обломки и осколки зёрен. На зёрнах МСА хорошо сохраняется первично-магматический рельеф, отмечаются пиропы с реликтами келифитовой каймы и хромдиопсиды в карбонатной «рубашке». Процесс истирания проявлен слабо, т.е. они были транспортированы от первоисточника на небольшое расстояние и не подверглись прибрежно-морской проработке. Эти особенности говорят о прямом источнике сноса. Такие ореолы обнаружены в непосредственной близости и на удалении до 6–8 км к западу и юго-западу от трубок месторождения им. М.В.Ломоносова. Они отмечаются в базальных горизонтах аллювиальных и дельтовых фаций урзугской свиты среднего карбона. Подобные МСА установлены для Золотицкого и Пионерского участков [16].

2. В бассейновой (дельтовой и морского мелководья) обстановке осадконакопления – в отложениях урзугской свиты на Белореченском, Пионерском и Шочинском участках. Здесь выделены две резко отличающиеся ассоциации МСА – пироп-пикроильменитовая и пироповая. Различие морфологических характеристик зёрен свидетельствует о гетерогенном характере изученных ореолов. Типоморфные особенности МСА в пироп-пикроильменитовой ассоциации (повышенная степень механического износа зёрен, сравнительно большая их концентрация) указывают на морской характер обработки материала в волноприбойных условиях. Типохимизм МСА позволяет с большой долей вероятности предполагать связь пироп-пикроильменитовой ассоциации с кимберлитовыми трубками Кепинского поля. Формирование пироповой ассоциации МСА может быть связано с местными локальными источниками сноса, кото-

рыми могли служить трубки Первомайско-Кольцовской группы.

3. В условиях зрелых кор выветривания в отложениях поздневизейского возраста на Падунской площади. Особенности ореолов из этого коллектора свидетельствуют об интенсивных гипергенных изменениях МСА и незначительном механическом износе зёрен. Выявлены весьма неравномерное распределение МСА по латерали, отсутствие в ряде случаев пиропов при явно аномальных и ураганных концентрациях пикроильменитов и хромитов. Большинство зёрен имеют сильную гипергенную коррозию: кубоиды гранатов – 80%, зёрна с пирамидально-черепитчатой поверхностью – 15%. Зёрен с дислокационным типом коррозии – 12%. Форма гранатов неправильная, остроугольная, т.е. исходная степень их окатанности была слабая. Установлены совместное нахождение в пробах ильменитов различной степени механического износа, гранулометрии и химического состава, наличие значительного количества крупных зёрен (-2+1 и -4+2 мм), на поверхности которых развиваются специфические по составу и строению каймы.

Изучение химического состава зёрен позволило типизировать источники сноса для коллекторов в сравнении их с коренными месторождениями Архангельской провинции (рис. 7). В коллекторах Золотицкой и Пионерской площадей выявлены только гранаты ультраосновного парагенезиса, включая группы 7 и 8 с высокотитанистыми гранатами из ильменитовых лерцолитов, характерные для объектов Кепинского поля. В коллекторах Долматовской и Емецкой площадей установлены лишь низкохромистые разности гранатов из неалмазоносных парагенезисов, включая магнезиальные алькремиты и эклогитоподобные породы, т.е. в данных коллекторах преобладают ИМК, типичные для неалмазоносных кимберлитов и некимберлитовых первоисточников. В ореоле Пинежской площади, ореолах смешанного типа и в отложениях визейского возраста найдены зёрна, не имеющие аналогов по химическому составу среди коренных первоисточников. На Пинежской площади – это низкохромистые гранаты из магнезиально-железистых эклогитов, включая глубинный парагенезис гранатов из включений в алмазе (химико-генетические группы 4, 9, 17, 25, 26), на Золотицкой и Белореченской – низкохромистые гранаты (группа 9) и иль-

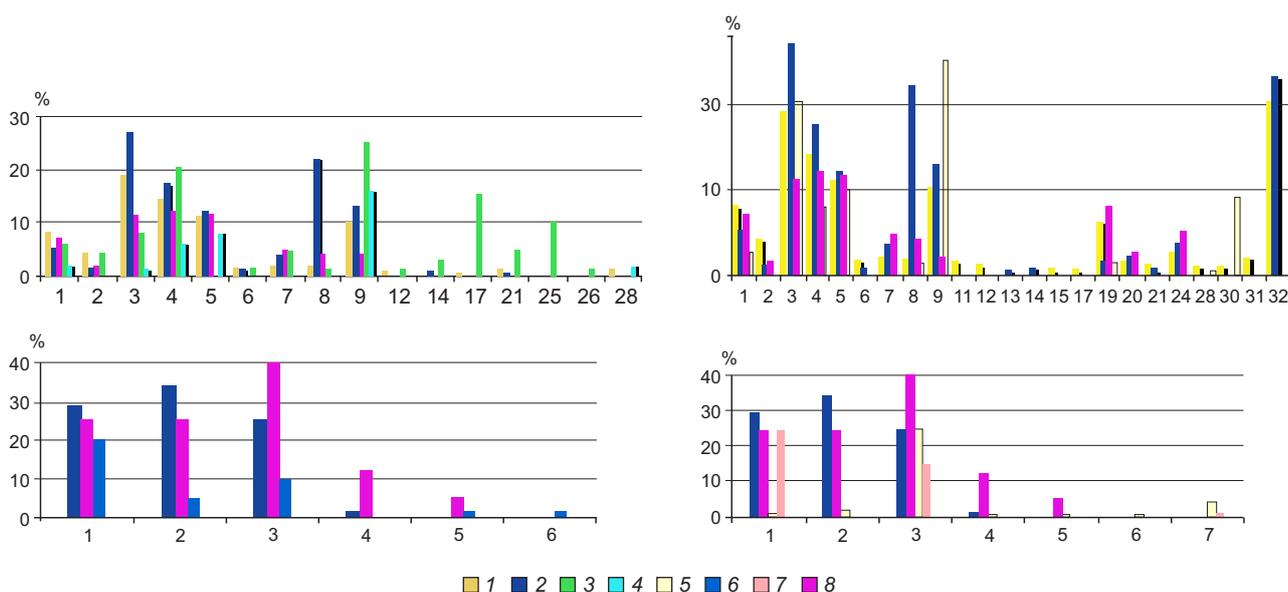


Рис. 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЁРЕН ГРАНАТОВ (а) И ИЛЬМЕНИТА (б) ПО ХИМИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИМ ГРУППАМ ГРАНАТОВ (1–28) И ИЛЬМЕНИТА (1–7) ИЗ КИМБЕРЛИТОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД (30–32) ДЛЯ ОРЕОЛОВ В СРАВНЕНИИ С СОСТАВОМ МСА ИЗ КОРЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

месторождения: 1 – им. М.В.Ломоносова, 2 – им. В.Гриба; площади: 3 – Пинежская, 4 – Емецкая, 5 – Белореченская, 6 – Пионерская, 7 – Золотицкая; 8 – Кепинское поле

мениты из пироксенитов (группы 6, 7) и эклогитоподобных пород (группа 30).

Таким образом, суммируя результаты изучения ИМК из кимберлитовых трубок и вторичных ореолов рассеяния в Зимнебережном районе ААП, можно сделать следующие выводы.

1. Результаты паспортизации изученных объектов на основе выявленных типоморфных особенностей алмазов и ИМК позволяют типизировать основные россыпные ореолы в ААП.

2. На основе морфогенетических исследований среди ореолов можно выделить три основных типа: ближнего сноса, дальнего сноса, смешанного типа.

3. Формирование ореолов происходило в разных палеогеографических обстановках: в условиях континентального сноса около месторождения им. М.В.Ломоносова, в бассейновой фации в отложениях урзугской свиты, в условиях зрелых кор выветривания в отложениях визейского возраста.

4. По данным изучения ореолов дальнего сноса и смешанного типа в отложениях визейского возраста можно предсказать открытие новых неизвестных коренных источников на севере Зимнебережного района ААП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия)* / О.А.Богатиков, В.К.Гаранин, В.А.Кононова и др. – М.: Изд-во МГУ, 1999.
2. *Атлас: Морфогенез алмаза и минералов-спутников в кимберлитах и родственных породах Архангельской кимберлитовой провинции* / Г.П.Кудрявцева, Т.В.Посухова, В.В.Вержак и др. – М.: Полярный круг, 2005.
3. *Афанасьев В.П.* О механическом износе кимберлитовых минералов в шлихах // Советская геология. 1986. № 10. С. 81–87.
4. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н.* Минералогические поиски месторождений алмазов: развитие, состояние, перспективы // Геология алмазов: прошлое, настоящее, будущее». Воронеж, 2005. С. 1291–1317.
5. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.* Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск: Филиал «Кео» Издательства СО РАН, Издательский дом «Манускрипт», 2001.
6. *Богатых М.М., Посухова Т.В.* Морфологические особенности минералов-спутников алмаза из кимберлитовой трубки Мир // Мат-лы XI конференции молодых ученых МГУ. Геохимия и полезные ископаемые. М., 1987. Деп. N 2780–В87. С. 4–12.

7. Веричев Е.М. Геологические условия образования и разведка месторождения алмазов им. В.Гриба: Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. М.: Геол. ф-т МГУ, 2002.
8. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфунин А.С., Михайличенко О.А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. – М.: Изд-во МГУ, 1991.
9. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Сошкина Л.Т. Комплексное изучение минералов-спутников алмаза // Советская геология. 1984. № 11. С. 96–108.
10. Кудрявцева Г.П., Черенкова А.Ф., Посухова Т.В. Кристалломорфология ильменита, гранатов и хромшпинелидов из кимберлитов юго-западного Прианбарья // Зап. ВМО. 1988. Т. 117. № 2. С. 181–189.
11. Кузнецов Г.А., Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В. Морфометрическое и спектроскопическое изучение минералов-спутников алмаза из четвертичных отложений Южной Белоруссии // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 1991. № 3. С. 22–31.
12. Морфологические особенности минералов-спутников алмаза из кимберлитов Якутии и их поисковое значение / Г.И.Бочарова, В.К.Гаранин, Г.П.Кудрявцева и др. // Мат-лы VIII конф. молодых ученых «Геохимия и полезные ископаемые». М., 1981. Деп. N 92–82. С. 14–19.
13. Посухова Т.В. Методика изучения и выявления морфогенетических типов важнейших минералов-спутников алмаза на территории Зимнебережного района Архангельской алмазоносной субпровинции // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях, научное и методико-технологическое обеспечение их решений. Воронеж, 2008. С. 208–211.
14. Посухова Т.В., Бочарова Г.И., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Т. Особенности морфологии и внутреннего строения ильменита из кимберлитов Мало-Ботубинского района Якутии // Вестн. МГУ. Сер. Геология. 1984. № 6. С. 52–66.
15. Посухова Т.В., Сошкина Л.Т. Этапы морфогенеза и изменение состава ильменита в процессе формирования кимберлитовых тел (на примере трубки им. XXIII съезда КПСС) // Мат-лы X конф. молодых ученых «Геохимия и полезные ископаемые». МГУ, 1980. Деп. № 6796–83. С. 42–54.
16. Посухова Т.В., Третьяченко В.В., Гаранин В.К. Морфогенетические типы минералов-спутников алмаза в коренных и россыпных месторождениях севера Восточно-Европейской платформы и её обрамления // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях, научное и методико-технологическое обеспечение их решений. Воронеж, 2008. С. 201–207.
17. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1974.
18. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Анализ микроструктуры горных пород по РЭМ-изображениям // Прогнозно-поисковые технологии и методики в алмазной геологии. Мирный, 2004. С. 621–623.
19. Харьков А.Д. Типизация коренных источников и шлиховых ореолов индикаторных минералов кимберлитов Восточно-Европейской платформы // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 1. С. 46–56.
20. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. – М.: Недра, 1995.
21. Щербакова Т.Е. Минералогическая модель зимнебережного кимберлитового поля и её поисковое значение // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50). СПб., 2004. С. 390–394.
22. Щербакова Т.Е. Типоморфные характеристики минералов кимберлитов в ореолах рассеяния и их использование при поисках месторождений алмазов Зимнего берега: Автореф. дисс...канд. геол.-минер. наук. – М.: ЦНИГРИ, 2005.
23. Haggerty S.E. Oxide mineralogy of the Upper Mantle // Oxide minerals: petrologic and magnetic significance. Reviews in mineralogy. USA. Michigan. 1991. Vol. 25. P. 355–416.

QUANTITATIVE MORPHOGENETIC ANALYSIS AND EVALUATION OF DIAMOND CONTENT FOR PROSPECTING AREAS OF THE EASTERN WHITE SEA

T.V.Posukhova¹, V.K.Garanin² (¹MSU, ²Fersman Mineralogical Museum)

Stages of kimberlite indicator minerals' quantitative morphogenetic analysis and examples of this method's use to certify the bodies already discovered and typify prospecting haloes are presented. Discovery of new bodies within the eastern White sea is forecasted.

Keywords: kimberlites, diamonds, prospecting haloes, heavy concentrate analysis.

