

Состав гранатов из кимберлитов Архангельской области как один из признаков алмазоносности

Показана эффективность применения различных существующих методов определения потенциальной алмазоносности кимберлитовых трубок по составам гранатов на примере высокоалмазоносных кимберлитовых трубок им. В. Гриба и Архангельская и слабоалмазоносной кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская, расположенных в Архангельской алмазоносной провинции. Выявлены причины слабой алмазоносности трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Результаты работы позволили определить комплекс обязательных методов при изучении зёрен гранатов, извлечённых из шлиховых проб и магматических тел с целью оценки потенциальной промышленной алмазоносности объектов, выявленных в ходе поисков для планирования последующих поисково-оценочных работ на территории Архангельской области.

Ключевые слова: разведка алмазов, пироп, литосферная мантия, Архангельская алмазоносная провинция, мантийный метасоматоз, алмаз, геохимия.

АГАШЕВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник¹, helenashchukina@gmail.com, shchukinalena@igm.nsc.ru

АГАШЕВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник¹

ГУДИМОВА АЛЁНА ИВАНОВНА, инженер¹

МАЛЫГИНА ЕЛЕНА ВЕНИАМИНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник¹

ЧЕРВЯКОВСКИЙ ВАСИЛИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ, заведующий группой пробоподготовки²

ПРУСАКОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией³, prusakova@tsnigri.ru

ЩУКИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог⁴

ГОЛУБЕВ ЮРИЙ КОНКОРДЬЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом³, diamond@tsnigri.ru

ПОХИЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель¹, главный научный сотрудник, академик РАН

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

⁴ ООО «Арктикгеопоиск», г. Архангельск

Garnet composition from kimberlites of the Arkhangelsk region as a proxy for diamond prospectivity

E. V. AGASHEVA¹, A. M. AGASHEV¹, A. I. GUDIMOVA¹, E. V. MALYGINA¹, V. S. CHERVYAKOVSKY², N. A. PRUSAKOVA³, V. S. SHCHUKIN⁴, Yu. K. GOLUBEV³, N. P. POKHILENKO¹

¹ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

² A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

³ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

⁴ LLC «Arktikgeopoisk», Arkhangelsk

We showed the effectiveness of the various existing methods applied for the determination of the diamond prospectivity of kimberlite pipes based on the composition of garnets on the examples of high-grade diamond-bearing kimberlite pipes V. Grib and Arkhangelsk and low-grade kimberlite pipe TsNIGRI-Arkhangelsk, located in the Arkhangelsk diamondiferous province. The reasons for the low diamond grade of the TsNIGRI-Arkhangelskaya pipe are revealed. The results of this work allowed us to determine the analytical procedure for studying the garnet grains extracted from panned samples and magmatic bodies in order to assess the potential diamond grade of prospected areas in order to plan subsequent exploration and appraisal work in the Arkhangelsk region.

Key words: diamond exploration, pyrope, lithospheric mantle, Arkhangelsk diamondiferous province, mantle metasomatism, diamond, geochemistry.

Определяющим фактором степени алмазоносности кимберлитовых трубок является состав литосферной мантии, вещество которой присутствует в кимберлите в виде ксенолитов мантийных пород и их фрагментов. Изучение мантийных ксенолитов и ксенокристов, извлечённых из кимберлита, позволяет определить основные характеристики литосферной мантии, такие как: 1) соотношение типов пород, участвующих в её строении; 2) температурный режим; 3) глубину нижней границы и мощность «алмазного окна»; 4) типы и последовательность метасоматических преобразований мантийных пород и оценку влияния этих процессов на возможность образования и сохранения алмазов в породах литосферной мантии до этапа кимберлитового магматизма. Получение этих данных по мантийным образцам из кимберлитовых трубок с разной степенью алмазоносности позволяет, с одной стороны, определять эталонные характеристики высокоалмазоносной литосферной мантии, а с другой стороны, выявлять причины её слабой (не) алмазоносности. Эта информация впоследствии может использоваться при интерпретации составов минералов тяжёлой фракции из проб осадочных пород, полученных при геологоразведочных работах на алмазы на стадии выделения перспективных с точки зрения обнаружения коренных источников алмазов площадей. Изучение проб осадочных пород включает в себя

несколько этапов: 1) идентификация минералов-индикаторов кимберлита в пробах; 2) изучение особенностей морфологии зёрен; 3) выявление доли тех минералов-индикаторов, составы которых соответствуют минералам «алмазной ассоциации». Совокупность полученной информации позволяет делать выводы о возможном присутствии в пределах изучаемой территории коренных источников алмазов кимберлитового типа и их потенциальной алмазоносности. Гранат пиропового состава, вероятно, является самым информативным из всех минералов-индикаторов кимберлита, разносторонняя интерпретация состава которого позволяет получать комплексную характеристику литосферной мантии и делать выводы о перспективах потенциальной алмазоносности площади или объекта. В настоящей работе мы приводим первые данные по составам гранатов из слабоалмазоносной кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская, а также методом сравнения с опубликованными ранее данными по составу пиропов из высокоалмазоносных трубок Архангельская и им. В. Гриба показываем эффективность применения различных существующих методов определения потенциальной алмазоносности объектов Архангельской алмазоносной провинции. Результатом настоящей работы является выявление обязательных методов изучения гранатов, которые могут быть использованы при поисково-оценочных работах на алмазы в регионе.

Общая информация об образцах исследования и кимберлитовых объектах. В настоящей работе приведены данные по концентрациям главных элементов и Ni в 450 зёрнах гранатов, отобранных из концентрата минералов тяжёлой фракции кимберлита трубки ЦНИГРИ-Архангельская; для 165 зёрен определены концентрации редких элементов. Также мы приводим данные по содержанию главных элементов и Ni в 1100 зёрнах гранатов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба. Для сравнения используются обработанные авторами настоящей статьи исходные аналитические данные по концентрациям главных (311 зёрен) и редких элементов (58 зёрен) в гранатах из кимберлитовой трубки Архангельская, опубликованные в работе [43], и данные по содержанию главных и редких элементов в 150 зёрнах гранатов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба, представленные в работе [54]. Необходимо отметить, что к настоящему времени опубликован разнообразный материал по составу мантийных пород из кимберлитовых объектов Архангельской алмазоносной провинции (ААП), большая часть которого посвящена изучению образцов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба [9, 21, 26, 51, 52]. В некоторых работах приводятся результаты комплексных исследований минералов-индикаторов кимберлита из нескольких магматических объектов ААП, но, к сожалению, исходные аналитические данные авторами или не предоставляются [15, 22, 35, 49], или ограничиваются информацией о концентрациях главных элементов [16], что делает невозможным их полноценное использование в рамках настоящей работы.

Слабоалмазоносная (0,056 кар/т, [6]) кимберлитовая трубка ЦНИГРИ-Архангельская расположена в пределах Кепинской площади ААП. Валовый состав кимберлитов трубки ЦНИГРИ-Архангельская соответствует кимберлитам умеренно-, высокотитанистой серии ААП [6, 7] и близок к кимберлитам I группы Южной Африки [56]. Кимберлитовая трубка Архангельская расположена в пределах Золотицкого кимберлитового поля и является одной из шести трубок месторождения им. М. В. Ломоносова с содержаниями алмазов 0,5–1,6 кар/т [55]. По валовому составу кимберлиты трубки Архангельская относятся к низкотитанистым кимберлитам Al-Mg серии ААП, а по изотопному составу близки к кимберлитам II группы Южной Африки [4, 10]. Кимберлитовая трубка им. В. Гриба расположена в пределах Верхотинского поля и является крупнейшим месторождением алмазов ААП. Для трубки установлены значительные вариации содержания алмазов: от 0,3 кар/т в кратерной части до 0,93–1,27 кар/т в диатремовой части. В целом по месторождению в размерном классе +1 мм содержания алмазов составляют 0,76 кар/т

[19]. По изотопному составу эти кимберлиты близки кимберлитам I группы Южной Африки; валовый состав свидетельствует об их принадлежности к кимберлитам среднетитанистой серии ААП [10].

Аналитические методы исследования. Концентрации главных элементов в гранатах определялись с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8100 в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 50 нА с размером пучка 1 мкм. Время подсчёта составляло 20 с для пиков сигнала и 10 с для фона; был применён метод коррекции ZAF. Пределы обнаружения составляли < 0,05 мас.% для всех анализируемых элементов, в том числе 0,01 мас.% для Cr и Mn, 0,02 мас.% для Ti и Na и 0,05 мас.% для K. Для определения концентраций Ni было использовано ускоряющее напряжение 25 кВ и ток 300 нА, для пиков сигнала и фона время подсчёта составляло 400 с. Подробная информация о методике представлена в работах [11, 12]. Концентрации редких элементов в гранатах определялись с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NexION 300S (Perkin Elmer) (ICP-MS), оборудованного системой лазерной абляции NWR 213 (ESI) в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» УрО РАН (г. Екатеринбург). Лазерная абляция проводилась при частоте следования импульсов 10 Гц, плотности энергии 10–11 Дж/см² и диаметром пучка 50 мкм. Результаты обрабатывались с использованием программы GLITTER V4.4 для получения окончательных данных. Контрольные измерения NIST SRM 610 и NIST SRM 612 использовались в качестве внешнего стандарта. Два анализа стандарта NIST SRM 612 проводились до и после 10 определений. Концентрации Ca, определённые методом электронно-зондового анализа, использовались в качестве внутреннего стандарта. Соответствие данных по концентрациям Ni в гранатах, определённых методами EMPA и ICP-MS находится в пределах 90–100 %.

Методы определения критериев алмазоносности на основании составов мантийных гранатов.

1. Концентрации главных элементов в гранатах.

1.1. Содержания CaO и Cr₂O₃ в пиропсах. Использование данных по концентрациям CaO и Cr₂O₃ в гранатах позволяет определить соотношение типов пород, участвующих в строении литосферной мантии, и выявить количество зёрен, по составу соответствующих полю «алмазной ассоциации» [38, 58]. Полю «алмазной ассоциации» традиционно считается область составов низкокальциевых высокохромистых пиропов дунит-гарцбургитового парагенезиса [58], обозначаемых также группой «G10D» [38]. Этот тип пиропов указывает на наличие деплетированных и минимально (не) затронутых процессами мантийного

метасоматоза пород в строении литосферной мантии, которые до момента захвата их кимберлитом могли находиться в условиях, благоприятных для образования и сохранения алмазов [59]. Ранние работы по изучению включений в алмазах [40, 58] показали, что именно низкокальциевые высокохромистые пиропы являются наиболее распространённым типом гранатов перидотитового парагенезиса, обнаруженных в виде включений в алмазах (до 85 % [40]). Тем не менее количество «G10D» пиропов не всегда коррелирует с алмазоносностью кимберлитов: например, высокоалмазоносные трубки Премьер, Орапа, Джваненг, Де Бирс, Буффало Хилс, Слоан содержат мало или вовсе не содержат «G10D» пиропов [36, 59]. К настоящему времени не существует конкретного значения, определяющего какое процентное количество пиропов «G10D» может указывать на высокую или низкую алмазоносность объекта. В высокоалмазоносных трубках мира количество пиропов «G10D» различно: до 15 % в трубках кратона Каапвааль [39], от 2 до 13 % в трубках района Лунды в Анголе [65], от 1,5 до 17 % в трубках Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) [3]. На рис. 1 показано соотношение различных парагенезисов пиропов из высокоалмазоносных кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба и убогоалмазоносной трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Наибольшее количество пиропов «G10D» зафиксировано для кимберлитовой трубки им. В. Гриба (4 %), что сопоставимо с полученными ранее данными по этому объекту (6 % [54], 4,9 % [5]). Для кимберлитовых трубок Архангельская и ЦНИГРИ-Архангельская доля пиропов «G10D» составляет < 2 % и < 1 % соответственно. Полученные значения указывают на то, что, во-первых, данные по количеству пиропов «G10D» из объектов ААП не могут быть определённо решающим критерием для оценки их потенциальной алмазоносности ввиду того, что в высокоалмазоносных кимберлитовых трубках ААП количество пиропов «G10D» может быть незначительно, и, во-вторых, наличие даже минимального количества пиропов «G10D» не исключает алмазоносность объекта.

1.2. Содержания NaO и TiO₂ в гранатах эклогитового парагенезиса. Данные по концентрациям Na₂O и TiO₂ в гранатах эклогитового парагенезиса используются для определения количества зёрен, которые могут генетически относиться к алмазодержащим эклогитам. Выделение этой группы гранатов особенно актуально при условии, что алмазоносность опробуемой кимберлитом литосферной мантии связана преимущественно с эклогитами, имеющими субдукционный генезис, как например, для трубок Орапа, Джериго, Джваненг и Робертс Виктор [30]. Гранаты эклогитового парагенезиса, обнаруженные в виде включений

в алмазах, как правило, содержат Na₂O > 0,07 мас.% (рис. 2, [57]). Концентрации Na₂O и TiO₂ в эклогитовых гранатах из изученных кимберлитовых трубок ААП (см. рис. 2) указывают на то, что > 70 % эклогитовых гранатов из трубки им. В. Гриба могут быть связаны с алмазоносными породами; эта принадлежность исключается для гранатов из трубки Архангельская и неочевидна для таковых из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, конечно, учитывая при этом неравное количество гранатов эклогитовой ассоциации из трёх трубок (см. рис. 2). Результаты изучения включений в алмазах из кимберлитов ААП [18] показали, что 85 % включений соответствуют перидотитовому парагенезису, и только 15 % – эклогитовому. Это, в свою очередь, может свидетельствовать о том, что алмазоносность литосферной мантии ААП связана преимущественно с перидотитами при подчинённом значении эклогитов. Тем не менее результаты изучения алмазов из кимберлитовых трубок Архангельская, Поморская и Карпинского-1 месторождения им. М. В. Ломоносова [20] предполагают преимущественно их эклогитовый парагенезис. Отсутствие представительного количества опубликованных данных по составам гранатов эклогитовой ассоциации из магматических объектов ААП, в том числе для включений в алмазах, затрудняет использование граната этого типа в качестве информативного показателя алмазоносности. Поэтому данные по содержанию Na₂O и TiO₂ в эклогитовых гранатах могут быть использованы только как второстепенный условный критерий при составлении прогноза потенциальной алмазоносности площади или объекта на территории ААП. Этот метод можно рассматривать как первостепенный только при условии, что в изучаемых объектах гранаты эклогитовой ассоциации систематически и существенно преобладают над перидотитовыми. Но результаты исследования гранатов как из кимберлитовых объектов ААП [22, 43], так и из шлиховых проб Архангельской области [50, 53] показали, что гранаты перидотитовой ассоциации всегда доминируют.

1.3. Количество пиропов мегакристиной ассоциации. Низкохромистые (Cr₂O₃ < 4 мас.% [38]) высокотитанистые (TiO₂ > 0,7 мас.%) пиропы мегакристиной ассоциации типичны для всех кимберлитов мира [1] и также рассматриваются как информативный минерал-индикатор кимберлита при поисково-разведочных работах на алмазы [46]. Генезис этого типа гранатов является дискуссионным: кристаллизация непосредственно из кимберлитовой магмы или из астеносферной магмы, близкой по содержаниям элементов-примесей к базальтам океанических островов типа HIMU или пикритами, при высоких *PT*-параметрах в нижних горизонтах литосферной мантии [1].

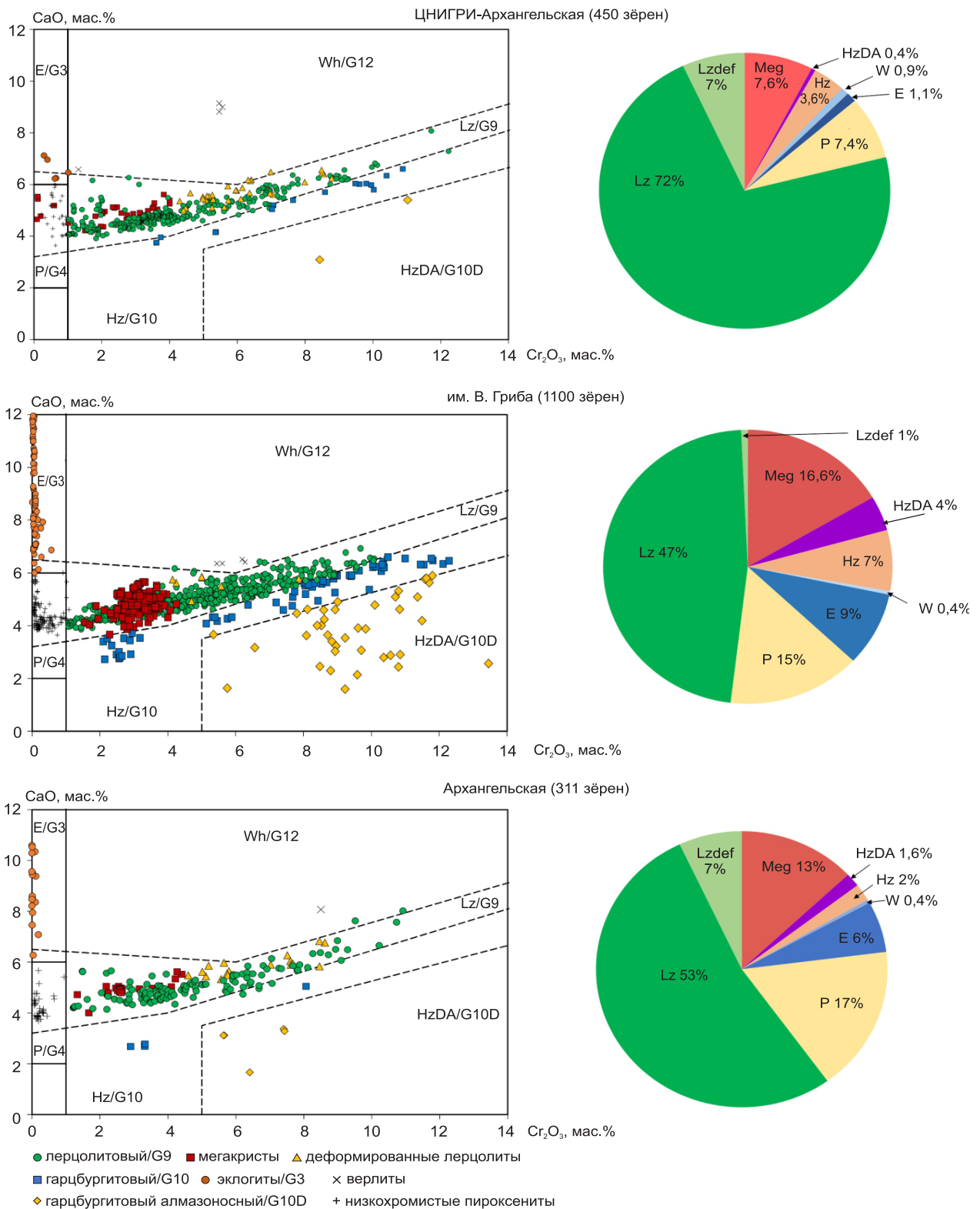


Рис. 1. Распределение CaO/Cr₂O₃ в гранатах из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Диаграмма [58] с полями для эклогитов и низкохромистых пироксенитов из [38]:

парагенезисы гранатов: Lz – лерцолитовый (G9), Lzdef – деформированные лерцолиты, Meg – мегакристы, HzDA – гарцбургитовый алмазносный (G10D), Hz – гарцбургитовый, W – верлитовый, E – эклогитовый, P – низкохромистый пироксенитовый

Тем не менее установлено, что образование мегакристов гранатов происходит при более высоких параметрах T относительно гранатов из зернистых перидотитов и может быть генетически и пространственно связано с деформированными лерцолитами и эволюцией состава протокимберлитовой магмы [1]. Высокие концентрации Y и Zr в гранатах мегакристной ассоциации и их приуроченность к глубинным частям литосферной мантии свидетельствуют о мощной проработке этих участков высокотемпературными силикатными расплавами [37, 54], абсолютно губительно влияющими на сохранность алмазов в период предкимберлитового (кимберлитового) событий. В работе [24] показано, что количество гранатов мегакристной ассоциации отрицательно коррелирует с алмазоносностью кимберлитовых трубок Мирнинского поля ЯАП, что позволяет использовать эти данные как дополнительный критерий определения потенциальной алмазоносности объектов. Тем не менее, как отмечено в работе [24], крупные по размеру кимберлитовые объекты, такие как трубка Мир, могут выпадать из общего тренда ввиду того, что они были сформированы несколькими порциями кимберлитовой магмы, которые в свою очередь могли опробовать разные по алмазоносности и степени метасоматической проработки участки литосферной мантии. Метасоматически обогащённые мантийные породы могут содержать в десять раз больше зёрен гранатов на единицу объёма породы по сравнению с деплетированными. Это приводит к тому, что процентное соотношение гранатов различных парагенезисов может не отражать реального соотношения типов пород литосферной мантии, что и наблюдается в высокоалмазоносной трубке Мир, где содержания гранатов алмазной ассоциации составляют только 4 %, а доля мегакристных гранатов достигает 10 % [2, 24].

Для высокоалмазоносных кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба ААП установлен высокий процент мегакристов гранатов – 13 и 16,6 % соответственно; это выше, чем для слабоалмазоносной трубки Амакинская ЯАП. В слабоалмазоносной трубке ЦНИГРИ-Архангельская количество гранатов мегакристной ассоциации составляет 7,6 %, сопоставимое с таковыми для среднеалмазоносной трубки Дачная ЯАП [24]. Таким образом, в настоящее время нельзя чётко резюмировать о результативности применения данного метода при оценке потенциальной алмазоносности объектов ААП. Более того, положительная корреляция между процентным содержанием мегакристов гранатов и алмазоносностью изученных кимберлитов ААП не может быть воспринята как истинная из-за того, что итоговое количество гранатов мегакристной ассоциации для объекта будет напря-

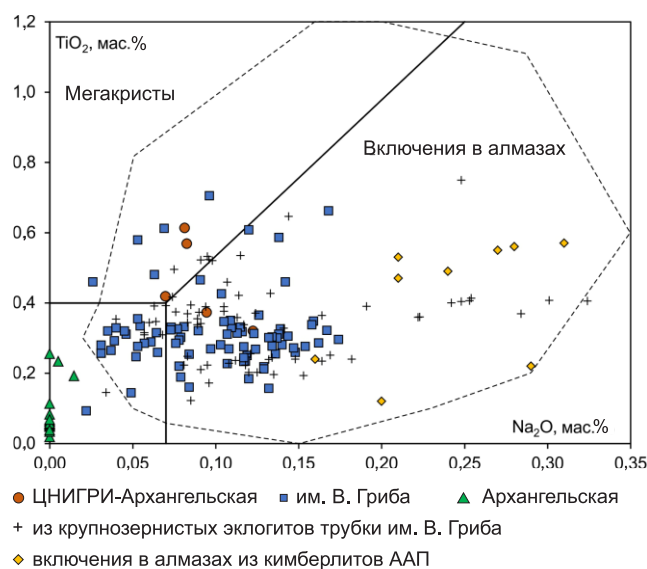


Рис. 2. Распределение TiO_2/Na_2O в гранатах эклогитовой ассоциации из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Пунктирная линия – область составов гранатов эклогитового парагенезиса из включений в алмазах мира [30]. Крупнозернистые эклогиты из трубки им. В. Гриба [51]. Включения в алмазах эклогитовой ассоциации из кимберлитов ААП [18]

мую зависеть от выборки зёрен, а именно, от исходного соотношения гранатов различных цветовых групп. Данные по гранатам из кимберлитовой трубки им. В. Гриба [8] показали, что мегакристная ассоциация присутствует только в группах гранатов красного (50 % от общего количества зёрен этого цвета) и красно-оранжевого (39 %) цветов, и отсутствует среди гранатов фиолетового цвета. В любом случае, присутствие значительного количества гранатов мегакристной ассоциации не исключает алмазоносность кимберлитовых объектов ААП.

2. Определение параметров температуры и давления для гранатов. Определение параметров температуры (T) и давления (P) для индивидуальных зёрен минералов-индикаторов кимберлита является неотъемлемой методикой при интерпретации потенциальной алмазоносности площади или объекта. Эти данные позволяют получить информацию о тепловом режиме литосферной мантии, глубине её нижней границы и мощности «алмазного окна». Хромдиопсид является наиболее информативным в этом плане минералом-индикатором кимберлита, так как существующие термобарометрические методики позволяют определить одновременно параметры P и T [45]. Тем не менее критерии этого термобарометра [64] существенно ограничивают количество используемых

зёрен для получения корректных значений. Например, из 800 зёрен ксенокристов хромдиопсида из кимберлита трубки им. В. Гриба составы только 55 зёрен пригодны для использования P - T расчёта [8]. Для расчёта параметра T для гранатов используются данные по содержанию Ni, концентрации которого в гранатах зависят от температуры его равновесия с сосуществующим оливином [28, 48]. Параметр P для гранатов может быть получен путём проецирования полученных значений T на известную геотерму для литосферной мантии в районе площади или объекта. Если тепловой поток литосферной мантии неизвестен, то для определения P могут быть использованы барометры, расчёт которых основан на использовании данных по концентрациям Cr в гранате при условии его равновесия с хроми-том [28, 39]. Гистограммы распределения параметра T_{Ni} для гранатов перидотитовой ассоциации из трубок им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская показаны на рис. 3. Данные для гранатов из трубки Архангельская не показаны из-за критически малого количества ана-

лизов по Ni (50 определений), представленных в работе [43], которые графически несопоставимы с данными для трубок им. В. Гриба (720 анализов) и ЦНИГРИ-Архангельская (400 анализов). Большинство гранатов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов из трубки им. В. Гриба (72 %) соответствует диапазону температур от 850–900 до 1100 °C (интервалу, традиционно считающемуся полем температур, при которых стабилен алмаз [31]), а из трубки ЦНИГРИ-Архангельская – интервалам температур 1100–1200 °C (68 %) и 1200–1300 °C (30 %). Практически все (94 %) гранаты ассоциаций деформированных перидотитов и мегакристов из трубки им. В. Гриба характеризуются параметром T от 1000 до 1200 °C, из трубки ЦНИГРИ-Архангельская – 1100–1300 °C (89 %), в последнем случае полностью соответствуя интервалу T для гранатов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов. Мощность теплового потока литосферной мантии в районе трубок Архангельская и им. В. Гриба определена как 35–37 мВ/м² [8, 21, 43], зона перехода графит–алмаз предполагается при параметре $T \sim 900$ °C, что соответствует глубине от 130 км; нижняя граница литосферной мантии может находиться в интервале 210–240 км; мощность «алмазного окна» – от 70 до 110 км (рис. 4). Проецирование значений T для гранатов из трубки им. В. Гриба на геотерму 37 мВ/м² показывает, что 100 % гранатов «алмазной ассоциации» «G10D», 95 % гранатов неалмазносной гарцбургитовой ассоциации «G10» и 90 % гранатов лерцолитового парагенезиса соответствуют полю стабильности алмаза и интервалу глубин 150–210 км. Гранаты лерцолитовой и гарцбургитовой ассоциаций, имеющие значения T_{Ni} в диапазоне 900–1100 °C, составляют ~ 30–40 % для трубки Архангельская, ~ 50 % для трубки Ломоносова и ~ 70 % для трубки Пионерская [43]. Гранаты абсолютно всех парагенезисов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская характеризуются постоянными повышенными концентрациями Ni относительно гранатов из трубок месторождений им. В. Гриба и им. М. В. Ломоносова. Только 1,5 % гранатов лерцолитовой и гарцбургитовой ассоциаций из трубки ЦНИГРИ-Архангельская характеризуются значениями T в интервале 900–1100 °C, и для 98,5 % зёрен параметры T варьируют от 1100 до 1300 °C. Такие же высокие значения T_{Ni} отмечены для некоторых трубок Пачугской группы Кепинского поля ААП [35, 43, 49]. Так как тепловой режим литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская неизвестен, для определения значений P для гранатов был использован барометр [39]. Результаты расчёта (рис. 5) показали, что только 4 зерна гранатов имеют параметры P - T , соответствующие кратонным геотермам; мощность теплового потока

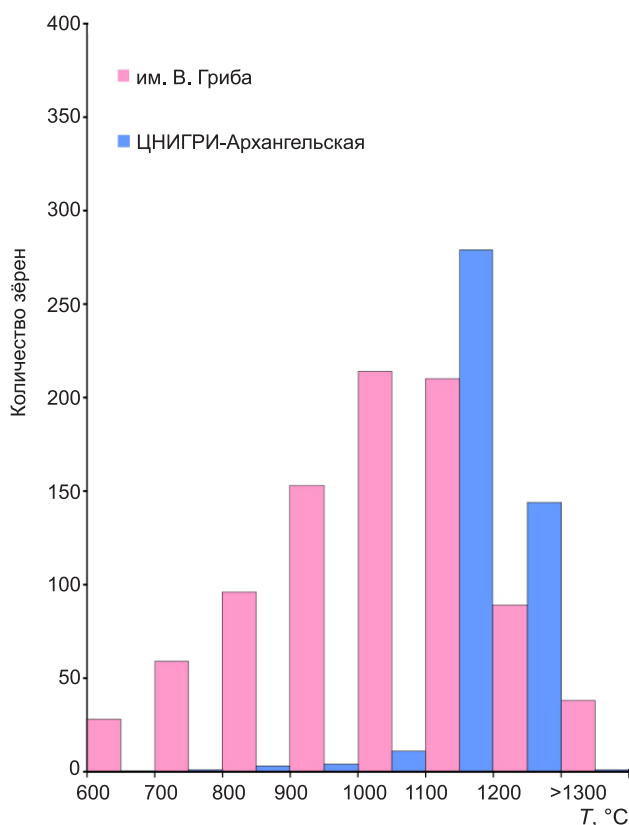


Рис. 3. Гистограммы распределения T_{Ni} [45] для гранатов перидотитовой ассоциации из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская и им. В. Гриба.

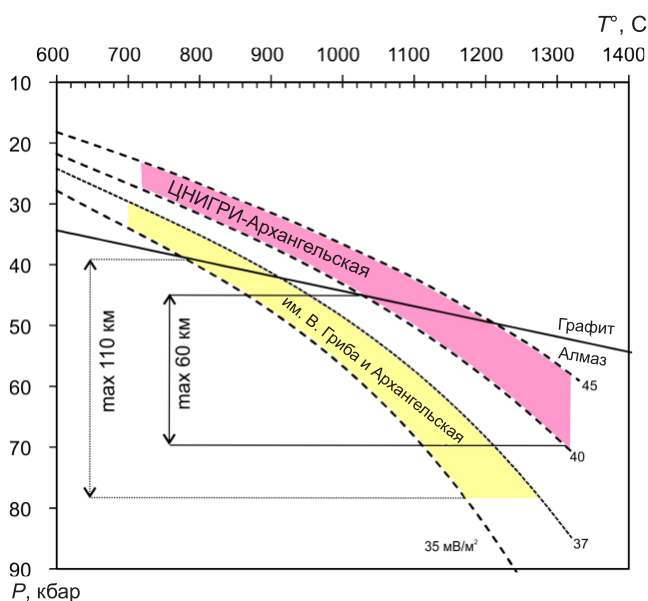


Рис. 4. Предполагаемые зоны опробования участков литосферной мантии в районе кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская на основании проецирования значений T_{Ni} [28] на геотермы 35–37 мВ/м² для трубок им. В. Гриба и Архангельская и 40–45 мВ/м² для трубки ЦНИГРИ-Архангельская:

max – максимально возможные значения для мощности «алмазного окна»

может быть от 40 до 45 мВ/м². Ввиду того, что значения P , полученные методом [39], должны рассматриваться с крайней осторожностью (пример P - T расчётов для гранатов из трубки им. В. Гриба, см. рис. 5), для определения возможной мощности теплового потока литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская может быть использован следующий подход. Если тепловой режим литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская идентичен таковому в районе трубок месторождений им. В. Гриба и им. М. В. Ломоносова, то проецирование на геотерму 37 мВ/м² значений T_{Ni} для гранатов перидотитовой ассоциации указывает на то, что абсолютно все изученные гранаты соответствуют участку литосферной мантии от 150 до 210 км, то есть полю стабильности алмаза. Так как оливин содержит слабо-варьирующие концентрации Ni [28, 48], повышение содержания Ni в сосуществующих гранатах и как следствие увеличение параметров T их равновесия должны быть каким-то образом объяснены. Влияние высокотемпературных мантийных расплавов на породы нижней части литосферной мантии может рассматриваться в этом случае как наиболее вероятное событие, особенно учитывая тот факт, что значения

T_{Ni} для гранатов мегакристов идентичны таковым для ассоциации перидотитов. При этом положительные корреляции между содержанием Ni и показателями мантийного метасоматоза на уровне главных элементов, такие как TiO₂, FeO, или отрицательная корреляция в распределении Ni/mg#, могут ожидать. Однако подобных корреляций не наблюдается: абсолютно все гранаты всех ассоциации при разных составах содержат повышенные концентрации Ni. Таким образом, при проецировании значений T_{Ni} на геотерму 37 мВ/м² ожидается, что все гранаты трубки ЦНИГРИ-Архангельская представляют исключительно шестидесятикилометровый интервал потенциально алмазонасной литосферной мантии, породы которой, предположительно, не испытали воздействия высокотемпературного мантийного метасоматоза. В таком случае эти выводы абсолютно не согласуются с фактом низкого содержания алмазов в этой трубке и характеризуются отсутствием объяснения высоких концентраций Ni в гранатах. Более того, достаточно представительное количество изученных гранатов из трубки теоретически предполагает опробование более широкого интервала литосферной мантии. Учитывая более высокие значения T_{Ni} для гранатов всех ассоциаций, максимальные полученные значения P , предполагаемый представительный опробованный участок литосферной мантии, низкую алмазонасность трубки и отсутствие свидетельств на уровне главных элементов обширного влияния мантийного метасоматоза, мы предполагаем более высокий температурный режим опробованной литосферной мантии от 40 до 45 мВ/м². В этом случае зона перехода графит-алмаз предполагается при параметре $T \sim 1050$ – 1200 °C, что соответствует глубине от 140–147 км, а максимальная глубина нижней границы литосферной мантии может находиться в интервале 170–200 км (см. рис. 4). В этом случае изученные гранаты перидотитовой ассоциации могут представлять интервал литосферной мантии от 60–80 до 170–200 км; мощность «алмазного окна» может варьировать от минимальной 22 до максимальной 60 км.

Результаты использования методик определения P - T параметров для гранатов из кимберлитов ААП показали, что значения T_{Ni} и определение процентов гранатов, имеющих параметры T от 900 до 1100 °C, даже без учёта получения данных по P , согласуются с фактической алмазонасностью кимберлитовых трубок. При этом высокие значения T_{Ni} от 1100 до 1200 °C для большинства гранатов из кимберлитового объекта полностью не исключают алмазонасность трубки, но могут быть свидетельством её низкой алмазонасности. В любом случае подтверждение алмазонасности объекта ААП, даже с учётом

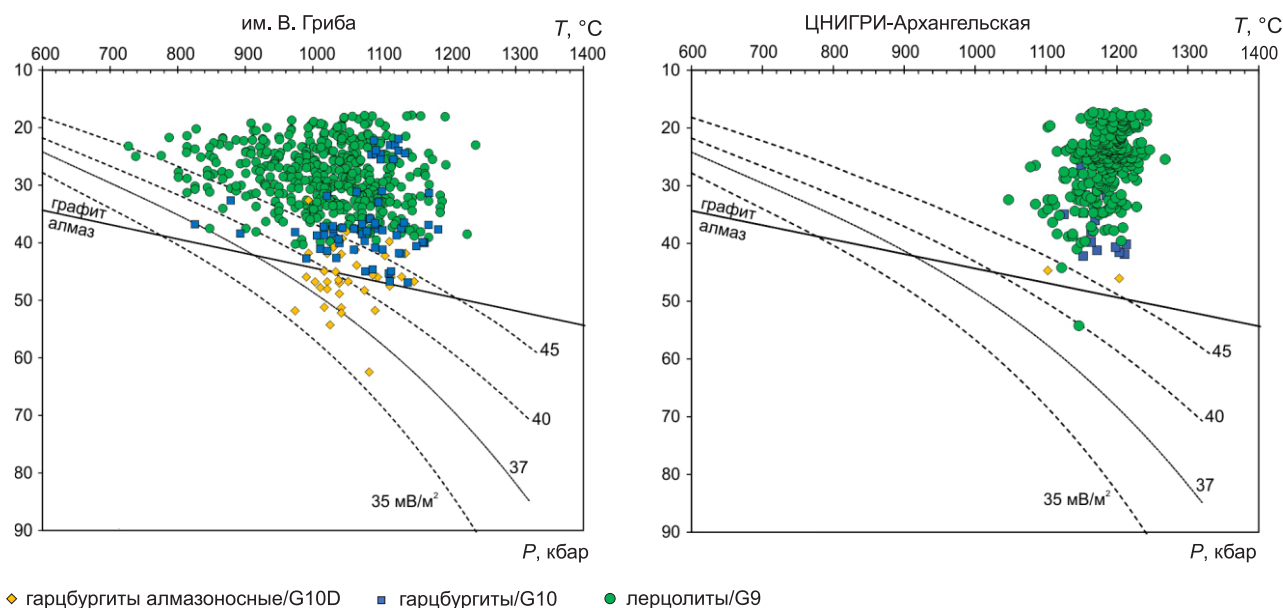


Рис. 5. Результаты расчёта P - T параметров [39] для пиропов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов для кимберлитовых трубок им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская. Полученные значения указывают на неравновесие пиропов с хромитами для большинства зёрен. Мощности теплового потока [41]

высокого процента гранатов, имеющих параметры T_{Ni} , соответствующие условиям стабильности алмаза, не может быть окончательным без интерпретации данных по концентрациям редких элементов.

3. Концентрации Y, Zr и Ti в гранатах. Данные по концентрациям Y, Zr и Ti в гранатах рекомендуются использовать для определения степени воздействия мантийного метасоматоза на породы литосферной мантии [36, 37]. Считается, что одновременное повышение концентраций Y, Zr и Ti в гранатах является свидетельством высокотемпературного «расплавного» метасоматоза [36, 37]. Увеличение концентраций Zr при слабаварирующихся содержаниях Y – признаком низкотемпературного «флогопитового» [36, 37] или «флюидного» [1, 2, 60] метасоматоза. Ранние работы по изучению включений гранатов в алмазах показали, что эти гранаты преимущественно содержат очень низкие концентрации Y, Zr и Ti [37], соответствующая полю деплетированных пород, не затронутых процессами мантийного метасоматоза. Как правило, составы гранатов ассоциаций мегакристов и деформированных лерцолитов, образование которых происходит в нижних частях литосферной мантии незадолго до этапа кимберлитового магматизма, почти всегда соответствуют тренду высокотемпературного расплавного метасоматоза; эти гранаты также содержат более высокие концентрации Ni [1, 23, 54]. Данный тип метасоматоза

губительно влияет на сохранность алмазов в литосферной мантии, поэтому увеличение его степени воздействия должно отрицательно коррелировать с алмазоносностью [24]. Влияние «флогопитового» метасоматоза идентифицируется в ксенолитах флогопитсодержащих перидотитов, гранаты которых приобретают зональное строение: составы центральных частей гранатов соответствуют гарцбургитовым «G10», а краевые части обогащены CaO, Zr, Y и Ti и соответствуют лерцолитовым «G9» [36, 37]. Влияние этого типа метасоматоза на сохранность алмазов в литосферной мантии точно не установлено [36], но некоторые исследователи полагают, что он также имеет губительное воздействие на них [17]. Использование данных по концентрациям Y, Zr и Ti в гранатах из проб, отобранных с объектов и территорий ААП при поисково-разведочных работах на алмазы, и определения доли гранатов, соответствующих полю стабильности алмаза и не имеющих признаков воздействия «расплавного» и (или) «флогопитового» («флюидного») метасоматоза, предлагается использовать как первостепенный метод при прогнозе потенциальной алмазоносности объектов и выделении приоритетных площадей в регионе [17]. Это предложение обусловлено выводами о том, что породы литосферной мантии в районе слабо- или неалмазоносных объектов ААП были гораздо сильнее подвержены процессам «расплавного» мантийного метасоматоза,

чем в районе высокоалмазоносных трубок [15, 35]. При этом повышение концентраций Zr в гранатах более 70 ppm явно свидетельствует о воздействии процессов мантийного метасоматоза, разрушающих алмазы [17].

На рис. 6, А–В показано распределение Y/Zr в гранатах из кимберлитовых трубок Архангельская, им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская с обозначенными полями, согласно [36, 37]. Полю гранатов из пород, не подвергшихся мантийному метасоматозу, соответствуют 44 % гранатов из трубки Архангельская, 31 % из трубки им. В. Гриба и 65 % из трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Доля гранатов с концентрацией Zr > 70 ppm составляет 15 % для трубки Архангельская, 0,8 % – для трубки им. В. Гриба и 8 % – из трубки ЦНИГРИ-Архангельская; при этом от 70 до 100 % гранатов этой категории составляют гранаты ассоциаций мегакристов и деформированных перидотитов. Приведённые данные показывают, что методика выделения доли гранатов, не подвергшихся мантийному метасоматозу, на основании концентраций Y, Zr и Ti и диаграммы, предложенной в работах [36, 37], не может быть использована как приоритетная при оценке потенциальной алмазоносности площади или объекта ААП, так как процентное соотношение гранатов такого типа не коррелирует с реальной алмазоносностью кимберлитов ААП. Это связано с тем, что полю «деплементированных» пород, по классификации [36, 37], могут соответствовать гранаты как с чёткими геохимическими признаками метасоматического обогащения [2, 14, 54], так и гранаты из мантийных пород, образование которых однозначно связано с процессами мантийного метасоматоза. Например, 50 % гранатов из деформированных перидотитов трубки Удачная [23] соответствуют полю «деплементированных» пород, по [36, 37]. Критерий по содержанию Zr > 70 ppm в гранатах для их разделения на подвергшиеся мантийному метасоматозу и не испытавшие его, как предложено в работе [17], также не может быть использован при интерпретации потенциальной алмазоносности, так как такие концентрации идентифицируются в крайне низком и непоказательном количестве гранатов от общей выборки, практически все из которых принадлежат ассоциациям мегакристов и деформированных перидотитов, образование которых априори никак не может быть связано с процессами алмазообразования [24]. Мы, безусловно, согласны с тем, что концентрации Y и Zr в гранатах имеют важное значение при интерпретации потенциальной алмазоносности литосферной мантии и являются индикаторами метасоматических процессов, воздействовавших на её породы, но считаем, что правильная интерпретация этих данных и, как

следствие, корректность выводов о потенциальной алмазоносности площади или объекта могут быть выполнены только с учётом данных по содержанию редкоземельных элементов (РЗЭ) в гранатах и в особенности по соотношению концентраций лёгких (Л) и тяжёлых (Т) РЗЭ и характеру их распределения.

4. Концентрации и характер распределения редкоземельных элементов в гранатах. Накопление данных по составам гранатов, представленных в виде включений в алмазах [59, 61], показало, что наряду с низкокальциевыми высокохромистыми пиропами гарцбургитового парагенезиса «G10» пиропы лерцолитовой ассоциации «G9» с содержанием Cr_2O_3 в среднем от 5 до 12 мас.%, реже от 12 до 18 мас.% [61], также являются распространённым типом включений в алмазах. Для некоторых алмазоносных объектов установлено, что категория пиропов «G9» является доминирующей среди гранатов-включений в алмазах, как, например, в кимберлитах Буффало Хиллс, Виктор и Снэп Лэйк в Канаде, трубке № 50 в Китае, и оливиновом лампроите Эллендаль в Австралии [60]. Распределение Y и Zr в пиропе из изученных к настоящему времени включений в алмазах мира [60, 62] показало, что значительная часть (до 20 %) пиропов имеет признаки воздействия высоко- или низкотемпературного мантийного метасоматоза, а в некоторых кимберлитах [60] такие пиропы могут преобладать. Эти данные указывают на то, что процессы алмазообразования в литосферной мантии могут быть связаны не только с сильно-деплементированными породами типа дунит-гарцбургит, но и с менее деплементированными породами лерцолитового типа. Сопоставление данных по концентрациям главных и редких элементов и характеру распределения РЗЭ в пиропе из различных кимберлитовых трубок и шлиховых проб показало наличие закономерности в их составах, интерпретация которых позволила выявлять группы пиропов, образование которых ассоциирует с определёнными процессами в литосферной мантии, связанными в свою очередь с алмазообразованием.

1. Низкокальциевые высокохромистые пиропы гарцбургитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения РЗЭ (Hz) являются типичным типом граната из включений в алмазах [61]. Несмотря на то, что образование таких гранатов до сих пор является дискуссионным, считается, что их обогащение ЛРЗЭ связано с влиянием C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения ЛРЗЭ к ТРЗЭ, состав которого может быть близким к карбонатиту [13, 29, 42, 61, 62]. Доля таких гранатов (рис. 7; здесь и далее по тексту представлен % гранатов от общего количества зёрен перидотитового парагенезиса и ассоциации мегакристов,

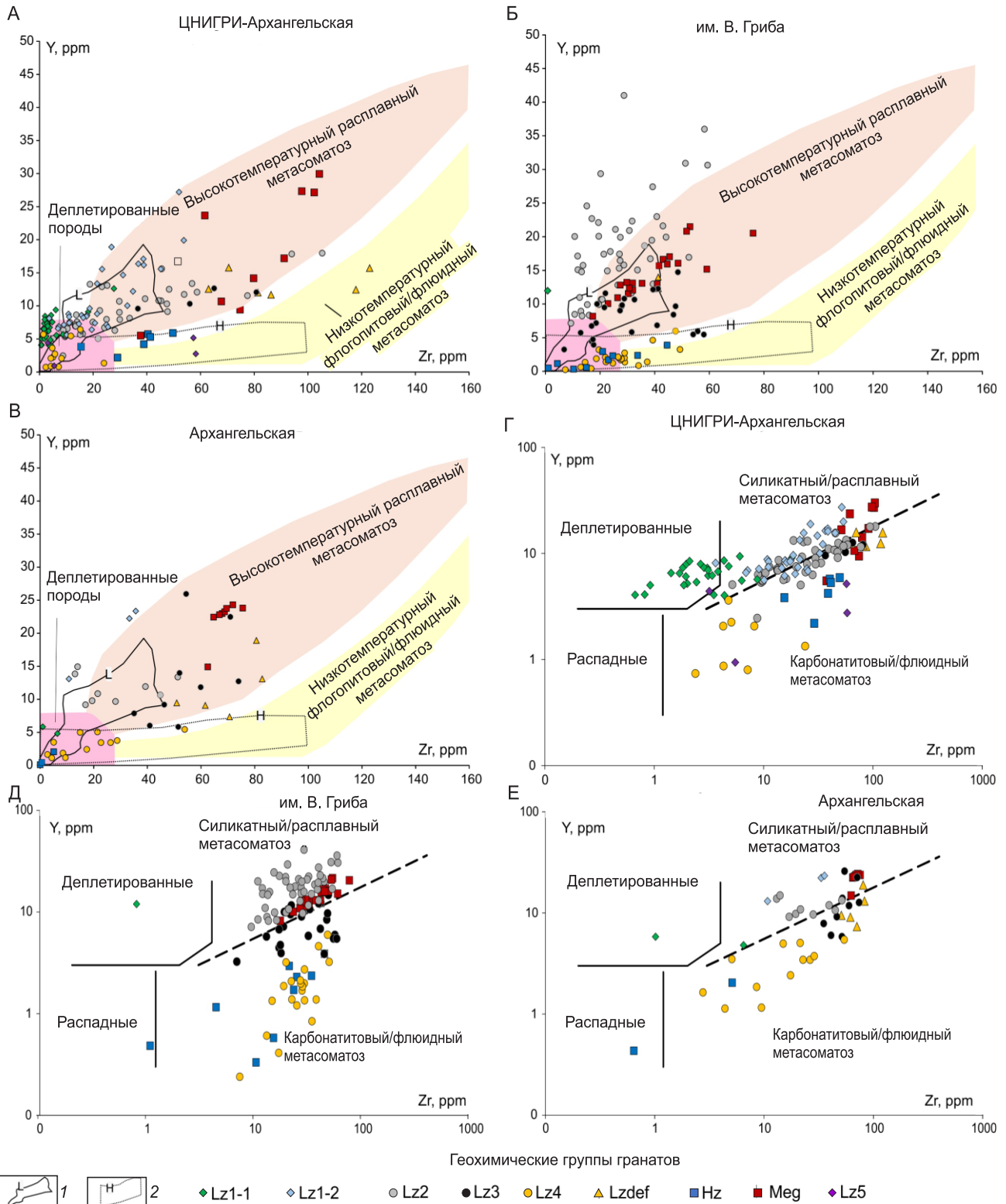


Рис. 6. Концентрации Y и Zr в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Данные по включениям в алмазах [60, 61]:

A–B – диаграмма W. L. Griffin et al., 1999 [37], Г–Е – диаграмма А. М. Агашева и др., 2018 [2]; пиропы из включений в алмазах мира: 1 – лерцолитового и 2 – гарцбургитового парагенезисов

проанализированных методом LA-ICP-MS) составляет 4 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 7 % для трубки им. В. Гриба [54], 6 % для трубки Архангельская [43].

2. Высокохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения P3Э (Lz4, см. рис. 7) также являются распространённым типом граната из включений в алмазах. Наличие гранатов этого типа свидетельствует о процессах рефертилизации литосферной мантии, выраженных в обогащении гарцбургитовых гранатов СаО при сохранении синусоидального типа распределения P3Э, которые могут происходить под влиянием карбонатитового расплава [13, 42, 54]. Доля гранатов этого типа составляет 8 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 16 % для трубки им. В. Гриба, 24 % для трубки Архангельская.

По концентрациям Y и Zr высокохромистые гранаты лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов с синусоидальными спектрами распределения P3Э из всех трёх трубок соответствуют по большей части полю деплетированных пород или тренду низкотемпературного метасоматоза по [36, 37] и идентичны таковым из включений в алмазах (см. рис. 6, А–В).

3. Средне-, высокохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с «горбатым» спектром распределения P3Э (Lz3, см. рис. 7) часто встречаются в ксенолитах лерцолитов из кимберлитов мира [2, 32]. Образование таких гранатов связывается с влиянием силикатного расплава, обогащённого LP3Э, состав которого определён как близкий к кимберлиту для трубки Удачная [32] и пикриту для трубки им. В. Гриба [54]. Согласно опубликованным данным, гранаты этого типа не являются широко распространённым типом включения в алмазах, но тем не менее они всё же встречаются [60]. Доля таких гранатов составляет 3 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 20 % для трубки им. В. Гриба, 18 % для трубки Архангельская. По распределению Y и Zr (см. рис. 6, А–В) гранаты этой группы соответствуют тренду высокотемпературного мантийного метасоматоза для трубок ЦНИГРИ-Архангельская и Архангельская и перекрывают области деплетированных пород и трендов низко- и высокотемпературного мантийного метасоматоза для трубки им. В. Гриба.

4. Низко-, среднехромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с плоским спектром распределения CP3Э-TP3Э (Lz2, см. рис. 7) являются самым распространённым типом граната в ксенолитах лерцолитов из кимберлитов мира и ассоциируют в породах с хромдиоксидом [23, 42]. Такие гранаты могли формироваться под воздействием высокотемпературного силикатного расплава, редкоэлементный

состав которого мог быть близок к базальту [21, 23, 42, 54]. Этот тип мантийного метасоматоза продуцирует самые многочисленные изменения в минералогии и геохимии перидотитов, выраженные в обогащении пород модалным гранатом и клинопироксеном, CP3Э и TP3Э, Y и Zr [23] и губительно влияет на сохранность алмазов [27, 47]. Доля таких гранатов составляет 29 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 39 % для трубки им. В. Гриба, 18 % для трубки Архангельская. В гранатах этой группы из всех трёх трубок наблюдается положительная корреляция между Y и Zr в той или иной степени (см. рис. 6, А–В), но Zr/Y отношение в целом выше у гранатов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская (Zr/Y = 1–7) по сравнению с таковыми из трубок им. В. Гриба (Zr/Y = 0,5–3) и Архангельская (Zr/Y = 0,9–4). Как правило, в распределении Y/Zr гранаты этого типа соответствуют трендам высокотемпературного метасоматоза [23]. Тем не менее полю деплетированных пород соответствуют 50 % гранатов этой группы из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, но лишь единичные зёрна из трубок им. В. Гриба и Архангельская.

5. Низко-, среднехромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с фракционированным спектром от CP3Э до TP3Э (Lz1). По концентрациям CP3Э гранаты этого типа представлены двумя подгруппами: с концентрациями CP3Э на уровне хондрита (Lz1–1) и с обогащением в области CP3Э до 2–8 хондритовых единиц (Lz1–2, см. рис. 7). К настоящему времени гранаты этой группы редко задокументированы как составляющие мантийных лерцолитов, а также в виде ксенокристов в кимберлитах и включениях в алмазах. Они обнаружены: в шести лерцолитах из кимберлита им. В. Гриба, в том числе в одном алмазодержащем [21], в мегакристаллах ортопироксена из кимберлитовой трубки Джагерсфонтейн кратона Каапвааль [33], в виде ксенокристов в кимберлите трубки Мир [2] и включения в алмазе из кимберлита Виктор, Канада [60], состав которых эквивалентен гранатам Lz1–1, в виде включения в алмазе из трубки Джагерсфонтейн [63] и в лерцолитах трубки Премьер кратона Каапвааль [34], состав которых эквивалентен гранатам Lz1–2. Гранаты этого типа были также идентифицированы в большом количестве в шлиховых пробах, отобранных на южных территориях Архангельской области [50] и в породах кратерной части магматического объекта KL-01, недавно обнаруженного в пределах ААП и интерпретированного как новая кимберлитовая трубка, алмазность которой не исключена [25]. Гранаты первой подгруппы составляют 19 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, < 1 % для трубки им. В. Гриба, 4 % для трубки Архангельская. По концентрациям Y и Zr гранаты первой подгруппы соответствуют полю

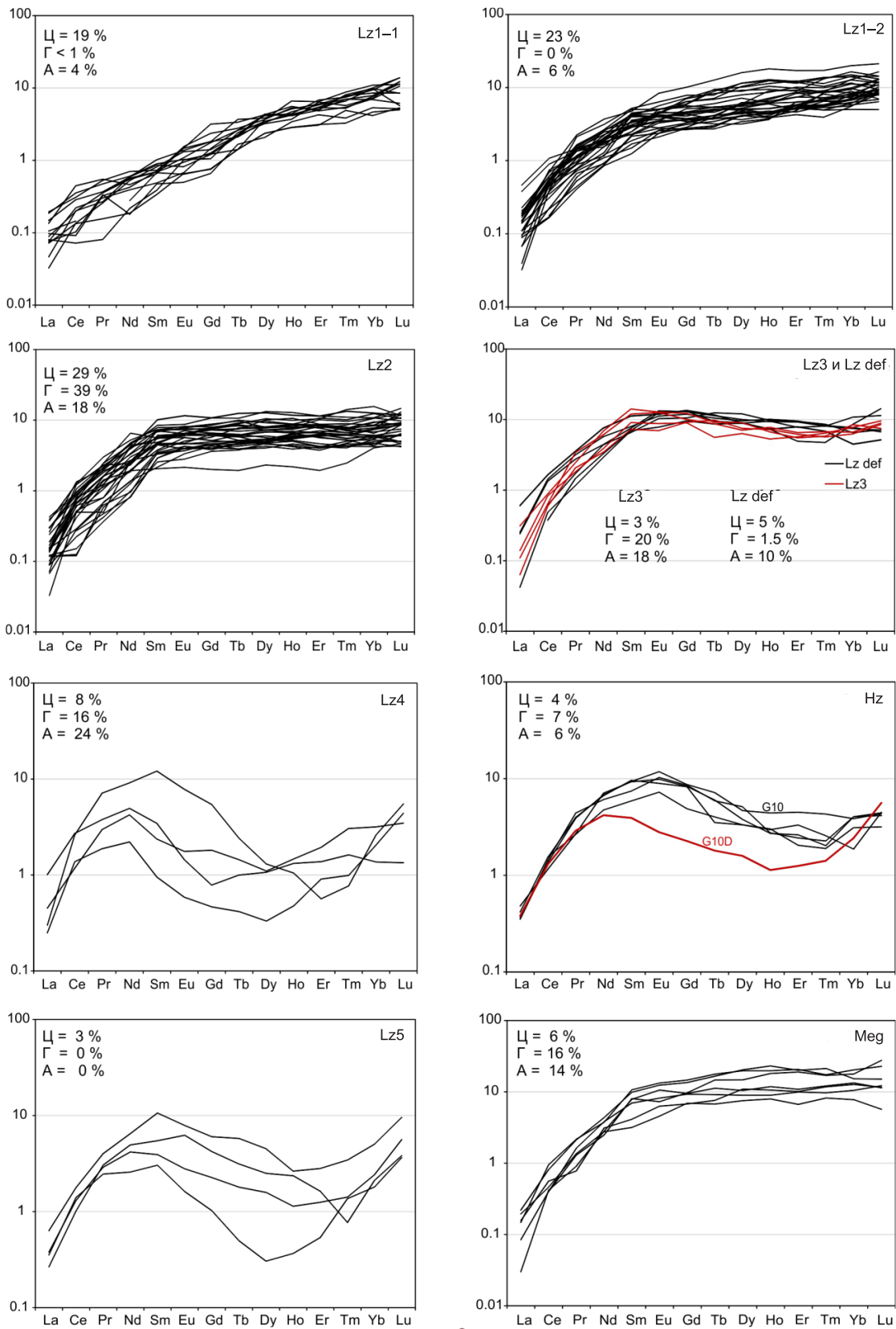


Рис. 7. Нормированные к хондриту [44] концентрации РЗЭ в гранатах из кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская: на графиках показано процентное количество зёрен каждой геохимической группы от общей суммы зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов для трубок ЦНИГРИ-Архангельская (Ц), им. В. Гриба (Г) и Архангельская (А)

деплетированных пород (см. рис. 6, А–В); спектры распределения РЗЭ также свидетельствуют о том, что эти гранаты могут представлять собой реститы частичного плавления, но повышенные концентрации TiO_2 (0,07–0,2 мас.%) по сравнению с гранатами, рассматриваемыми как истинно деплетированными ($TiO_2 < 0,04$ мас.%, по [61]), могут указывать на минимальное воздействие мантийного метасоматоза. Концентрации TiO_2 ($< 0,25$ мас.%) в этих гранатах соответствуют таковым в гранатах гарцбургитового парагенезиса из включений в алмазах мира [61]. Гранаты второй подгруппы обогащены TiO_2 (0,1–0,5 мас.%), Zr (до 50 ppm) и Y (до 30 ppm). Тем не менее 64 % гранатов этой группы из трубки ЦНИГРИ-Архангельская в распределении Y/Zr соответствуют полю деплетированных пород; 26 % гранатов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская и все гранаты из трубки Архангельская характеризуются одновременным увеличением концентраций Y и Zr и соответствуют полю высокотемпературного метасоматоза. В целом гранаты второй подгруппы имеют составы, промежуточные между гранатами первой подгруппы и гранатами с плоским спектром распределения РЗЭ, и могут отражать эволюцию смены составов от деплетированных гранатов с минимальными признаками воздействия мантийного метасоматоза до гранатов, составы которых свидетельствуют об их образовании под воздействием высокотемпературных силикатных расплавов. Доля гранатов второй подгруппы составляет 23 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская и 6 % для трубки Архангельская, в трубке им. В. Гриба такие гранаты не идентифицированы.

6. Низкохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения РЗЭ (Lz5, см. рис. 7) идентифицированы только в трубке ЦНИГРИ-Архангельская в количестве 3 % от общей выборки. Согласно опубликованным данным, такой тип гранатов не был ранее задокументирован для мантийных ксенолитов и ксенокристов для какого-либо кимберлитового объекта, но они обнаружены в большом количестве (19 %) в шлиховых пробах, отобранных с южных территорий Архангельской области [50]. По аналогии с высокохромистыми гранатами лерцолитовой ассоциации с синусоидальными спектрами распределения РЗЭ составы этих гранатов могут также отображать процесс рефертилизации низкохромистой гарцбургит-дунитовой литосферной мантии под влиянием расплава/флюида, обогащённого CaO и ЛРЗЭ [50]. Гранаты этой группы содержат $TiO_2 < 0,1$ мас.% и в распределении Y/Zr соответствуют полю деплетированных пород или тренду низкотемпературного метасоматоза, соответствуя гранатам группы Lz4 (рис. 6, А–В).

Сопоставление данных по концентрациям главных и редких элементов в гранатах и особенностей спектров распределения РЗЭ позволяет определить для каждой трубки процентное количество гранатов, составы которых указывают на определённые процессы в литосферной мантии, которые могли ассоциировать или нет процессам алмазообразования. Доля гранатов групп Hz + Lz4, составы которых абсолютно соответствуют таковым из включений в алмазах, составляет 12 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 23 % для трубки им. В. Гриба, 30 % для трубки Архангельская. Сопоставление этих данных с полученными P-T параметрами для зёрен указывает на то, что 100 % гранатов этой категории из всех трёх трубок соответствуют полю устойчивости алмаза, а полученные значения могут быть интерпретированы как минимальный процентный показатель алмазоносности для данных кимберлитовых объектов. Доля гранатов групп Hz + Lz4 + Lz3 составляет 15 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 43 % для трубки им. В. Гриба, 48 % для трубки Архангельская. Полю устойчивости алмаза соответствуют 100 % зёрен из трубок ЦНИГРИ-Архангельская и Архангельская и 94 % зёрен из трубки им. В. Гриба. Таким образом, максимальные значения процентного показателя алмазоносности могут приниматься как 15, 41 и 48 % для трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская соответственно. Гранаты группы Lz1–1 на данном этапе работ не могут рассматриваться как показатели алмазоносности, несмотря на то, что такой тип гранатов обнаружен и в качестве породообразующего минерала алмазоносного лерцолита, и в виде включений в алмазе, а также является представительной популяцией ксенокристов в высокоалмазоносной трубке Мир, так как неизвестно насколько он типичен как включение в алмазах конкретно из объектов ААП из-за отсутствия опубликованных результатов исследований в этом направлении.

В работе [2] была предложена новая генетическая классификация мантийных гранатов, основанная на концентрациях Y и Zr, но одновременно учитывающая и содержания РЗЭ, и особенности их распределения. Согласно [2], процентное количество гранатов, по составу соответствующих полям карбонатитового/флюидного метасоматоза и распадного генезиса (рис. 6, Г–Е), можно принимать как усреднённый показатель алмазоносности объекта. Данным полям соответствует 29 % зёрен из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 35 % из трубки им. В. Гриба и 47 % из трубки Архангельская. Полученные значения в целом сопоставимы с таковыми, определёнными методом подсчёта Hz + Lz4 + Lz3 без учёта данных по Y и Zr, для трубок им. В. Гриба и Архангельская,

но, безусловно, завышены для трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Это завышение связано прежде всего с тем, что гранаты групп Lz1–2 и Lz2 из трубки ЦНИГРИ-Архангельская систематически менее обогащены Y по сравнению с таковыми из трубки им. В. Гриба. И все же предложенный вариант модифицированной Y-Zr диаграммы для мантийных гранатов может быть использован как дополнительный критерий при оценке потенциальной алмазности площади или объектов ААП.

Заключение. Обсуждение различных существующих методов для определения потенциальной алмазности кимберлитовых трубок на основании составов гранатов показало, что сопоставление данных по концентрациям главных элементов, значениям T и характеру распределению PЗЭ в гранатах перидотитового парагенезиса является наиболее эффективным и достоверным способом определения потенциальной алмазности площади или объекта на территории ААП.

Использование исключительно только данных по процентному содержанию высокохромистых пиропов ассоциации дунит-гарцбургитов («G10D») от общей выборки гранатов приводит к недостоверной оценке потенциальной алмазности объектов ААП, так как, во-первых, процентное содержание гранатов этой категории может не коррелировать с реальной алмазностью кимберлитов ААП, и, во-вторых, алмазность литосферной мантии ААП может быть связана не только с деплетированными породами дунит-гарцбургитового типа, но и с менее деплетированными породами лерцолитового типа, составы гранатов которых соответствуют полю высокохромистых пиропов лерцолитового парагенезиса («G9»).

Отсутствие данных по концентрациям PЭ и характеру распределения спектров PЗЭ в гранатах перидотитовой ассоциации для изучаемого объекта может привести к появлению некорректных выводов о типах метасоматического обогащения пород литосферной мантии, масштабности проявления этих процессов и, как следствие, к неверной идентификации причин слабой (не) алмазности кимберлитовых трубок. Результаты настоящей работы позволили установить, что характер метасоматических преобразований в литосферной мантии в районе высоко- и низкоалмазных кимберлитовых трубок ААП может быть идентичен, а низкая алмазность трубки ЦНИГРИ-Архангельская не связана с масштабным проявлением высокотемпературного расплавленного метасоматоза в подстилающей литосферной мантии, как ранее было определено для некоторых низко (не) алмазных объектов ААП [15, 17, 35, 49]. Породы литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская находились при более вы-

соких T параметрах на всём участке литосферной мантии. При этом в нижней части литосферной мантии сохранились потенциально алмазоносные деплетированные породы дунит-гарцбургитового типа с минимальными признаками метасоматического обогащения и породы высокохромистой лерцолитовой ассоциации, образование которых связано с процессами рефертилизации литосферной мантии под влиянием C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения LPЗЭ к TPЗЭ, обогащённого CaO. Но мощность «алмазного окна» под трубкой ЦНИГРИ-Архангельская может варьировать от минимальной 22 км до максимальной 60 км, что гораздо меньше по сравнению с таковой в районах высокоалмазных трубок им. В. Гриба и Архангельская.

Результаты изучения ксенокристов гранатов из кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба позволили установить основные характеристики высокоалмазоносной литосферной мантии ААП, которые в целом типичны и для других объектов, алмазность которых связана с породами перидотитовой ассоциации: 1) «холодный» режим литосферной мантии с мощностью теплового потока 35–37 мВ/м²; 2) мощность «алмазного окна» более 60 км; 3) наличие в строении литосферной мантии деплетированных пород гарцбургит-дунитового типа с минимальными признаками метасоматического обогащения и высокохромистых лерцолитов в признаках воздействия C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения LPЗЭ к TPЗЭ, при P - T параметрах, соответствующих условиям стабильности алмаза. Указателями потенциальной алмазности объекта, которые могут быть получены при интерпретации составов ксенокристов гранатов, являются: 1) преобладающее количество пиропов перидотитовой ассоциации, характеризующихся параметрами T_{Ni} в диапазоне 900–1100 °С (предварительно, > 60–70 % для кимберлитов Fe-Ti серии и > 30 % для кимберлитов Al-Mg серии); 2) наличие > 20 % (от общего количества зёрен гранатов перидотитовой ассоциации и мегакристов) пиропов групп гарцбургит-дунитов и высокохромистых лерцолитов с синусоидальными спектрами распределения PЗЭ (Hz + Lz4), имеющие T_{Ni} от 900 до 1100 °С; 3) наличие существенного количества пиропов групп Hz + Lz4 + Lz3 (предварительно, > 40 % от общего количества зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов).

Результаты изучения ксенокристов гранатов из кимберлита трубки ЦНИГРИ-Архангельская позволяют выделить признаки низкой алмазности объектов ААП, которые могут быть идентифицированы в составах гранатов: 1) практически полное отсутствие (< 2 %) пиропов с параметрами $T_{Ni} = 900–1100$ °С и преобладание (> 90 %) пиропов, имеющих

значения $T_{Ni} > 1110$ °С; 2) наличие пиропов, генетически относящихся к гарцбургит-дунитам и высокохромистым лерцолитам с синусоидальными спектрами распределения РЗЭ (Hz + Lz4) в количестве от ~ 10 до 20 % от общего количества зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов; 3) < 20 % гранатов групп Hz + Lz4 + Lz3. Эти признаки указывают на опробование слабоалмазоносной более прогретой литосферной мантии, мощность потенциально алмазоносных пород которой («алмазного окна») может варьировать от 20 до 60 км.

Полученные данные позволяют предполагать особенности составов пиропов, указывающих на опробование неалмазоносной литосферной мантии ААП: 1) преобладание пиропов с параметрами $T_{Ni} > 1110$ °С при одновременном отсутствии пиропов групп Hz + Lz4 + Lz3 или существенном преобладании пиропов группы Lz2 при T , соответствующих полю стабильности алмаза; 2) наличие пиропов с параметрами $T_{Ni} = 900$ – 1100 °С, но отсутствие среди них групп Hz + Lz4 + Lz3 или существенном преобладании пиропов группы Lz2.

Результаты настоящего исследования позволяют обозначить комплекс обязательных работ при изучении ксенокристов гранатов, извлечённых из шлиховых проб и магматических объектов, на этапах поисково-разведочных и поисково-оценочных работ на территории Архангельской области:

1) определение концентраций главных элементов методом электронно-зондового анализа и выделение парагенезисов гранатов на основании концентраций CaO и Cr_2O_3 с использованием классификаций [38, 58];

2) определение концентраций Ni в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов методом электронно-зондового анализа и/или масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией, а также расчёт параметра T с использованием термометра [28]; определение процентного количества гранатов перидотитовой ассоциации с параметрами T от 900 до 1100 °С;

3) определение концентраций редких элементов методом масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов и выделение геохимических групп гранатов Lz1–1, Lz1–2, Lz2, Lz3, Lz4, Lz5, Hz и Meg;

4) определение процентного количества гранатов групп Hz + Lz4 и Hz + Lz4 + Lz3, в том числе количества гранатов этих групп с параметрами T от 900 до 1100 °С; получение минимальных и максимальных значений показателей алмазоносности.

Использование предложенной методики позволит, с одной стороны, получать адекватную оценку потенциальной алмазоносности интересующих терри-

торий поисков и, с другой стороны, оценивать потенциальную алмазоносность уже обнаруженных объектов для принятия решения на проведение поисково-оценочных работ, что в свою очередь повысит эффективность и результативность геологоразведочных работ на алмазы на территории Архангельской области. Предложенный метод оценки потенциальной алмазоносности может быть также использован при проведении поисковых работ в пределах других алмазоперспективных территорий Российской Федерации.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 20–77–10018. Отбор образцов осуществлялся в рамках базового проекта ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агашев А. М. Геохимия мегакристаллов граната из кимберлитовой трубки Мир (Якутия) и природа протокимберлитового расплава // Доклады Академии Наук. – 2019. – Т. 486, № 5. – С. 583–587.
2. Агашев А. М., Серов И. В., Толстов А. В., Щукина Е. В., Рагозин А. Л., Похиленко Н. П. Новая генетическая классификация гранатов литосферной мантии // Материалы 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления ее повышения». – Мирный, 2018. – С. 338–342.
3. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Поисковая минералогия алмазов. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2010. – 650 с.
4. Богатиков О. А., Кононова В. А., Носова А. А., Кондрашов И. А. Кимберлиты и лампроиты Восточно-Европейской платформы: петрология и геохимия // Петрология. – 2007. – Т. 16, № 4. – С. 339–360.
5. Васильева Е. Р., Веричев Е. М., Гаранин В. К. и др. Особенности состава важнейших минералов-индикаторов тяжелой фракции из месторождения алмазов им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2005. – № 3. – С. 33–41.
6. Голубев Ю. К., Прусакова Н. А., Голубева Ю. Ю. Кепинские кимберлиты, Архангельская область // Руды и металлы. – 2010. – № 1. – С. 38–45.
7. Голубева Ю. Ю., Щербакова Т. Е., Колесникова Т. И., Хачатрян Г. К. Особенности вещественного состава кимберлитов трубки ЦНИГРИ-Архангельская (Зимнебережное поле) // Сборник публикаций по результатам I и II ежегодных научных чтений им. Г. П. Кудрявцевой. – 2008. – С. 66–75.
8. Гудимова А. И., Агашева Е. В. Состав, строение и термальный режим литосферной мантии в районе высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба

- (Архангельская алмазоносная провинция): на основании данных по химическому составу гранатов и хромдиопсидов // *Материалы 30-й научной конференции Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Северорусского сегмента»*. – Сыктывкар, 2021. – С. 49–54.
9. *Каргин А. В.* Полистадийность мантийного метасоматоза при формировании кимберлитовых магм: на примере кимберлитов трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // *Петрология*. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 227–255.
 10. *Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Богатиков О. А., Каргин А. В.* Алмазоносность кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельская область) // *Геология рудных месторождений*. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 483–505.
 11. *Королюк В. Н., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В., Нигматулина Е. Н.* О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // *Геология и геофизика*. – 2008. – Т. 49 (3). – С. 221–225.
 12. *Лаврентьев Ю. Г., Королюк В. Н., Усова Л. В., Логвинова А. М.* Электронно-зондовое определение примеси никеля в пиропсах для целей геотермометрии перидотитов // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47 (10). – С. 1090–1093.
 13. *Похиленко Н. П., Агашев А. М., Литасов К. Д., Похиленко Л. Н.* Взаимоотношение карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 361–383.
 14. *Рагозин А. Л., Агашев А. М., Зедгенизов Д. А., Денисенко А. А.* Эволюция литосферной мантии в районе Накынского кимберлитового поля по данным изучения гранатов из ксенолитов мантийных перидотитов трубок Нюрбинская и Ботуобинская // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66, № 8. – С. 694–708.
 15. *Саблуков С. М., Саблукова Л. И., Гриффин В. Л.* Распределение редких элементов в глубинных минералах кимберлитов как признак плюмовых процессов на Севере Русской платформы // *Труды IX Международного семинара «Глубинный магматизм, его источники и плюмы»*. – Миасс, Иркутск, 2009. – С. 134–167.
 16. *Саблуков С. М., Саблукова Л. И., Шавырина М. В.* Мантийные ксенолиты из кимберлитовых месторождений округлых алмазов Зимнебережного района, Архангельская алмазоносная провинция // *Петрология*. – 2000. – Т. 8, № 5. – С. 518–548.
 17. *Саблуков С. М., Стегницкий Ю. Б.* Способ выделения приоритетных ореолов рассеяния минералов-спутников алмазоносных кимберлитов // *Роспатент № 2723628*. – 2020.
 18. *Соболев Н. В., Ефимова Э. С., Реймерс Л. Ф., Захарченко О. Д., Махин А. И., Усова Л. В.* Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38, № 2. – С. 358–370.
 19. *Устинов В. Н., Неручев С. С., Загайный А. К., Антасчук М. Г., Лобкова Л. П., Микоев И. И., Николаева Э. В., О'Брайан Х., Пелтонен П., Пенделяк Р. Н.* Алмазоносность Севера Восточно-Европейской платформы. – Санкт-Петербург: Наука, 2021. – 409 с.
 20. *Хачатрян Г. К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // *Отечественная геология*. – 2013. – № 2. – С. 29–42.
 21. *Щукина Е. В., Агашев А. М., Костровицкий С. И., Похиленко Н. П.* Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // *Геология и геофизика*. – 2015. – № 12. – С. 2153–2172.
 22. *Afanasiev V. P., Ashchepkov I. V., Verzhak V. V., O'Brien H. O., Palessky S. V.* PT conditions and trace element variations of picroilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangelsk region, NW Russia // *J. Asian Earth Sci.* – 2013. – № 70–71. – P. 45–63.
 23. *Agashev A. M., Ionov D. A., Pokhilenko N. P., Golovin A. V., Cherepanova Yu., Sharygin I. S.* Metasomatism in the lithospheric mantle roots: Constraints from WR and minerals chemical composition of deformed peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe // *Lithos.* – 2013. – № 160–161. – P. 201–215.
 24. *Agashev A. M., Nakai S., Serov I. V., Tolstov A. V., Garanin K. V., Kovalchuk O. E.* Geochemistry and origin of the Mirny field kimberlites, Siberia // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – № 112 (Suppl 2). – P. 597–608.
 25. *Agasheva E. V.* Magmatic material in sandstone shows prospects for new diamond deposits within the Northern East European platform // *Minerals*. – 2021. – № 11 (4). – Art. 339.
 26. *Agasheva E. V., Kolesnichenko M. V., Malygina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of water in mantle eclogites from the V. Grib kimberlite pipe, NW Russia // *Lithosphere*. – 2021. – 18 p.
 27. *Bataleva Y. V., Palyanov Y. N., Sokol A. G., Borzdov Y. M., Palyanova G. A.* Conditions for the origin of oxidized carbonate-silicate melts: Implications for mantle metasomatism and diamond formation // *Lithos.* – 2012. – № 128–131. – P. 113–125.
 28. *Canil D.* The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1999. – № 136. – P. 240–246.
 29. *Chepurov A. A., Faryad S. W., Agashev A. M., Strnad L., Jedlicka R., Turkin A. I., Mihajevic M., Lin V. V.* Experimental crystallization of a subcalcic Cr-rich pyrope in the presence of REE-bearing carbonatite // *Chemical Geology*. – 2019. – № 509. – P. 103–114.
 30. *Cookerboo H. O., Grutter H. S.* Mantle-derived indicator mineral compositions as applied to diamond exploration // *Geochemistry exploration environment analyses*. – 2010. – № 10 (1). – P. 81–95.
 31. *Day H. W.* A revised diamond-graphite transition curve // *American Mineralogist*. – 2012. – № 97. – P. 52–62.
 32. *Doucet L. S., Ionov D. A., Golovin A. V.* The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: New data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2013. – № 165. – P. 1225–1242.
 33. *Gibson S. A.* On the nature and origin of garnet in high-refractory Archean lithospheric mantle: Constraints from

- the garnet exsolved in Kaapvaal craton orthopyroxene // *Mineralogical Magazine*. – 2017. – № 81. – P. 781–809.
34. *Gregoire M., Bell D. R., Le Roex A. P.* Garnet Iherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history // *Journal of Petrology*. – 2003. – № 44. – P. 629–657.
 35. *Griffin W. L., O'Reilly S. Y.* Upper mantle composition: tools for smarter diamond exploration // *Mineral deposit research: meeting the global challenge*. – 2005. – P. 7–10.
 36. *Griffin W. L., Ryan C. G.* Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration // *Journal of geochemical Exploration*. – 1995. – № 53. – P. 311–337.
 37. *Griffin W. L., Shee S. R., Ryan C. G., Win T. T., Wyatt B. A.* Harzburgite to Iherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberly, South Africa // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1999. – № 134. – P. 232–250.
 38. *Grütter H. S., Gurney J. J., Menzies A. H., Winter F.* An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers // *Lithos*. – 2004. – № 77. – P. 841–857.
 39. *Grütter H., Latti D., Menzies A.* Cr-saturation arrays in concentrate from kimberlite and their use in mantle barometry // *Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 801–820.
 40. *Gurney J. J.* A correlation between garnets and diamonds in kimberlites // *Publications of the Geology Department and University Extension*. – Perth: University of Western Australia, 1984. – P. 143–166.
 41. *Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – № 307. – P. 59–70.
 42. *Howarth G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agashev A. M.* Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*. – 2014. – № 184–187. – P. 209–224.
 43. *Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V.* Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): Constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle // *Lithos*. – 2009. – № 112. – P. 924–933.
 44. *McDonough W. F., Sun S. S.* The composition of the Earth // *Chemical Geology*. – 1995. – № 120. – P. 223–253.
 45. *Nimis P., Taylor W. R.* Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – № 139. – P. 541–554.
 46. *Nowicki T. E., Moore R. O., Gurney J., Baumgartner M. C.* Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: A review of key concepts and applications // *In Developments in Sedimentology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. – 2007. – № 58. – P. 1235–1267.
 47. *Rorbach A., Schmidt M. W.* Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling // *Nature*. – 2011. – № 472. – P. 209–212.
 48. *Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J.* Garnet geotherms: A technique for derivation of *P-T* data from Cr-pyrope garnets // *J. Geophys. Res.* – 1996. – № 101. – P. 5611–5625.
 49. *Sablukova L., Sablukov S., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Win T. T., Grib V.* Lithosphere evolution in the Arkhangelsk kimberlite province. Sixth International Kimberlite Conference Extended Abstracts, 1995. – P. 487–489.
 50. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Shchukin V. S.* Diamond-bearing root beneath the northern East European Platform (Arkhangelsk region, Russia): Evidence from Cr-pyrope trace-element geochemistry // *Minerals*. – 2019. – № 9. – Art. 261.
 51. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Soloshenko N. G., Streletskaya M. V., Zedgenizov D. A.* Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics // *Mineral. Petrol.* – 2019. – № 113. – P. 593–612.
 52. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of zircon bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangelsk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon // *Mineral Petrol.* – 2018. – № 112 (1). – P. 85–100.
 53. *Shchukina E. V., Shchukin V. S.* Diamond exploration potential of the northern East European Platform // *Minerals*. – 2018. – № 8 (5). – Art. 189.
 54. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Pokhilenko N. P.* Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk region, NW Russia // *Geosci. Front.* – 2017. – № 8. – P. 641–651.
 55. *Smit K. V., Shor R.* Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia // *Gems Gemol.* – 2017. – № 53. – P. 144–167.
 56. *Smith C. B., Gurney J. J., Skinner E. M. W., Clement C. R., Ebrahim N.* Geochemical character of Southern African kimberlites: A new approach on isotopic constraints // *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* – 1985. – № 88. – P. 267–280.
 57. *Sobolev N. V., Lavrentev Y. G.* Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressure // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1971. – № 31. – P. 1–12.
 58. *Sobolev N. V., Lavrentyev Y. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1973. – № 40. – P. 39–52.
 59. *Stachel T., Aulbach S., Brey G. P., Harris J. W., Leost I., Tapper R., Viljoen K. S.* The trace element composition of silicate inclusions in diamonds: a review // *Lithos*. – 2004. – № 77. – P. 1–19.
 60. *Stachel T., Banas A., Aulbach S., Smit K. V., Wescott, P., Chinn I. L., Kong J.* The Victor Mine (Superior Craton, Canada): Neoproterozoic Iherzolitic diamonds from a thermally-modified cratonic root // *Mineral. Petrol.* – 2018. – P. 112 (Suppl. 1). – P. 325–326.
 61. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions // *Ore Geology Reviews*. – 2008. – V. 34. – P. 5–32.
 62. *Stachel T., Viljoen K. S., Brey G., Harris J. W.* Metasomatic processes in Iherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1998. – № 159. – P. 1–12.

63. *Tappert R., Stachel T., Harris J. W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. P.* Diamonds from Jagersfontein (South Africa): Messengers from the sublithospheric mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2005. – № 150. – P. 505–522.
64. *Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V. G.* Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia // *Am. Mineral.* – 2016. – № 101. – P. 2222–2232.
65. *Zinchenko V., Ivanov A., Félix J.* Assessment of kimberlite diamond grade by the indicator minerals chemical composition in Lunda region of Angola // *EGU General Assembly 2021*, EGU21-3282.

REFERENCES

1. *Agashev A. M.* Geokhimiya megakristallov granata iz kimberlitovoy trubki Mir (Yakutiya) i priroda protokimberlitovogo rasplava [Geochemistry of garnet megacrystals from the Mir kimberlite pipe (Yakutia) and the nature of protokimberlite melt]. *Doklady Akademii Nauk*, 2019, V. 486, No. 5, P. 583–587. (In Russ.)
2. *Agashev A. M., Serov I. V., Tolstov A. V., Shchukina Ye. V., Ragozin A. L., Pokhilenko N. P.* Novaya geneticheskaya klassifikatsiya granatov litosfernoy mantii [New genetic classification of garnets in the lithospheric mantle]. *Materialy 5-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskaya konferentsii “Effektivnost geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskiye i innovatsionno-tekhnologicheskkiye napravleniya yeye povysheniya”*, Mirnyy, 2018, P. 338–342. (In Russ.)
3. *Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P.* Poiskovaya mineralogiya almazov [Prospecting mineralogy of diamonds]. Novosibirsk, Akademicheskoye izdatelstvo “Geo” publ., 2010, 650 p. (In Russ.)
4. *Bogatikov O. A., Kononova V. A., Nosova A. A., Kondrashov I. A.* Kimberlity i lamproity Vostochno-Yevropeyskoy platformy: petrologiya i geokhimiya [Kimberlites and lamproites of the East European platform: petrology and geochemistry]. *Petrologiya*, 2007, V. 6, No. 4, P. 339–360. (In Russ.)
5. *Vasilyeva Ye. R., Verichev Ye. M., Garanin V. K.* et al. Osobnosti sostava vazhneyshikh mineralov-indikatorov tyazheloy fraktsii iz mestorozhdeniya almazov im. V. Griba (Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya) [Features of the composition of the most important minerals-indicators of the heavy fraction from the diamond deposit named after V. Griba (Arkhangel'sk diamondiferous province)]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 2005, No. 3, P. 33–41. (In Russ.)
6. *Golubev Yu. K., Prusakova N. A., Golubeva Yu. Yu.* Kepingimberlity, Arkhangel'skaya oblast [Kepingimberlites, Arkhangel'sk region]. *Rudy i metally*, 2010, No. 1, P. 38–45. (In Russ.)
7. *Golubeva Yu. Yu., Shcherbakova T. Ye., Kolesnikova T. I., Khachatryan G. K.* Osobnosti veshchestvennogo sostava kimberlitov trubki Tsnigri-Arkhangel'skaya (Zimnerezhnoye pole) [Features of the material composition of kimberlites of the Tsnigri-Arkhangel'skaya pipe (Zimnerezhnoye field)]. *Sbornik publikatsiy po rezultatam I i II yezhegodnykh nauchnykh chteniy im. G. P. Kudryavtsevo*, 2008, P. 66–75. (In Russ.)
8. *Gudimova A. I., Agasheva Ye. V.* Sostav, stroyeniye i termal'nyy rezhim litosfernoy mantii v rayone vysokomalazonosnoy kimberlitovoy trubki im. V. Griba (Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya): na osnovanii dannykh po khimicheskomu sostavu granatov i khromdiopsidov [Composition, structure and thermal regime of the lithospheric mantle in the area of the highly diamond-bearing kimberlite pipe im. V. Griba (Arkhangel'sk diamondiferous province): based on data on the chemical composition of garnets and chromium diopsides]. *Materialy 30-y nauchnoy konferentsii Instituta geologii FITS Komi NTS UrO RAN “Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta”*, Syktyvkar, 2021, P. 49–54. (In Russ.)
9. *Kargin A. V.* Polistadiynost mantiynogo metasomatoza pri formirovaniy kimberlitovykh magm: na primere kimberlitov trubki im. V. Griba, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Multi-stage mantle metasomatism during the formation of kimberlite magmas: on the example of kimberlites of the pipe im. V. Griba, Arkhangel'sk diamond province]. *Petrologiya*, 2021, V. 29, No. 3, P. 227–255. (In Russ.)
10. *Kononova V. A., Golubeva Yu. Yu., Bogatikov O. A., Kargin A. V.* Almazonosnost kimberlitov Zimnerezhnogo polya (Arkhangel'skaya oblast) [Diamond potential of kimberlites of the Zimnerezhnoye field (Arkhangel'sk region)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2007, V. 49, No. 6, P. 483–505. (In Russ.)
11. *Korolyuk V. N., Lavrentyev Yu. G., Usova L. V., Nigmatulina Ye. N.* O tochnosti elektronno-zondovogo analiza porodoobrazuyushchikh mineralov na mikroanalizatore JXA-8100 [On the accuracy of electron probe analysis of rock-forming minerals on a JXA-8100 microanalyzer]. *Geologiya i geofizika*, 2008, V. 49 (3), P. 221–225. (In Russ.)
12. *Lavrentyev Yu. G., Korolyuk V. N., Usova L. V., Logvinova A. M.* Elektronno-zondovoye opredeleniye primesi nikelya v piropakh dlya tseyey geotermometrii peridotitov [Electron probe determination of nickel impurity in pyropes for the purpose of peridotite geothermometry]. *Geologiya i geofizika*, 2006, V. 47 (10), P. 1090–1093. (In Russ.)
13. *Pokhilenko N. P., Agashev A. M., Litasov K. D., Pokhilenko L. N.* Vzaimootnosheniye karbonatitovogo metasomatoza depletirovannykh peridotitov litosfernoy mantii s almazobrazovaniyem i karbonatit-kimberlitovym magmatizmom [Relationship of carbonatite metasomatism of depleted peridotites of the lithospheric mantle with diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism]. *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, P. 361–383. (In Russ.)
14. *Ragozin A. L., Agashev A. M., Zedgenizov D. A., Denisenko A. A.* Evolyutsiya litosfernoy mantii v rayone Nanykskogo kimberlitovogo polya po dannym izucheniya granatov iz ksenolitov mantiynykh peridotitov trubok

- Nyurbinskaya i Botuobinskaya [Evolution of the lithospheric mantle in the area of the Nakyn kimberlite field according to the study of garnets from xenoliths of mantle peridotites of the Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes]. *Geokhimiya*, 2021, V. 66, No. 8, P. 694–708. (In Russ.)
15. *Sablukov S. M., Sablukova L. I., Griffin V. L.* Raspredele-niye redkikh elementov v glubinykh mineralakh kimberlitov kak priznak pdyumovykh protsessov na Severe Russkoy platformy [Distribution of rare elements in deep-seated kimberlite minerals as a sign of sub-dyom processes in the North of the Russian Platform]. *Trudy IX Mezhdunarodnogo seminaru "Glubinnyy magmatizm, yego istochniki i plyumy"*, Miass, Irkutsk, 2009, P. 134–167. (In Russ.)
 16. *Sablukov S. M., Sablukova L. I., Shavyrina M. V.* Mantinyye ksenolity iz kimberlitovykh mestorozhdeniy okruglykhalmazov Zimneberezhnogo rayona, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Mantle xenoliths from kimberlite deposits of rounded diamonds in the Zimneberezhny region, Arkhangel'sk diamondiferous province] *Petrologiya*, 2000, V. 8, No. 5, P. 518–548. (In Russ.)
 17. *Sablukov S. M., Stegnitskiy Yu. B.* Sposob vydeleniya prioritnykh oreolov rasseyaniya mineralov-sputnikov almazonosnykh kimberlitov [A method for identifying priority dispersion halos of satellite minerals of diamond-bearing kimberlites]. *Rospatent No. 2723628*, 2020. (In Russ.)
 18. *Sobolev N. V., Yefimova E. S., Reymers L. F., Zakharchenko O. D., Makhin A. I., Usova L. V.* Mineralnyye vkluyeniya v almazakh Arkhangel'skoy kimberlitovoy provintsiy [Mineral inclusions in diamonds of the Arkhangel'sk kimberlite province]. *Geologiya i geofizika*, 1997, V. 38, No. 2, P. 358–370. (In Russ.)
 19. *Ustinov V. N., Neruchev S. S., Zagaynyy A. K.* et al. Almazonosnost Severa Vostochno-Yevropeyskoy platformy [Diamond potential in the North of the East European Platform]. *St. Petersburg, Nauka publ.*, 2021, 409 p. (In Russ.)
 20. *Khachatryan G. K.* Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in diamond crystals in the aspect of geological, genetic and forecasting problems of diamond deposits]. *Otechestvennaya geologiya*, 2013, No. 2, P. 29–42. (In Russ.)
 21. *Shchukina Ye. V., Agashev A. M., Kostrovitskiy S. I., Pokhilenko N. P.* Metasomaticheskiye izmeneniya litosfernoy mantii v rayone kimberlitovoy trubki im. V. Griba, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Metasomatic changes in the lithospheric mantle in the area of the kimberlite pipe im. V. Griba, Arkhangel'sk diamondiferous province]. *Geologiya i geofizika*, 2015, No. 12, P. 2153–2172. (In Russ.)
 22. *Afanasiev V. P., Ashchepkov I. V., Verzhak V. V., O'Brien H. O., Palesky S. V.* PT conditions and trace element variations of picroilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangel'sk region, NW Russia. *J. Asian Earth Sci.*, 2013, No. 70–71, P. 45–63.
 23. *Agashev A. M., Ionov D. A., Pokhilenko N. P., Golovin A. V., Cherepanova Yu., Sharygin I. S.* Metasomatism in the lithospheric mantle roots: Constraints from WR and minerals chemical composition of deformed peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe. *Lithos*, 2013, No. 160–161, P. 201–215.
 24. *Agashev A. M., Nakai S., Serov I. V., Tolstov A. V., Gararin K. V., Kovalchuk O. E.* Geochemistry and origin of the Mirny field kimberlites, Siberia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, No. 112 (Suppl 2), P. 597–608.
 25. *Agasheva E. V.* Magmatic material in sandstone shows prospects for new diamond deposits within the Northern East European platform. *Minerals*, 2021, No. 11 (4), Art. 339.
 26. *Agasheva E. V., Kolesnichenko M. V., Malygina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of water in mantle eclogites from the V. Grib kimberlite pipe, NW Russia. *Lithosphere*, 2021, 18 p.
 27. *Bataleva Y. V., Palyanov Y. N., Sokol A. G., Borzdov Y. M., Palyanova G. A.* Conditions for the origin of oxidized carbonate–silicate melts: Implications for mantle metasomatism and diamond formation. *Lithos*, 2012, No. 128–131, P. 113–125.
 28. *Canil D.* The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, No. 136, P. 240–246.
 29. *Chepurov A. A., Faryad S. W., Agashev A. M., Strnad L., Jedlicka R., Turkin A. I., Mihaljevic M., Lin V. V.* Experimental crystallization of a subcalcic Cr-rich pyrope in the presence of REE-bearing carbonatite. *Chem. Geol.*, 2019, No. 509, P. 103–114.
 30. *Cookerboo H. O., Grutter H. S.* Mantle-derived indicator mineral compositions as applied to diamond exploration. *Geochemistry exploration environment analyses*, 2010, No. 10 (1), P. 81–95.
 31. *Day H. W.* A revised diamond-graphite transition curve. *American Mineralogist*, 2012, No. 97, P. 52–62.
 32. *Doucet L. S., Ionov D. A., Golovin A. V.* The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: New data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, No. 165, P. 1225–1242.
 33. *Gibson S. A.* On the nature and origin of garnet in high-refractory Archean lithospheric mantle: Constraints from the garnet exsolved in Kaapvaal craton orthopyroxene. *Mineralogical Magazine*, 2017, No. 81, P. 781–809.
 34. *Gregoire M., Bell D. R., Le Roex A. P.* Garnet lherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history. *J. Petrol.*, 2003, № 44, P. 629–657.
 35. *Griffin W. L., O'Reilly S. Y.* Upper mantle composition: tools for smarter diamond exploration. *Mineral deposit research: meeting the global challenge*, 2005, P. 7–10.
 36. *Griffin W. L., Ryan C. G.* Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration. *Journal of geochemical Exploration*, 1995, No. 53, P. 311–337.
 37. *Griffin W. L., Shee S. R., Ryan C. G., Win T. T., Wyatt B. A.* Harzburgite to lherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberly, South Africa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, No. 134, P. 232–250.
 38. *Grütter H. S., Gurney J. J., Menzies A. H., Winter F.* An updated classification scheme for mantle-derived garnet,

- for use by diamond explorers. *Lithos*, 2004, No. 77, P. 841–857.
39. *Grutter H., Latti D., Menzies A.* Cr-saturation arrays in concentrate from kimberlite and their use in mantle barometry. *Journal of Petrology*, 2006, V. 47, P. 801–820.
 40. *Gurney J. J.* A correlation between garnets and diamonds in kimberlites. Publications of the Geology Department and University Extension, Perth: University of Western Australia, 1984, P. 143–166.
 41. *Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, No. 307, P. 59–70.
 42. *Howarth G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agashev A. M.* Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths. *Lithos*, 2014, No. 184–187, P. 209–224.
 43. *Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V.* Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): Constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle. *Lithos*, 2009, No. 112, P. 924–933.
 44. *McDonough W. F., Sun S. S.* The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 1995, No. 120, P. 223–253.
 45. *Nimis P., Taylor W. R.* Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, No. 139, P. 541–554.
 46. *Nowicki T. E., Moore R. O., Gurney J., Baumgartner M. C.* Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: A review of key concepts and applications. In *Developments in Sedimentology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2007, No. 58, P. 1235–1267.
 47. *Rorbach A., Schmidt M. W.* Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling. *Nature*, 2011, No. 472, P. 209–212.
 48. *Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J.* Garnet geotherms: A technique for derivation of P-T data from Cr-pyrope garnets. *J. Geophys. Res.*, 1996, No. 101, P. 5611–5625.
 49. *Sablukova L., Sablukov S., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Win T. T., Grib V.* Lithosphere evolution in the Arkhangelsk kimberlite province. Sixth International Kimberlite Conference Extended Abstracts, 1995, P. 487–489.
 50. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Shchukin V. S.* Diamond-bearing root beneath the northern East European Platform (Arkhangelsk region, Russia): Evidence from Cr-pyrope trace-element geochemistry. *Minerals*, 2019, No. 9, Art. 261.
 51. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Soloshenko N. G., Streletskaia M. V., Zedgenizov D. A.* Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics. *Mineral. Petrol.*, 2019, No. 113, P. 593–612.
 52. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of zircon bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangelsk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon. *Mineral. Petrol.*, 2018, No. 112 (1), P. 85–100.
 53. *Shchukina E. V., Shchukin V. S.* Diamond exploration potential of the northern East European Platform. *Minerals*, 2018, No. 8 (5), Art. 189.
 54. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Pokhilenko N. P.* Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk region, NW Russia. *Geosci. Front.*, 2017, No. 8, P. 641–651.
 55. *Smit K. V., Shor R.* Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia. *Gems Gemol.*, 2017, No. 53, P. 144–167.
 56. *Smith C. B., Gurney J. J., Skinner E. M. W., Clement C. R., Ebrahim N.* Geochemical character of Southern African kimberlites: A new approach on isotopic constraints. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, 1985, No. 88, P. 267–280.
 57. *Sobolev N. V., Lavrentev Y. G.* Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1971, No. 31, P. 1–12.
 58. *Sobolev N. V., Lavrentyev Y. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, No. 40, P. 39–52.
 59. *Stachel T., Aulbach S., Brey G. P., Harris J. W., Leost I., Tapper R., Viljoen K. S.* The trace element composition of silicate inclusions in diamonds: a review. *Lithos*, 2004, No. 77, P. 1–19.
 60. *Stachel T., Banas A., Aulbach S., Smit K. V., Wescott, P., Chinn I. L., Kong J.* The Victor Mine (Superior Craton, Canada): Neoproterozoic Iherzolitic diamonds from a thermally-modified cratonic root. *Mineral. Petrol.*, 2018, P. 112 (Suppl. 1), P. 325–326.
 61. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions. *Ore Geology Reviews*, 2008, V. 34, P. 5–32.
 62. *Stachel T., Viljoen K. S., Brey G., Harris J. W.* Metasomatic processes in Iherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, No. 159, P. 1–12.
 63. *Tappert R., Stachel T., Harris J. W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. P.* Diamonds from Jagersfontein (South Africa): Messengers from the sublithospheric mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, No. 150, P. 505–522.
 64. *Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V. G.* Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia. *Am. Mineral.*, 2016, No. 101, P. 2222–2232.
 65. *Zinchenko V., Ivanov A., Félix J.* Assessment of kimberlite diamond grade by the indicator minerals chemical composition in Lunda region of Angola. EGU General Assembly 2021, EGU21-3282.