

Типоморфные особенности гранатов из кратерной и диатремовой фаций кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция): применение при прогнозно-поисковых работах на алмазы на севере Восточно-Европейской платформы

Е. О. Барабаш, Е. В. Агашева

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022 г., принята к печати 22.02.2023 г.

Объект исследования. Морфология зерен ксенокристов гранатов из кратерной и диатремовой частей высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба Архангельской алмазоносной провинции. **Цель исследования.** Реконструировать основные этапы эндогенного и экзогенного морфогенеза гранатов из кратерной и диатремовой частей кимберлитовой трубки на основании детального изучения их морфологических особенностей. Показать возможность использования полученных данных при интерпретации морфологии зерен минералов-индикаторов кимберлита из шлихоминералогических проб при поисково-разведочных работах на алмазы на севере Восточно-Европейской платформы. **Материалы и методы.** Было проведено детальное изучение морфологии 655 зерен гранатов, отобранных из концентрата минералов тяжелой фракции раздробленных пород, представляющих кратерную (песчаники) и диатремную (кимберлит) части трубки им. В. Гриба с помощью методов оптической и электронно-сканирующей микроскопии. Из пород кратерной части, извлеченных из керна одной заверочной скважины и представляющих интервал от 70 до 174 м от поверхности, были выбраны все визуально диагностируемые зерна гранатов. Для сравнения из 1100 зерен ксенокристов гранатов, отобранных методом случайной выборки из концентрата минералов тяжелой фракции кимберлита диатремной части, выбраны 180 зерен гранатов, представляющих четыре цветовые группы: фиолетовые, красные, красно-оранжевые и оранжевые. **Результаты.** Установлено, что большинство зерен гранатов из кратера (96%) и диатремы (89%) имеет признаки только эндогенного этапа морфогенеза. Тем не менее в трубке обнаружены гранаты с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым (3% в кратере и 11% в диатреме) и каплевидным рельефами (1% в кратере), которые могли формироваться только в результате постмагматических процессов. Впервые в глубинной диатремной части трубки (более 200 м от поверхности), сложенной плотным кимберлитом, обнаружены гранаты с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом, которые ранее для Восточно-Европейской платформы интерпретировались только как составляющие вторичного коллектора или верхних горизонтов кратерных частей трубок. **Выводы.** Гранаты с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом, обнаруженные в шлихоминералогических пробах, могут быть интерпретированы как из вторичного коллектора только имея признаки механического износа; отсутствие следов механического износа на таких зернах не позволяет исключать близость расположения коренного источника. Факт обнаружения в кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба (в интервале глубин 150–168 м от поверхности) гранатов с каплевидным рельефом также ставит под вопрос однозначную интерпретацию таких зерен из шлихоминералогических проб как признак вторичного коллектора; только максимальная степень растворения гранатов с формированием кубоидов или наличие признаков механического износа может указывать на переотложенный характер ореола. Результаты исследования подтверждают необходимость усовершенствования шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений по типоморфным особенностям минералов-индикаторов кимберлитов применительно к условиям севера Восточно-Европейской платформы.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, гранат, морфогенез, Восточно-Европейская платформа, поиск и разведка алмазов

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-77-10018

Для цитирования: Барабаш Е.О., Агашева Е.В. (2023) Типоморфные особенности гранатов из кратерной и диатремовой фаций кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция): применение при прогнозно-поисковых работах на алмазы на севере Восточно-Европейской платформы. *Литосфера*, 23(4), 622–636. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-622-636>

For citation: Barabash E.O., Agasheva E.V. (2023) Typomorphic features of garnet xenocrysts from the crater and diatreme parts of the high diamondiferous V. Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk diamondiferous province): application in prospecting and exploration for diamonds in the north of the East European platform. *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 622–636. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-622-636>

Typomorphic features of garnet xenocrysts from the crater and diatreme parts of the high diamondiferous V. Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk diamondiferous province): application in prospecting and exploration for diamonds in the north of the East European platform

Ekaterina O. Barabash, Elena V. Agasheva

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

Received 27.12.2022, accepted 22.02.2023

Research subject. Morphology of garnet xenocryst grains from the crater and diatreme parts of the highly diamondiferous V. Grib kimberlite pipe of the Arkhangelsk diamondiferous province. **Aim.** To reconstruct the main stages of endogenous and exogenous morphogenesis of garnet xenocrysts from the crater and diatreme parts of the kimberlite pipe based on a detailed study of their morphological features. To demonstrate the applicability of the data obtained in the interpretation of the morphology of grains of kimberlite indicator minerals from modern alluvial sediments during prospecting and exploration for diamonds in the north of the East European Platform. **Materials and methods.** A detailed study of the morphology of 655 garnet grains was carried using the methods of optical and electron-scanning microscopy. Garnet grains were selected from the heavy mineral concentrate of crushed rocks, representing the crater (sandstones) and diatreme (kimberlite) parts of the V. Grib pipe. All visually diagnosed garnet grains were handpicked selected from the rocks of the crater part, extracted from the core of one borehole and representing an interval from 70 to 174 m from the surface. For comparison, out of 1100 grains of garnet xenocrysts, selected by random sampling from the concentrate of minerals of the heavy fraction of kimberlite of the diatreme part, 180 garnet grains were selected, representing four-color groups: purple, red, red-orange and orange. **Results.** The majority of garnets from the crater (96%) and diatreme (89%) parts of the V. Grib kimberlite pipe were shown to exhibit the “primary” magmatic morphology. Nevertheless, the garnet grains with well-developed pyramidal shingle-like (3% in the crater and 11% in the diatreme) and drop-shaped (1% in the crater) reliefs have been identified. These types of garnets were formed under the influence of postmagmatic processes. For the first time, in the deep diatreme part of the pipe (more than 200 m from the surface), composed of dense kimberlite, garnets with a well-developed pyramidal shingle-like relief were found, which had been previously interpreted for the East European Platform only as components of the secondary deposits or the upper horizons of the crater parts of the pipes. **Conclusions.** Garnets with a well-developed pyramidal shingle-like relief, found in modern alluvial sediments, can be interpreted as from a secondary deposit only if they show signs of mechanical abrasion; the absence of traces of mechanical abrasion on such grains does not allow us to exclude the proximity of the primary source. The presence of drop-shaped relief garnets in the crater of the V. Grib pipe (150–168 m from the surface) also calls into question the unambiguous interpretation of such grains as a sign of secondary deposits: only the maximum degree of chemical abrasion of garnets with the formation of cuboids grains can indicate their redeposited nature. The results confirm the need to improve the method of prospecting for diamond deposits according to the typomorphic features of kimberlite indicator minerals recovered from the modern sediments, sampled in the north of the East European Platform.

Keywords: kimberlite pipe, garnet, morphogenesis, East European platform, prospecting and exploration of diamonds

Funding information

This work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 20-77-100018 to Elena V. Agasheva

Acknowledgements

The authors are deeply grateful to PhD V.P. Afanasiev for his help in interpreting the morphology of garnet grains. This manuscript has benefited from the helpful comments of two anonymous reviewers.

ВВЕДЕНИЕ

Интерпретация морфологических особенностей индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) из шлихоминералогических проб является обязательным и неотъемлемым этапом ревизионно-поисковых работ на алмазы при оценке перспектив коренной алмазоносности территории. Она позволяет восстановить основные этапы морфогенеза ИМК и реконструировать условия и историю развития как отдельных минеральных индивидов, так и ассоциации в целом (Афанасьев и др., 2001). Для

восстановления условий формирования ассоциации ИМК необходимо понимание процесса морфогенеза, начиная от стадии формирования кимберлитового тела и заканчивая изменениями минералов в экзогенных условиях. Ключевую роль при этом играет типоморфизм ИМК, т. е. способность минералов отражать в своих структурных, морфологических, физических и химических свойствах условия среды, в которой он зарождался, рос и существовал на протяжении всей своей истории (Ферсман, 1940). Более того, онтогенетический анализ типоморфных особенностей ИМК позволяет

установить последовательность смены геологических условий существования минералов (Афанасьев и др., 2001). Конечный облик минерального индивида является результатом воздействия множества факторов на эндогенном (магматический и высокотемпературный гидротермальный) и экзогенном (физико-химические изменения и механический износ) этапах формирования ореола ИМК (Афанасьев и др., 2001).

К настоящему времени на севере Архангельской области открыты около 100 магматических объектов ультраосновного и основного состава (Архангельская алмазоносная провинция, ААП), из которых семь кимберлитовых трубок содержат промышленные запасы алмазов. Возраст кимберлитового магматизма ААП оценивается как 390–340 млн лет (Шевченко и др., 2004; Ларионова и др., 2016). Поисковые работы на алмазы в этом регионе проводятся и в настоящее время, а северные (в пределах ААП) и южные территории Архангельской области рассматриваются как перспективные на обнаружение новых коренных источников алмазов (Shchukina, Shchukin, 2018; Shchukina et al., 2019; Agasheva, 2021). Несмотря на то что всестороннее изучение и магматических объектов ААП (Парсаданян и др., 1996; Mahotkin et al., 2000; Богатиков и др., 2007; Кононова и др., 2007; Kargin et al., 2021), и ИМК из кимберлитовых трубок ААП (Lehtonen et al., 2009; Afanasiev et al., 2013; Сазонова и др., 2015; Shchukina et al., 2017; Агашева и др., 2022) продолжается несколько десятилетий, опубликованных данных по интерпретации ИМК из шлихоминералогических проб, отобранных на северных территориях Восточно-Европейской платформы, критически мало (Шербакова, 2005; Shchukina et al., 2019). Более того, исследования по разнообразию морфологии ИМК как из магматических объектов, так и из современного аллювия единичны (Шербакова, 2005; Афанасьев и др., 2008; Shchukina, Shchukin, 2018). Тем не менее даже минимальная информация, представленная в виде опубликованных результатов, указывает на то, что морфология ИМК в этом регионе специфична и, безусловно, требует дополнения в виде накопления данных по особенностям морфогенеза ИМК как из магматических объектов и перекрывающих их или расположенных вблизи них осадочных пород, так и из материала современного аллювия. При поисково-разведочных работах на алмазы в этом регионе гранат рассматривается как наиболее информативный минерал среди ИМК (Агашева и др., 2022).

В настоящей работе представлены первые результаты изучения морфологии ксенокристов гранатов из пород кратерной (песчаников, туфопесчаников) и диатремовой (кимберлита) частей высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба. Выявление типоморфных особенностей гранатов

из различных частей кимберлитовой трубки позволит использовать эти данные для усовершенствования шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений по типоморфным особенностям ИМК в этом регионе.

КРАТКИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Кимберлитовая трубка им. В. Гриба расположена в центральной части ААП; ее возраст оценен как 372 ± 8 млн лет (Шевченко и др., 2004) и 376 ± 3 млн лет (Ларионова и др., 2016). Трубка прорывает осадочные породы (преимущественно песчаники) вендского возраста и перекрывается толщами терригенно-карбонатных пород среднекаменноугольного возраста и рыхлых четвертичных отложений, общая мощность которых составляет около 70 м. В строении трубки им. В. Гриба выделены кратерная и диатремовая фации. Кратерная часть мощностью от 90 до ≈ 130 м представлена разнообразными вулканогенно-осадочными и осадочными породами. Диатремовая часть состоит из ксенотуфобрекчии и кимберлита. Обобщенные данные о локациях, формах и размерах, структурах и составе магматических объектов ААП представлены в (Agasheva, 2021).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

Для настоящего исследования был отобран керн одной заверочной скважины, пробуренной в центральной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба, из интервала от 70 до 174 м от поверхности. Породы являются образованиями кратерной фации трубки и представлены песчаниками от почти рыхлых и слабосцементированных разновидностей до хорошо сцементированных образцов. Образцы, отобранные из пород кратерной части трубки, были раздроблены и обработаны методами магнитной сепарации и разделения в тяжелых жидкостях. Из концентрата минералов тяжелой фракции с помощью бинокулярного микроскопа (Микромед МСЗ Zoom) были отобраны все визуально диагностируемые зерна гранатов (475 зерен). Для сравнения, из 1100 зерен ксенокристов гранатов, отобранных методом случайной выборки из концентрата минералов тяжелой фракции кимберлита диатремовой части, были извлечены 180 зерен гранатов, представляющих четыре установленных ранее (Гудимова и др., 2022) цветовые группы: фиолетовые, красные, красно-оранжевые и оранжевые. Изучение морфологических особенностей гранатов (формы, трещиноватости, микрорельефа поверхности, степени механического износа, наличия гипергенных изменений и хронологические взаимоотношения разного рода скульптур) проводилось с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии (JEOL 6380 LA, TESCAN MIRA 3 LMU)

в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кратерная часть

В кратере кимберлитовой трубки гранаты представлены фиолетовыми (50%), оранжевыми (12), красно-оранжевыми (33) и дихроичными (сине-зелеными при дневном свете, фиолетовыми при желтом искусственном освещении; 5%) разновидностями (рис. 1а). В верхних частях кратера (70–150 м) преобладают фиолетовые гранаты, с глубиной (150–174 м) увеличивается доля оранжевых гранатов. Дихроичные зерна встречаются в незначительных количествах и не имеют корреляции с глубиной.

Среди гранатов преобладают обломки и осколки зерен неправильной формы (рис. 2а, б). Поверхность зерна, не затронутая сколами, бугорчатая, угловатая. Целые и слабо поврежденные зерна встречаются редко (<10%) и, как правило, представляют собой угловатые трещиноватые индивиды неправильной формы (рис. 2в). Исключение составляет проба из интервала 156–162 м, где в большом количестве присутствуют округлые гранаты фиолетового и оранжевого цветов с контрастной бугорчатой поверхностью (75 зерен); единичные зерна таких гранатов отмечены также в пробах из

интервала 135–168 м (рис. 2г). В пробах из интервала 145–168 м обнаружены обломки округлых зерен с гладкой матовой поверхностью (рис. 2д). На незначительном количестве (3% от общего числа) зерен присутствуют серии субпараллельных секущих трещин. Такие трещины отмечены как на осколках, так и на зернах хорошей сохранности (рис. 2е). На поверхностях сколов часто присутствуют тонкие корочки серо-зеленого цвета (см. рис. 2е).

На 29 зернах (6%) наблюдается пирамидально-черепитчатый рельеф (рис. 3, 4). На 16 зернах он развит локально в виде зачаточных структур, фиксируемых только при больших увеличениях на сканирующем электронном микроскопе (см. рис. 3); на 13 зернах (3%) встречается хорошо развитый рельеф, покрывающий значительную часть зерна (см. рис. 4). На зернах с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом видно, что некоторые пирамидки имеют притупленные вершины (см. рис. 4а). Развитие пирамидально-черепитчатого рельефа характерно только для фиолетовых, оранжевых и красно-оранжевых гранатов. На пяти зернах оранжевых гранатов из пробы с интервала глубин 145–150 м присутствует каплевидный рельеф (Харьков, Вологовский, 1968) (рис. 5).

Диатремвая часть

Согласно ранее проведенным исследованиям (Гудимова и др., 2022), гранаты диатремвой части представлены фиолетовыми (46%), красно-оранжевыми (22), оранжевыми (21) и красными (11%) цветовыми группами (см. рис. 1б). Большая часть зерен представлена осколками (рис. 6а, б), относительно целые зерна (рис. 6в–е) составляют менее 10%. Поверхность зерен, не затронутая сколами, в большинстве случаев угловатая, пологобугорчатая (см. рис. 6в, г); нередко на зернах встречаются “морозные узоры” (см. рис. 6д, е). Интересную морфологию имеет зерно, изображенное на рис. 6г: в целом оно имеет округлую форму с ровной, слегка шероховатой поверхностью, но на сколе видно, что внешняя оболочка, определяющая овальную форму зерна, отделена трещинами от ядра с грубым угловатым рельефом. Для 15% зерен установлены серии субпараллельных секущих трещин (см. рис. 6б). Такие трещины более характерны для относительно целых зерен, но присутствуют и на осколках. На поверхностях сколов встречаются тонкие корочки серо-зеленого цвета (см. рис. 6а). Более чем для трети изученных гранатов из диатремы характерен пирамидально-черепитчатый рельеф. Количество гранатов с его следами увеличивается в следующем ряду: фиолетовые (21.0%), красно-оранжевые (42.9), красные (44.6), оранжевые (53.0%).

В большинстве случаев пирамидально-черепитчатый рельеф развит слабо на небольших участ-

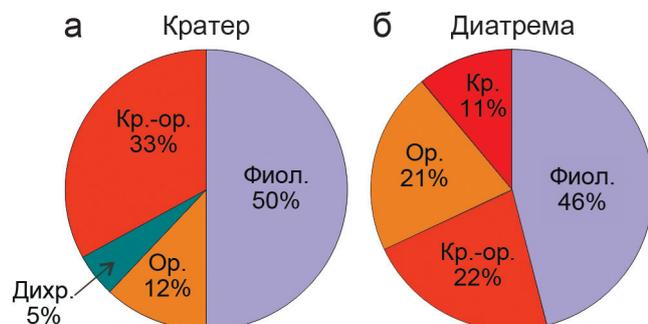


Рис. 1. Диаграммы соотношения разных цветовых разновидностей гранатов из кратерной (а) и диатремвой (б) частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Данные по гранатам из диатремвой части трубки (Гудимова и др., 2022): фиол. – фиолетовые, кр. – красные, кр.-ор. – красно-оранжевые, ор. – оранжевые, дихр. – дихроичные.

Fig. 1. Correlation diagrams of different color varieties of garnets from the crater (a) and diatreme (b) parts of the V. Grib kimberlite pipe.

Data on garnets from the diatreme part of the pipe (Gudimova et al., 2022): фиол. – violet, кр. – red, кр.-ор. – red-orange, ор. – orange, дихр. – dichroic.

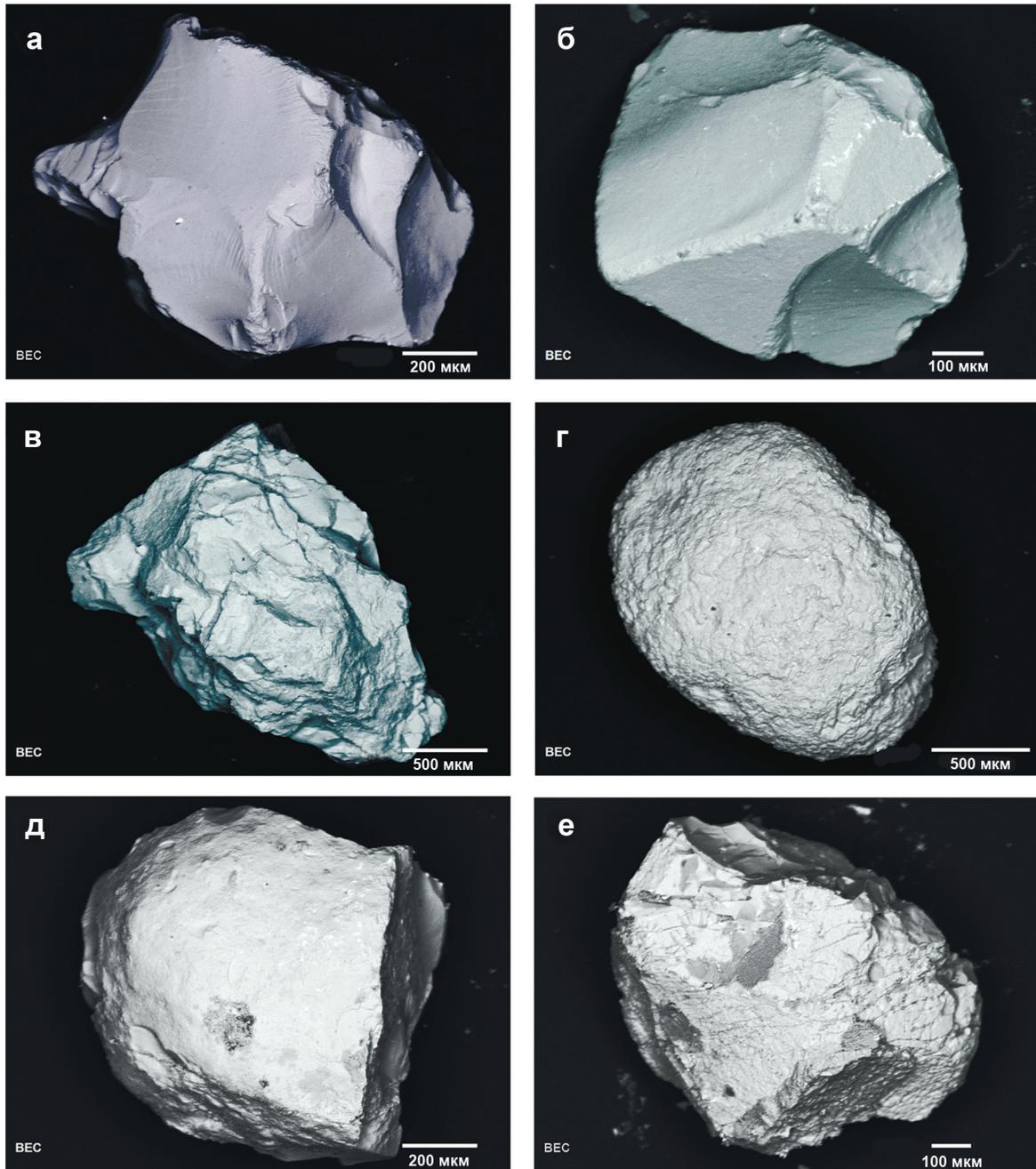


Рис. 2. Морфологические особенности гранатов из кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

а, б – осколок; в – угловатое зерно неправильной формы; г – целое округлое зерно с бугорчатой поверхностью; д – обломок зерна с гладкой матовой поверхностью; е – зерно хорошей сохранности с субпараллельными секущими трещинами. Здесь и на рис. 3–8 изображения в обратнорассеянных электронах.

Fig. 2. Morphological features of garnets from the crater part of the V. Grib kimberlite pipe.

а, б – fragment of grain; в – irregularly shaped angular grain; г – whole rounded grain with a tubercles surface; д – grain fragment with a smooth matte surface; е – well-preserved grain with subparallel cracks. Here and in Fig. 3–8 images in backscattered electrons.

ках зерна (рис. 7). Реже встречается хорошо развитый рельеф, покрывающий значительную часть зерна (11% зерен) (рис. 8). Отчетливо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф более харак-

терен для фиолетовых и оранжевых гранатов; на красных и красно-оранжевых, как правило, развиты лишь зачаточные структуры пирамидально-черепитчатого рельефа.

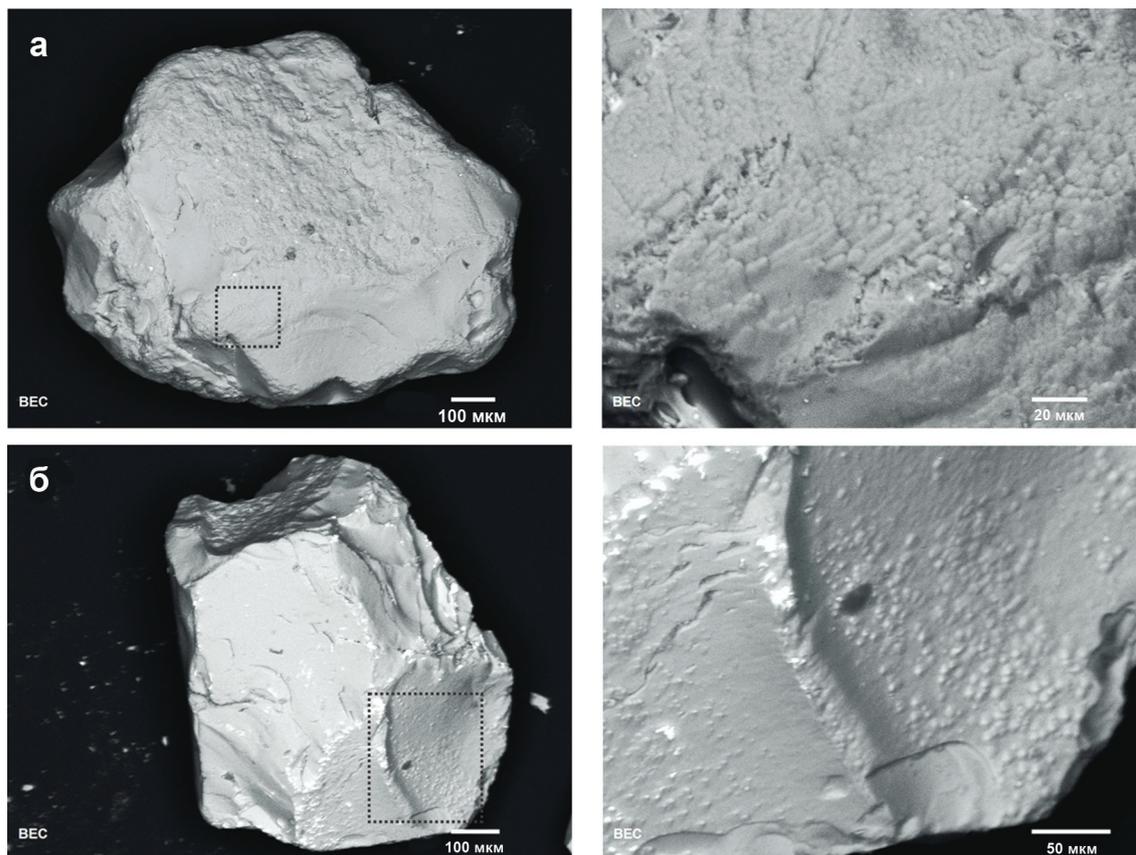


Рис. 3. Зачаточные структуры пирамидально-черепитчатого рельефа на зернах гранатов из кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Здесь и на рис. 4, 5 пунктирной линией показана область, изученная при более высоких увеличениях.

Fig. 3. The initial stages of development of pyramidal shingle-like relief on garnet grains from the crater part of the V. Grib kimberlite pipe.

Here and in Fig. 4, 5 dotted line shows the area examined at higher magnifications.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Морфология гранатов из кратерной и диатремовой частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба является результатом множества процессов, которые последовательно изменяли облик зерен. Согласно ранее проведенным исследованиям (Афанасьев и др., 2001), в истории магматического морфогенеза гранатов выделяются три основных этапа: 1) идиоморфный рост; 2) оплавление; 3) келифитизация. После формирования кимберлитового тела морфогенез гранатов определяется воздействием на них гидротермальных растворов с постепенным снижением их температуры. Основными факторами морфогенеза на этой стадии являются коррозионное растрескивание и хлоритизация (Афанасьев и др., 2001).

Ограненные гранаты в изученном материале не обнаружены. Зерна с фрагментами оплавленной поверхности среди гранатов из диатремовой ча-

сти отсутствуют, в кратерной части найдены всего в количестве трех штук (см. рис. 2д). Келифитовые каймы на гранатах из кратера и диатремы не встречаются. Для ксенолитов мантийных пород из кимберлитовой трубки им. В. Гриба также не отмечено широкое распространение келифитовых кайм (Щукина и др., 2015).

На позднемагматическом и гидротермальном этапах под воздействием поверхностно-активных веществ запускается механизм коррозионного растрескивания под влиянием гидротермальных растворов и флюидов (Афанасьев и др., 2000). Этот механизм представляет собой хрупкую релаксацию внутренних напряжений, сформированных в глубинных условиях. В первую очередь на раннегидротермальном этапе реализуются в трещины зоны максимального напряжения, ориентированные главным образом по ромбододекаэдру (Афанасьев и др., 2000). В морфологии изученных гранатов это выражается в развитии субпараллельных секу-

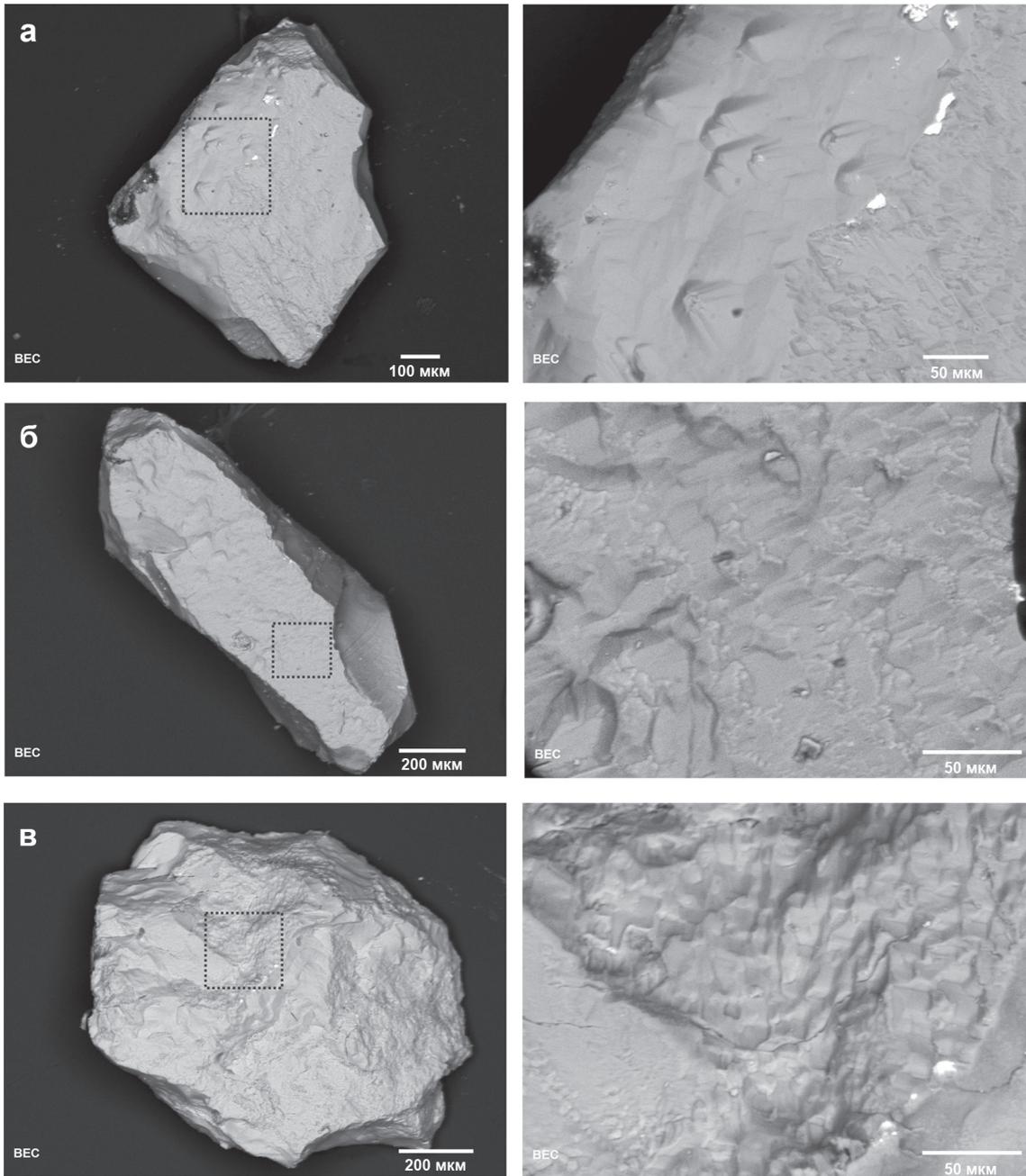


Рис. 4. Хорошо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф на зернах гранатов из кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Fig. 4. A well-developed pyramidal shingle-like relief on garnet grains from the crater part of the V. Grib kimberlite pipe.

щих трещин, соответствующих в структуре граната ромбододекаэдру, и наличии осколков с плоскими субпараллельными сколами (см. рис. 2e; 6б). Коррозионное растрескивание широко проявлено на гранатах как из диатремы, так и из кратера. Однако в диатремной части значительно большее количество зерен представлено осколками с площадью поверхности скола свыше 50%. Доля осколков

в диатремной части составляет примерно 27%, а в кратерной – около 12%. Также в диатремной части доля зерен с субпараллельными трещинами достигает приблизительно 15%, а в кратерной – не более 3%. Более высокая степень коррозионного растрескивания гранатов из диатремной части, вероятно, связана с более медленным процессом остывания и более длительным воздействием поверхностно-

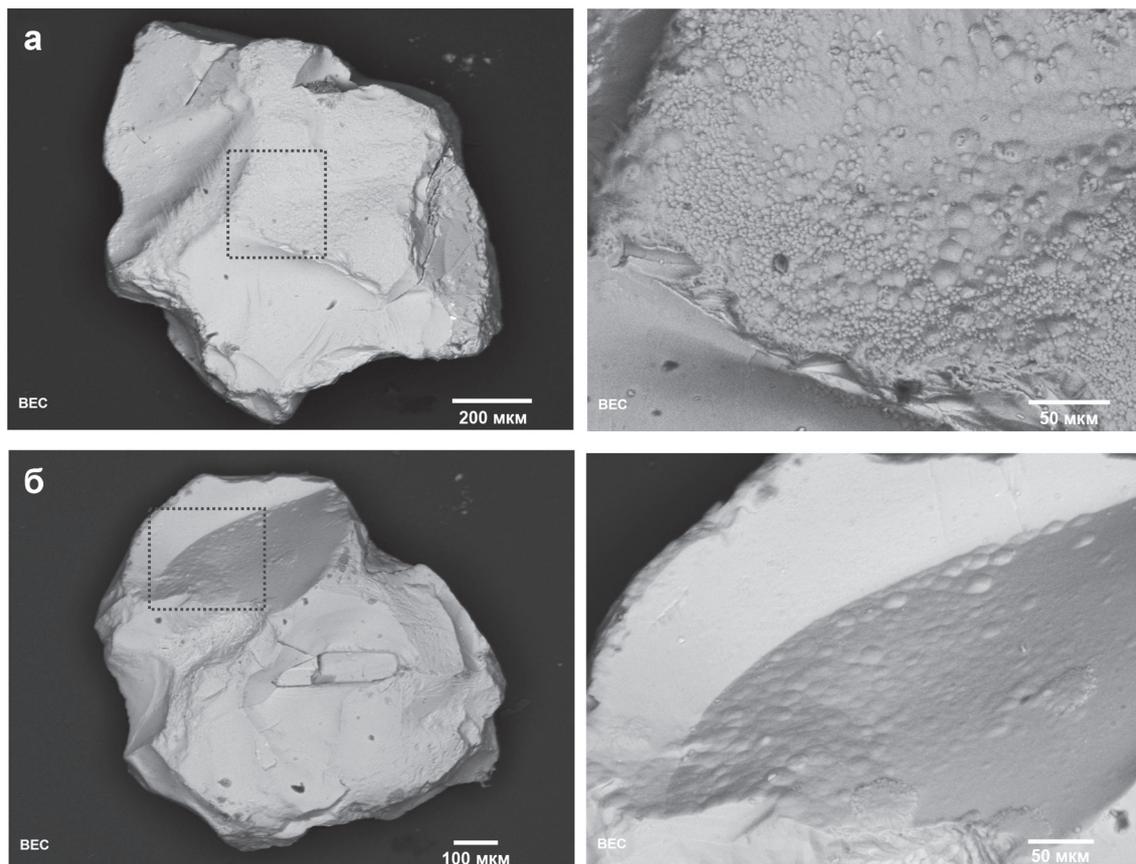


Рис. 5. Каплевидный рельеф на зернах гранатов из кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Fig. 5. Drop-shaped relief on garnet grains from the crater part of the V. Grib kimberlite pipe.

активных веществ, отделяемых на позднемагматических этапах. Вслед за реализацией секущих трещин в плоскостях ромбододекаэдра начинается растрескивание по зонам с меньшим уровнем запасенной упругой энергии, формируются произвольно ориентированные сколы, обуславливающие основной морфологический мотив изученных гранатов – угловатые зерна, обломки неправильной формы (см. рис. 2а, б; 6в).

Параллельно с коррозионным растрескиванием под воздействием раннегидротермальных растворов по стенкам додекаэдрических трещин гранат начинает замещаться хлоритом. Это приводит к развитию тонкого черепитчатого рельефа, “морозных узоров” (см. рис. 6д, е), червеобразных каналов травления по фронту реакции хлоритизации (Афанасьев, 1985). Наиболее вероятно, что зачаточные структуры пирамидально-черепитчатого рельефа (см. рис. 3; 7), развитые по поверхностям сколов на исследованных образцах, формируются в результате растворения на раннегидротермальном этапе, а фрагменты тонких серо-зеленых корочек на поверхностях сколов являются измененным хлоритом (см. рис. 2е; 6а). Тонкий пирамидально-

черепитчатый рельеф широко проявлен на гранатах из диатремовой части ($\approx 31\%$) и в значительно меньшей степени на гранатах из кратера ($\approx 4\%$). Это может быть связано с тем, что гранаты из диатремы дольше находились под воздействием гидротермальных растворов. На этом заканчивается формирование облика гранатов, который мы считаем “первичным”.

Тем не менее в изученном материале обнаружены зерна гранатов, имеющие морфологические признаки экзогенного этапа (Афанасьев и др., 2001, 2010). К этому этапу относится формирование ярко выраженного пирамидально-черепитчатого рельефа, в том числе с притупленными вершинами пирамид (см. рис. 4; 8), и каплевидного рельефа, который обнаружен на данном этапе исследования только на зернах гранатов из кратерной части трубки (см. рис. 5).

Ярко выраженный пирамидально-черепитчатый рельеф присутствует на гранатах из кратерной и диатремовой частей кимберлитового тела. Ранее было установлено (Афанасьев и др., 2001, 2010), что образование данного рельефа на гранатах может быть связано с абсолютно разными фактора-

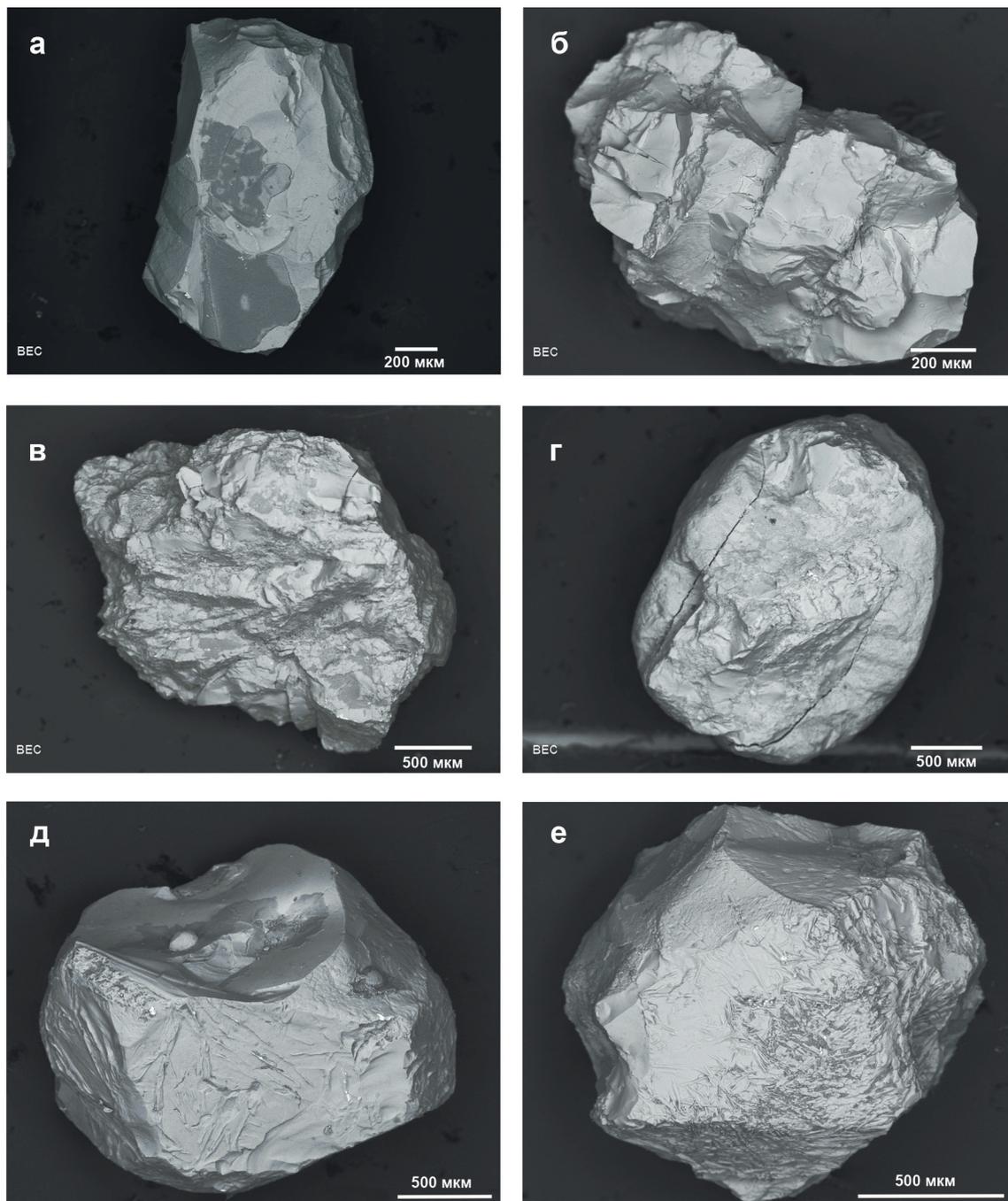


Рис. 6. Морфология гранатов из диатремной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

а – осколок; б – осколок с субпараллельными трещинами; в – целое зерно с угловатой поверхностью; г – округлое зерно с шероховатой внешней зоной и угловатым ядром; д, е – зерна с “морозными узорами”.

Fig. 6. Morphology of garnets from the diatreme part of the V. Grib kimberlite pipe.

а – a fragment of grain; б – a fragment of grain with subparallel cracks; в – a whole grain with an angular surface; г – a rounded grain with a rough rim and an angular core; д, е – grains with “frosty patterns”.

ми: 1) постмагматическими изменениями кимберлита; 2) метасоматическим воздействием интрузий дифференцированных траппов на осадочные коллекторы или кимберлит; 3) преобразованием по-

род в условиях метазенеза. Однако для ААП показано, что пирамидально-черепитчатый рельеф может развиваться и на гранатах из осадочных коллекторов, в том числе по механически окатанным

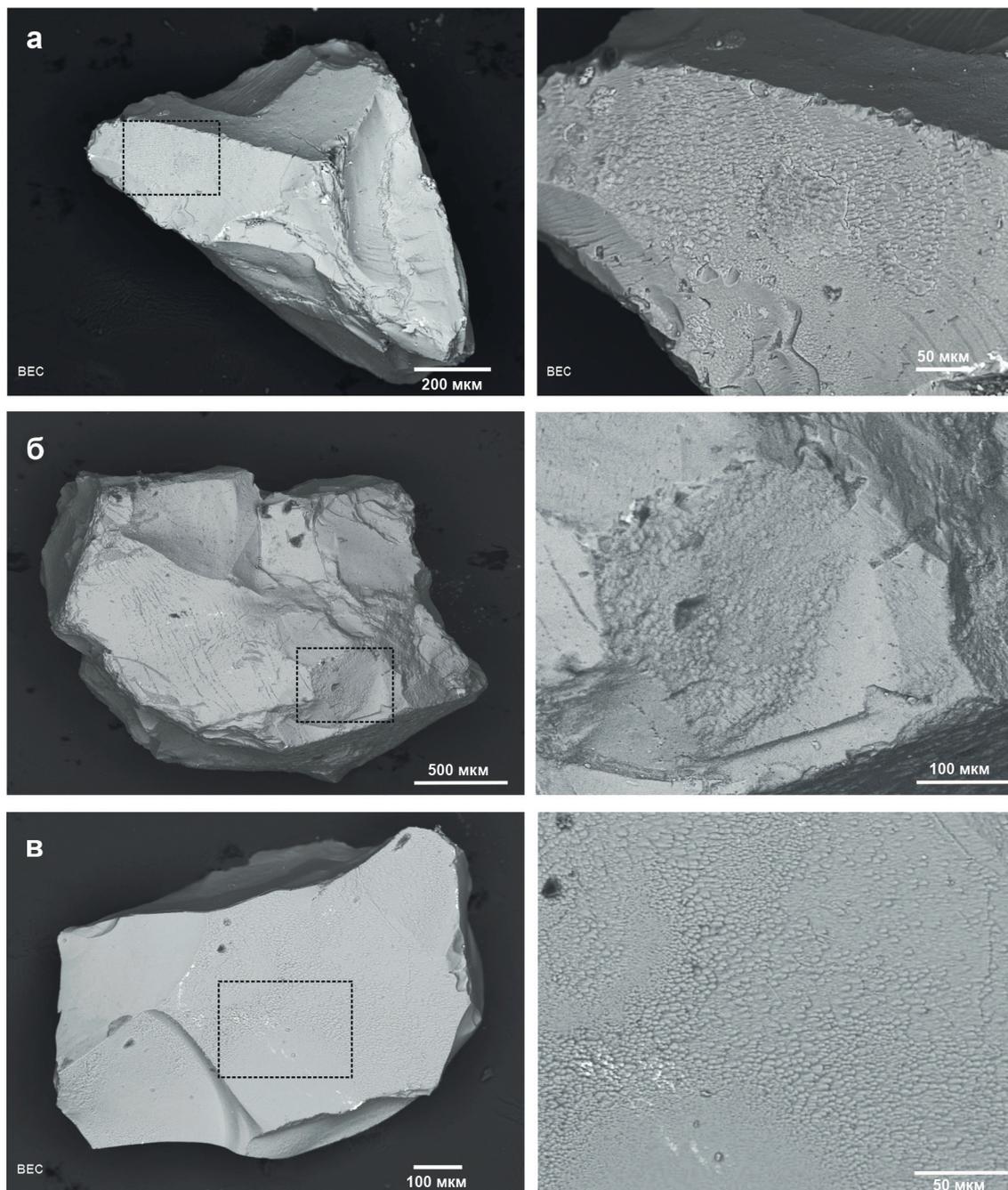


Рис. 7. Зачаточные структуры пирамидально-черепитчатого рельефа на гранатах из диатремовой части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Fig. 7. The initial stages of development of pyramidal shingle-like relief on garnet grains from the diatreme part of the V. Grib kimberlite pipe.

зернам гранатов (Афанасьев и др., 2008), что связывается с длительной циркуляцией грунтовых вод при температуре дневной поверхности (Афанасьев и др., 2008). Поэтому вполне вероятно, что хорошо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф на гранатах из кратера и диатремы имеет разную природу. Кратерная часть в значительной мере конта-

минирована песком вмещающих пород (Agasheva, 2021) и проницаема для грунтовых вод. Бурый цвет пород кратерной части на всю ее глубину, обусловленный окисленным железом, прямо указывает на промывку грунтовыми водами, обогащенными кислородом (Афанасьев и др., 2008). Поэтому хорошо развитый пирамидально-черепитчатый

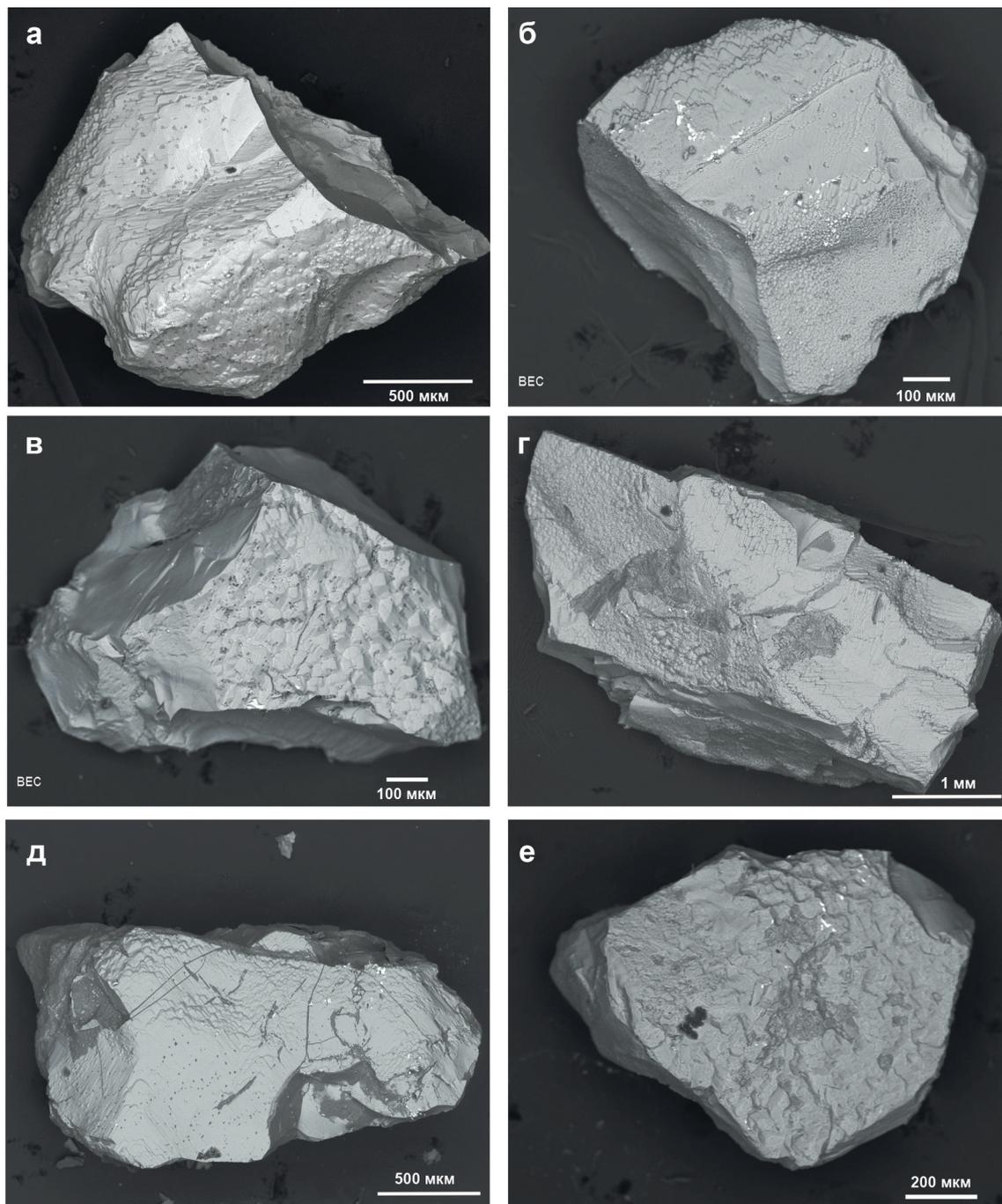


Рис. 8. Хорошо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф на зернах гранатов из диатремовой части кимберлитовой трубки им. В. Гриба.

Fig. 8. A well-developed pyramidal shingle-like relief on garnet grains from the diatreme part of the V. Grib kimberlite pipe.

рельеф на гранатах из кратера может являться результатом длительной циркуляции холодных грунтовых вод. Диатремовая часть сложена плотным кимберлитом и находится на большей глубине, что осложняет активную циркуляцию грунтовых вод, но в диатреме не исключено воздействие постаг-

матических гидротермальных растворов, которые также могут приводить к развитию пирамидально-черепитчатого рельефа.

Каплевидный рельеф в большинстве случаев характерен для гранатов из вторичных коллекторов и верхних частей профиля коры выветрива-

ния на кимберлитах, т. е. зоны конечного гидролиза (Харьков, 1978). Развитие такого рельефа является результатом растворения гранатов по кубоидному типу в условиях латеритной коры выветривания (Афанасьев и др., 1980). Однако в кратерной части трубки им. В. Гриба гранаты с каплевидным рельефом обнаружены в пробах с интервала глубин 150–168 м (см. рис. 5). Формирование каплевидного рельефа на этих гранатах может быть связано с воздействием грунтовых вод, обогащенных органическими кислотами, на породы кратера. Присутствие таких гранатов на столь большой глубине может объясняться тем, что вмещающие породы трубки им. В. Гриба (вендские песчаники) являются слаболитифицированными и хорошо проницаемыми для грунтовых вод.

Выявление разных морфологических типов гранатов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба и определение условий, влияющих на формирование той или иной морфологии зерен, имеют большое значение при поисково-разведочных работах на алмазы на северных территориях Восточно-Европейской платформы, в частности в пределах Архангельской области. Для ААП установлен ряд специфических особенностей поисковой обстановки, резко отличных от таковых для Якутской алмазоносной провинции: 1) низкое содержание ИМК в большинстве магматических объектов; 2) наличие у большинства магматических трубок кратерных частей мощностью от нескольких десятков метров до 300 м; 3) перекрытие всех магматических объектов осадочными породами палеозойского и кайнозойского возрастов мощностью от 20 до >100 м. Эти особенности в первую очередь влияют на то, что количество ИМК в ореолах рассеивания магматических объектов ААП достаточно низкое. Несмотря на то что использование исключительно шлихоминералогического метода на территориях Архангельской области, которая является “закрытой” в поисковом плане (т. е. трубки не выходят на поверхность), не приведет к обнаружению конкретного магматического объекта, этот метод является неотъемлемой частью геолого-разведочных работ на алмазы в регионе для выявления площадей, перспективных на обнаружение коренных источников алмаза. В связи с этим корректная интерпретация морфологии зерен гранатов из шлихоминералогических проб приобретает особо важное значение, в первую очередь для минимизации пропусков потенциально перспективных территорий.

Факт обнаружения в кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба гранатов с каплевидным рельефом ставит под вопрос однозначную интерпретацию таких зерен из шлихоминералогических проб как признака вторичного коллектора. В связи с этим только максимальная степень растворения гранатов с формированием кубоидов с большей долей вероятности указывает на переотложен-

ный характер ореола, поскольку кубоиды, как правило, формируются по хорошо окатанным зернам. Более того, исследование показало, что зерна гранатов с пирамидально-черепитчатым рельефом могут быть обнаружены не только в кратере кимберлитовой трубки, как считалось ранее (Афанасьев и др., 2008), но и в ее глубинной диатремовой части. Такой тип рельефа формируется в несколько этапов и под воздействием различных факторов. Интерпретация зерен гранатов с зачаточными структурами пирамидально-черепитчатого рельефа из шлихоминералогических проб не может вызывать трудностей: при отсутствии видимых признаков механического износа такие зерна указывают на близость коренного источника. Однако интерпретация гранатов с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом не столь однозначна: зерна с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом, имеющие признаки механического износа, однозначно указывают на переотложенный характер ореола, но гранаты с ярко выраженным пирамидально-черепитчатым рельефом без механического износа могут присутствовать как в кимберлитовом теле, так и в переотложенных ореолах. Необходимо отметить, что преобладающее большинство пиропов лерцолитовой ассоциации (Sobolev et al., 1973), в том числе имеющих высокие концентрации Cr_2O_3 (5–12 мас. %), из недавно обнаруженного на территории ААП магматического объекта KL-01, материал которого интерпретирован как составляющая кратерной части кимберлитовой трубки (Agasheva, 2021), как раз имеют хорошо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф без признаков механического износа. Эти зерна гранатов были извлечены из пород, представляющих интервал от 80 до 240 м от поверхности (Agasheva, 2021). Поэтому при обнаружении зерен гранатов с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом без следов механического износа необходимо проводить анализ морфологических особенностей всей ассоциации ИМК для надежной оценки поисковой ситуации.

Принимая во внимания итоги исследования, при интерпретации результатов применения шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений по типоморфным особенностям ИМК на северных территориях Восточно-Европейской платформы можно достичь повышения результативности геолого-разведочных работ на алмазы в данном регионе и минимизировать пропуск перспективных площадей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения морфологических особенностей зерен гранатов из кратерной и диатремовой частей высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба показали, что наряду с граната-

ми, имеющими “первичную” морфологию, в кимберлитовом теле присутствуют гранаты, морфология которых могла сформироваться только под воздействием постмагматических процессов. Обнаружение в кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба гранатов с кашлевидным рельефом ставит под вопрос интерпретацию подобных зерен из шлихоминералогических проб как признака вторичного коллектора. В связи с этим только максимальная степень растворения гранатов с формированием кубоидов с большей долей вероятности указывает на переотложенный характер ореола. Более того, исследование показало, что зерна гранатов с пирамидально-черепитчатым рельефом могут быть обнаружены не только в кратере кимберлитовой трубки, но и в ее глубинной диатремовой части. Процесс формирования такого типа рельефа происходит в несколько этапов и под воздействием различных факторов. Интерпретация зерен гранатов с зачаточными структурами пирамидально-черепитчатого рельефа из шлихоминералогических проб не может вызывать трудностей: при отсутствии видимых признаков механического износа такие зерна указывают на близость коренного источника. Однако интерпретация гранатов с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом не столь однозначна: зерна, имеющие признаки механического износа, однозначно указывают на переотложенный характер ореола, но гранаты без механического износа могут встречаться как в кимберлитовом теле, так и в переотложенных ореолах. Поэтому при обнаружении зерен гранатов с хорошо развитым пирамидально-черепитчатым рельефом без следов механического износа следует проводить анализ морфологических особенностей всей ассоциации ИМК для надежной оценки поисковой ситуации.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность д. г.-м. н. В.П. Афанасьеву за помощь в интерпретации морфологии зерен гранатов и двум анонимным рецензентам за ценные замечания, которые помогли существенно повысить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агашева Е.В., Агашев А.М., Гудимова А.И., Малыгина Е.В., Червяковский В.С., Прусакова Н.А., Шукин В.С., Голубев Ю.К., Похиленко Н.П. (2022) Состав гранатов из кимберлитов Архангельской области как один из признаков алмазоносности. *Отчет. геол.*, (1), 71-91.
- Афанасьев В.П. (1985) Генезис пирамидально-черепитчатого рельефа растворения на гранатах пироп-альмандинового ряда. *Зап. Всесоюз. минерал. о-ва*, **114**(1), 73-80.
- Афанасьев В.П., Логвинова А.М., Зинчук Н.Н. (2000) Эффект коррозионного растрескивания мантийных минералов. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (3), 43-52.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. (2001) Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: СО РАН, 276 с.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. (2010) Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 650 с.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Харьков А.Д., Соколов В.Н. (1980) Закономерности изменения мантийных минералов в коре выветривания кимберлитовых пород. *Минералогия зоны гипергенеза*. (Отв. ред. Д.Г. Сапожников). М.: Наука, 45-54.
- Афанасьев В.П., Шпилева Д.В., Вержак В.В., Солотчина Э.П. (2008) О новом типе экзогенных изменений кимберлитов и их индикаторных минералов. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (6), 20-27.
- Богатиков О.А., Кононова В.А., Носова А.А., Кондрашов И.А. (2007) Кимберлиты и лампроиты Восточно-Европейской платформы: петрология и геохимия. *Петрология*, **15**(4), 339-360.
- Гудимова А.И., Агашева Е.В., Агашев А.М., Похиленко Н.П. (2022) Состав, строение и термальный режим литосферной мантии в районе высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция): данные по химическому составу ксенокристов граната и хромдиопсида. *Докл. РАН*, **505**(1), 38-45.
- Кононова В.А., Голубева Ю.Ю., Богатиков О.А., Каргин А.В. (2007) Алмазоносность кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельская область). *Геол. рудн. месторожд.*, **49**(6), 483-505.
- Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Лебедева Н.М., Носова А.А., Третьяченко В.В., Травин А.В., Каргин А.А., Юдин Д.С. (2016) Возраст кимберлитов Архангельской провинции: Rb-Sr, ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопно-геохронологические и минералогические данные для флогопита. *Петрология*, **24**(6), 607-639.
- Парсаданян К.С., Кононова В.А., Богатиков О.А. (1996) Источники гетерогенного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. *Петрология*, **4**(5), 496-517.
- Сазонова Л.В., Носова А.А., Каргин А.В., Борисовский С.Е., Третьяченко В.В., Абазова З.М., Грибань Ю.Г. (2015) Оливин кимберлитов трубко Пионерская и им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция): типы, состав, происхождение. *Петрология*, **25**(3), 251-284.
- Ферсман А.Е. (1940) Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М.: АН СССР, 446 с.
- Харьков А.Д. (1978) Минералогические основы поисков алмазных месторождений. М.: Недра, 136 с.
- Харьков А.Д., Волотовский А.Г. (1968) О природе скульптур на зернах пироба из осадочных пород. *Минерал. сб. Львов. ун-та*, **22**(4), 399-402.
- Шевченко С.С., Лохов К.И., Сергеев С.А. (2004) Изотопные исследования во ВСЕГЕИ. Перспективы использования результатов в целях прогноза и поисков месторождений алмазов. *Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее. Мат-лы науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию открытия первой алмазоносной трубки “Зарница”*. СПб.: ВСЕГЕИ, 383-387.

- Щербакова Т.Е. (2005) Типоморфные характеристики минералов кимберлитов в ореолах рассеяния и их использование при поисках месторождений алмазов Зимнего Берега. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ЦНИГРИ, 201 с.
- Щукина Е.В., Агашев А.М., Костровицкий С.И., Похиленко Н.П. (2015) Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция. *Геология и геофизика*, **56**(12), 2153-2172.
- Afanasiev V.P., Ashchepkov I.V., Verzhak V.V., O'Brien H., Palessky S.V. (2013) PT conditions and trace element variations of microilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangelsk region, NW Russia. *J. Asian Earth Sci.*, **70-71**, 45-63.
- Agasheva E.V. (2021) Magmatic Material in Sandstone Shows Prospects for New Diamond Deposits within the Northern East European Platform. *Minerals*, **11**(4), 339. <https://doi.org/10.3390/min11040339>
- Kargin A.V., Nosova A.A., Sazonova L.V., Tretyachenko V.V., Larionova Yu.O., Kovalchuk E.V. (2021) Ultramafic Alkaline Rocks of Kepino Cluster, Arkhangelsk, Russia: Different Evolution of Kimberlite Melts in Sills and Pipes. *Minerals*, **11**(5), 540. <https://doi.org/10.3390/min11050540>
- Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V. (2009) Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle. *Lithos*, **112**(2), 924-933.
- Mahotkin I.L., Gibson S.A., Thompson R.N., Zhuravlev D.Z., Zherdev P.U. (2000) Late Devonian diamondiferous kimberlite and alkaline picrite (proto-kimberlite?) magmatism in the Arkhangelsk region, Russia. *J. Petrology*, **41**(2), 201-227.
- Shchukina E.V., Shchukin V.S. (2018) Diamond exploration potential of the northern east European platform. *Minerals*, **8**(5), 189. <https://doi.org/10.3390/min8050189>
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Pokhilenko N.P. (2017) Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk region, NW Russia. *Geoscience Frontiers*, **8**(4), 641-651.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Shchukin V.S. (2019) Diamond-Bearing Root Beneath the Northern East European Platform (Arkhangelsk Region, Russia): Evidence from Cr-Pyrope Trace-Element Geochemistry. *Minerals*, **9**(5), 261. <https://doi.org/10.3390/min9050261>
- Sobolev N.V., Lavrentyev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. (1973) Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**(1), 39-52. <https://doi.org/10.1007/BF00371762>
- gion as a proxy for diamond prospectivity. *Otech. Geol.*, (1), 71-91. (In Russ.)
- Afanasiev V.P. (1985) Genesis of pyramidal shingle-like relief dissolution relief on pyrope-almandine garnets. *Zap. Vsesoyuz. mineral. o-va*, **114**(1), 73-80. (In Russ.)
- Afanasiev V.P., Ashchepkov I.V., Verzhak V.V., O'Brien H., Palessky S.V. (2013) PT conditions and trace element variations of microilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangelsk region, NW Russia. *J. Asian Earth Sci.*, **70-71**, 45-63.
- Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. (2001) Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals. Novosibirsk, SO RAN, 276 p. (In Russ.)
- Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. (2010) Exploration mineralogy of diamond. Novosibirsk, Geo, 650 p. (In Russ.)
- Afanasev V.P., Zinchuk N.N., Kharkiv A.D., Sokolov V.N. (1980) Patterns of changes in mantle minerals in the weathering crust of kimberlite rocks. *Minerageny of the hypergenesis zone*. (Ed. by D.G. Sapozhnikov). Moscow, Nauka Publ., 45-54. (In Russ.)
- Afanasiev V.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N. (2000) Effect of corrosion cracking of mantle minerals. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, (3), 43-52. (In Russ.)
- Afanasiev V.P., Shpilevaya D.V., Verzhak V.V., Solotchina E.P. On a new type of exogenous alteration of kimberlites and their indicator minerals. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, (6), 20-27. (In Russ.)
- Bogatikov O.A., Kononova V.A., Nosova A.A., Kondrashov I.A. (2007) Kimberlites and lamproites of the East European platform: petrology and geochemistry. *Petrologiya*, **15**(4), 339-360. (In Russ.)
- Gudimova A.I., Agasheva E.V., Agashev A.M., Pokhilenko N.P. (2022) Composition, structure and thermal state of the lithospheric mantle beneath high diamondiferous V. Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk diamondiferous province): evidence from major-element compositions of garnet and chromium diopside xenocrysts. *Dokl. RAN*, **505**(1), 38-45. (In Russ.)
- Kargin A.V., Nosova A.A., Sazonova L.V., Tretyachenko V.V., Larionova Yu.O., Kovalchuk E.V. (2021) Ultramafic Alkaline Rocks of Kepino Cluster, Arkhangelsk, Russia: Different Evolution of Kimberlite Melts in Sills and Pipes. *Minerals*, **11**(5), 540. <https://doi.org/10.3390/min11050540>
- Kharkiv A.D. (1978) Mineralogical foundations of prospecting for diamond deposits. Moscow, Nedra Publ., 136 p. (In Russ.)
- Kharkiv A.D., Volotovskiy A.G. (1968) About the nature of sculptures on pyrope grains from sedimentary rocks. *Mineral. sb. L'vov. un-ta*, **22**(4), 399-402. (In Russ.)
- Kononova V.A., Golubeva Yu.Yu., Bogatikov O.A., Kargin A.V. (2007) Diamond resource potential of kimberlites from the Zimny Bereg field (Arkhangelsk oblast). *Geol. rudn. mestorozhd.*, **49**(6), 483-505. (In Russ.)
- Larionova Yu.O., Sazonova L.V., Lebedeva N.M., Nosova A.A., Tretyachenko V.V., Travin A.V., Kargin A.A., Yudin D.S. (2016) Kimberlite age in the Arkhangelsk province: Isotopic geochronologic Rb-Sr and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and mineralogical data on phlogopite. *Petrologiya*, **24**(6), 607-639. (In Russ.)
- Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V. (2009) Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Rus-

REFERENCES

- Agasheva E.V. (2021) Magmatic Material in Sandstone Shows Prospects for New Diamond Deposits within the Northern East European Platform. *Minerals*, **11**(4), 339. <https://doi.org/10.3390/min11040339>
- Agasheva E.V., Agashev A.M., Gudimova A.I., Malygina E.V., Chervyakovskiy V.S., Prusakova N.A., Shchukin V.S., Golubev Yu.K., Pokhilenko N.P. (2022) Garnet composition from the kimberlites of the Arkhangelsk re-

- sia): constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle. *Lithos*, **112**(2), 924-933.
- Mahotkin I.L., Gibson S.A., Thompson R.N., Zhuravlev D.Z., Zherdev P.U. (2000) Late Devonian diamondiferous kimberlite and alkaline picrite (proto-kimberlite?) magmatism in the Arkhangelsk region, Russia. *J. Petrology*, **41**(2), 201-227.
- Parsadanyan K.S., Kononova V.A., Bogatkov O.A. (1996) Sources of heterogeneous magmatism in the Arkhangelsk diamondiferous province. *Petrologiya*, **4**(5), 496-517. (In Russ.)
- Sazonova L.V., Nosova A.A., Kargin A.V., Borisovsky S.E., Tretyachenko V.V., Abazova Z.M., Griban Yu.G. (2015) Olivine from Pionerskaya and V. Grib kimberlite pipes (Arkhangelsk diamond province): types, composition, and origin. *Petrologiya*, **25**(3), 251-284. (In Russ.)
- Shevchenko S.S., Lokhov K.I., Sergeev S.A. (2004) Isotope studies in VSEGEI. Prospects of application of results for predicting and search of diamond deposits. *Efficiency of Prediction and Search for Diamond Deposits: Past, Present, and Future: Proceedings of the Scientific Practical Conference*. St.Petersburg, VSEGEI, 383-387. (In Russ.)
- Shcherbakova T.E. (2005) Typomorphic characteristics of kimberlite minerals in dispersion haloes and their use in prospecting for diamond deposits in Zimniy Bereg. Cand. geol. and min. sci. diss. Moscow, TsNIGRI, 201 p. (In Russ.)
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Kostrovitsky S.I., Pokhilenko N.P. (2015) Metasomatic events in the lithospheric mantle beneath the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk diamondiferous province. *Geolog. Geofiz.*, **56**(12), 2153-2172. (In Russ.)
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Pokhilenko N.P. (2017) Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk region, NW Russia. *Geoscience Frontiers*, **8**(4), 641-651.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Shchukin V.S. (2019) Diamond-Bearing Root Beneath the Northern East European Platform (Arkhangelsk Region, Russia): Evidence from Cr-Pyropite Trace-Element Geochemistry. *Minerals*, **9**(5), 261. <https://doi.org/10.3390/min9050261>
- Shchukina E.V., Shchukin V.S. (2018) Diamond exploration potential of the northern east European platform. *Minerals*, **8**(5), 189. <https://doi.org/10.3390/min8050189>
- Sobolev N.V., Lavrentyev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. (1973) Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**(1), 39-52. <https://doi.org/10.1007/BF00371762>
- Fersman A.E. (1940) Geochemical and mineralogical methods of prospecting for minerals. Moscow, AN SSSR, 446 p. (In Russ.)