

**БАРАБАШ Екатерина Олеговна**

**ИСТОРИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОРЕОЛОВ ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ  
КИМБЕРЛИТОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

**Научный руководитель:**

**Афанасьев Валентин Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Толстов Александр Васильевич**, академик АН РС(Я), доктор геолого-минералогических наук, директор Научно-исследовательского геологического предприятия (НИГП) АК АЛРОСА (ПАО) (г. Мирный).

**Костровицкий Сергей Иванович**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск

Защита состоится **28 декабря 2021 г. в 12 00** на заседании диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3; факс: 8(383) 373-05-61; e-mail: [turkina@igm.nsc.ru](mailto:turkina@igm.nsc.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН по адресу <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovety/d-003-067-03/zashchity>.

Автореферат разослан 25 ноября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.г.-м.н.

О.М. Туркина

## **Введение.**

### **Актуальность**

На Сибирской платформе известны три эпохи кимберлитового магматизма – среднепалеозойская, нижнетриасовая и юрско-меловая. Кимберлиты с промышленными уровнями алмазоносности в пределах Сибирской платформы связаны только со среднепалеозойской эпохой, хотя в ряде кимберлитовых полей этого возраста резко преобладают тела с низкими и убогими содержаниями алмазов. Триасовая эпоха алмазоносна, но уровень алмазоносности известных кимберлитовых тел в целом значительно ниже, чем среднепалеозойской, а в большинстве известных триасовых кимберлитов алмазы вообще не установлены. Юрско-меловые кимберлиты практически не алмазоносны, и среди многих сотен известных тел лишь для единичных трубок этого возраста установлены убогие содержания алмазов.

Большинство известных полей среднепалеозойских кимберлитовых тел локализовано в центральной части Сибирской платформы, тогда как мезозойские кимберлиты тяготеют к ее окраинам. На окраинах платформы имеются находки и среднепалеозойских кимберлитов, в частности в ее северо-восточной части в районе Кютюнгинского грабена (Толуопское поле), где пространственно совмещены кимберлиты всех трех эпох.

Поскольку для Сибирской платформы наблюдается зависимость продуктивности кимберлитовых тел от возраста их формирования, то именно возраст коренных источников является основой для прогнозирования и организации поисковых работ на алмазы. Поэтому выделение комплекса признаков, основанных на онтогенических особенностях индикаторных минералов кимберлитов (далее ИМК) является крайне актуальным для повышения эффективности прогнозирования и поисков коренных месторождений алмаза. Этот комплекс критериев позволяет оценить возраст прогнозируемых коренных источников на перспективных площадях и на данной основе определять тактику поисковых работ, что имеет важнейшее практическое значение.

### **Цель и задачи работы**

Цель: выявить комплекс минералогических критериев оценки возраста коренных источников по индикаторным минералам кимберлитов из ореолов рассеяния и выделить районы, перспективные с точки зрения коренной алмазоносности на Сибирской платформе.

### **Задачи:**

1. Изучить типоморфизм индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) из ореолов рассеяния различных алмазоносных районов Сибирской платформы, включая: а) морфологию зерен, отражающую эволюцию ИМК в сфере седиментогенеза; б) особенности химического состава, позволяющие идентифицировать коренные источники и дать оценку их алмазоносности;
2. Изучить закономерности поведения ИМК в условиях современного аллювиального переноса;
3. Восстановить историю и условия развития ореолов ИМК с помощью типоморфного и онтогенического анализа.
4. Обосновать наиболее перспективные площади с точки зрения коренной алмазоносности.

### **Фактический материал и личный вклад автора.**

Материалом для исследования послужили шлиховые пробы из следующих районов Сибирской платформы: Муно-Мархинское междуречье, Анабаро-Уджинское междуречье (бассейны рек Биллях, Уджа, Маят), участки Тарыдак и Мирюга (бассейн реки Подкаменная

Тунгуска), Чомполинское поле (верховья реки Амга), северная часть Оленекского поднятия (бассейны рек Никабыт, Хорбусуонка, Келимяр), минералы которых изучены морфологически, определен их химический состав. Используются также химические составы гранатов из различных районов Сибирской платформы из базы данных Лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений (лаб. 451) ИГМ СО РАН за многолетний период (более 15 000 анализов).

Автор принимал непосредственное участие в специальном маршруте по р. Муна со шлихоминералогическим опробованием с целью определения дальности транспортировки ИМК в аллювиальных условиях в ореоле рассеяния прямого сноса, а также в отборе шлиховых проб в следующих районах: Муно-Мархинское междуречье (2010 г.), бассейн реки Подкаменная Тунгуска (2011 г.), северная часть Оленекского поднятия (2013 г.), Анабаро-Уджинское междуречье (2018 г.).

Работа основана на полученных автором данных по морфологическим особенностям ИМК и соотношению ИМК с разной степенью механического износа (более 600 проб). Для представительных выборок ИМК из разных участков проведено детальное изучение микрорельефа на сканирующем электронном микроскопе (более 5000 фотографий) и выполнена систематизация зерен по этому параметру. Часть химических анализов гранатов (576 анализов) получены лично автором.

#### **Методы исследования.**

С помощью бинокулярного микроскопа (Микромед МСЗ Zoom) изучен габитус кристаллов, степень механического износа, наличие гипергенных изменений и хронологические взаимоотношений разного рода скульптур.

Сканирующая электронная микроскопия (JEOL 6380 LA, TESCAN MIRA 3 LMU) применялась с целью изучения микрорельефа наиболее информативных зерен ИМК и документации представительных выборок ИМК из различных районов.

Онтогенетический и типоморфный анализы, основанные на изучении и интерпретации форм экзогенных изменений на ИМК из ореолов. Онтогенетический (по [Григорьеву, 1961]) анализ направлен на восстановление истории развития минеральных индивидов и минеральных ассоциаций, а типоморфный - на реконструкцию геологических условий, ответственных за проявление тех или иных типоморфных особенностей минералов и их ассоциаций на каждом этапе онтогенеза). Сочетание этих двух методов позволяет реконструировать историю формирования ореолов ИМК и фациальные обстановки на каждом этапе онтогенеза, а также обосновать возраст коренных источников на основании типоморфных особенностей ИМК.

Микрорентгеноспектральный анализ (JEOL JXA 8100) применялся для изучения химического состава представительных выборок пиропов.

#### **Научная новизна и практическая значимость.**

По результатам изучения природного объекта (Верхнемунского кимберлитового поля) доказана дальность транспортировки ИМК в аллювиальных условиях в ореоле прямого сноса, превышающая 150 км. При транспортировке на это расстояние на зернах появляется признаки механического износа только слабой степени. Для получения представительного количества ИМК необходимо экспоненциально увеличивать объем проб по мере удаления от коренного источника.

Разработан комплекс минералогических критериев, позволяющих оценить возраст коренных источников по их ИМК в современных и древних ореолах рассеяния.

С использованием комплекса минералогических критериев обоснован возраст коренных источников в ряде районов Сибирской платформы. Выявлены наиболее перспективные с точки

зрения коренной алмазоносности территории, связанные с среднепалеозойским кимберлитовым магматизмом.

### **Основные защищаемые положения**

Дальность транспортировки ИМК в аллювиальном ореоле прямого сноса (Верхнемунское кимберлитовое поле) достигает первых сотен километров в зависимости от степени расчлененности рельефа, с падением концентрации ИМК по экспоненциальному закону, при слабом механическом износе ИМК.

Комплекс критериев для оценки возраста коренных источников ИМК Сибирской платформы включает состав гранатов, степень их механического износа и гипергенной коррозии. Гипергенная коррозия и повышенный механический износ ИМК, наряду с широкими вариациями состава гранатов и наличием гранатов алмазной ассоциации свидетельствуют о среднепалеозойском возрасте коренных источников; ИМК из триасовых и юрско-меловых коренных источников лишены признаков гипергенной коррозии, слабо окатаны и характеризуются сокращением парагенетического разнообразия, сужением интервала по хромистости и отсутствием или очень низким содержанием гранатов алмазной ассоциации.

На Анабаро-Уджинском междуречье, участках Тарыдак и Мирюга в бассейне р. Подкаменная Тунгуска представлены ИМК типичные для среднепалеозойских коренных источников, а на севере Оленекского поднятия и в Чомполинском поле – для триасовых. Наиболее перспективной на обнаружение среднепалеозойских алмазоносных кимберлитов является Анабаро-Уджинская площадь.

### **Апробация работы.**

По теме диссертации опубликовано 13 работ в том числе 5 в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Результаты работы были доложены и опубликованы в материалах и тезисах Международных и Всероссийских научных конференций: XX Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016, 2018), Goldschmidt 2017 (Париж, 2017), Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции (Якутск, 2018, 2019), 7th International Scientific Conference of young scientists and students on "Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics" (Баку, 2018).

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Общий объем работы 160 страниц, включая 63 рисунка, 2 таблицы, список литературы, содержащий 113 наименований, 2 приложения.

В первой главе представлен краткий обзор коренной и россыпной алмазоносности Сибирской платформы и других регионов мира. Описаны основные типоморфные особенности алмазов из россыпей и разных типов коренных источников. Дана краткая характеристика наиболее распространенных алмазосодержащих пород. Рассмотрены литературные данные о потенциальных источниках россыпных алмазов.

Во второй главе на основе литературных данных рассмотрены основные закономерности поведения ИМК и их ассоциаций при формировании механических ореолов рассеяния. Описаны различные гипотезы и теоретические модели, касающиеся транспортировки ИМК в аллювиальных условиях. Изложены причины и условия возникновения тех или иных типоморфных особенностей ИМК. Приведена история формирования ореолов ИМК Сибирской

платформы. Эти данные являются необходимой теоретической базой для интерпретации данных, изложенных в диссертации.

Третья глава посвящена методам исследования, используемым в работе. Подробно описаны особенности шлихового опробования при изучении дальности транспортировки, изложена методика обработки шлиховых проб и систематизации данных по морфологии ИМК. Коротко изложены основы онтогенического и типоморфного анализов ИМК, используемых для реконструкции истории и условий формирования ореолов.

В четвертой главе на примере современного потока рассеяния от Верхнемунского кимберлитового поля обосновывается экспоненциальное падение концентрации ИМК по мере удаления от источника. Приводятся критерии выбора эталонного объекта и обозначается область применимости метода. Формулируется первое защищаемое положение.

В пятой главе описан комплекс критериев оценки возраста коренных источников по ИМК из шлиховых ореолов. Сформулировано второе защищаемое положение.

Шестая глава посвящена примерам применения комплекса критериев для обоснования возраста коренных источников по ИМК из ореолов рассеяния. Оценен возраст коренных источников в шести потенциально алмазоносных районах. Выделены наиболее перспективные площади. Сформулировано третье защищаемое положение.

В заключении суммированы результаты работы.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация соответствует разделу 4 (Прогнозирование, поиски, разведка и геолого-экономическая оценка месторождений) паспорта научной специальности 1.6.10 - «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения».

#### **Благодарности.**

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.г.-м.н. В.П. Афанасьеву за помощь, внимание и поддержку в процессе подготовки диссертации. Академику РАН д.г.-м.н. Н.П. Похиленко автор благодарен за консультации и поддержку. За ценные замечания при подготовке публикаций автор благодарен академику РАН Н.В. Соболеву. За бесценный опыт полевых работ автор благодарит к.г.-м.н. М.А. Вавилова, к.г.-м.н. И.С. Бажана, к.г.-м.н. Н.С. Тычкова. За ценные замечания и конструктивную критику признателен д.г.-м.н. А.С. Борисенко, д.г.-м.н. Ю.А. Калинину, д.г.-м.н. О.М. Туркиной, д.г.-м.н. А.Г. Дорошкевич. Также автор выражает благодарность ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск), где проводились аналитические исследования и лично к.г.-м.н. Н.С. Карманову, к.г.-м.н. А.Т. Титову, к.г.-м.н. В.Н. Королюку, М.В. Хлестову. Автор признателен за неоценимую помощь и всестороннюю поддержку со стороны к.г.-м.н. Д.А. Самданова, к.г.-м.н. А.М. Логвиновой, к.г.-м.н. Е.В. Агашевой, Е.И. Николенко, к.г.-м.н. В.С. Цибульчик, Л.В. Черемных, О.А. Ивановой, Л.Н. Баранова, О.В. Ильиной.

Работа выполнена в Лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений (лаб. 451) ИГМ СО РАН при частичной финансовой поддержке в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-781 от 02 октября 2020 года.

#### **Обоснование защищаемых положений**

##### **Первое защищаемое положение.**

*Дальность транспортировки ИМК в аллювиальном ореоле прямого сноса (Верхнемунское кимберлитовое поле) достигает первых сотен километров в зависимости от степени расчлененности рельефа, с падением концентрации ИМК по экспоненциальному закону, при слабом механическом износе ИМК.*

Согласно ранее проведенным исследованиям, миграционные способности минералов описываются формулой  $P = P_0 e^{-bx}$ , [Афанасьев Бабенко, 1988]

где  $P_0$  – исходная концентрация минералов в коренном источнике,  $P$  – их концентрации после переноса на расстояние  $x$ ,  $b$  – коэффициент инертности, показывающий вероятность отставания единичной частицы или комплекса частиц данной размерности на элементарном отрезке пути.

Таким образом, закон распределения минеральных частиц в процессе транспортировки от коренного источника имеет экспоненциальный характер.

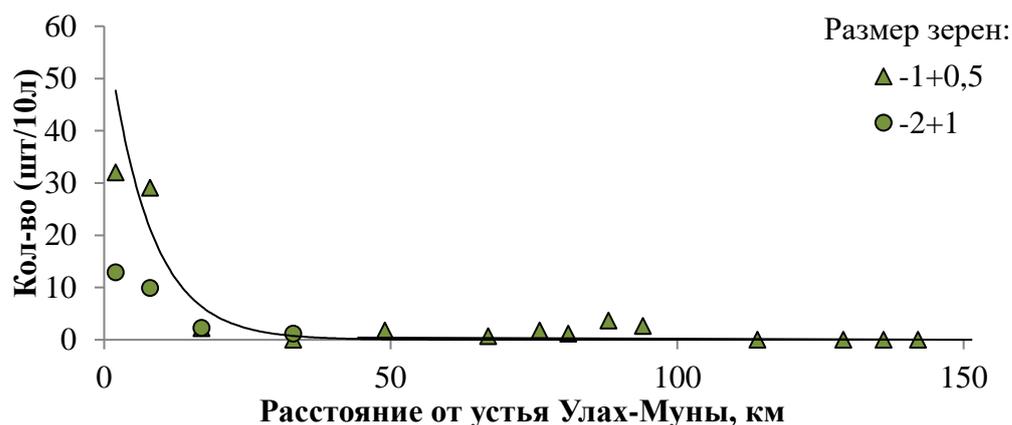
С целью проверки данной теоретической модели на природном объекте в 2010 году отрядом ИГМ СО РАН с участием автора был организован специальный маршрут со шлихоминералогическим опробованием для определения дальности транспортировки ИМК в аллювиальных условиях в ореоле рассеяния прямого сноса. В качестве эталонного объекта было выбрано Верхнемунское кимберлитовое поле, которое представлено компактной группой эрозируемых в настоящее время кимберлитовых тел. Бассейн р. Муна находится в зоне средней и сильной расчлененности рельефа, что обеспечивает высокую транспортирующую способность этой реки [Афанасьев и др., 2012]. Благодаря этому оно формирует интегральный поток рассеяния индикаторных минералов, протягивающийся по реке Улах-Муна и далее по реке Муна. Данный поток рассеяния может служить эталонным объектом для изучения дальности транспортировки минералов прямого сноса в современном аллювии и изменений транспортируемой ассоциации минералов. Однако в шлиховых пробах помимо минералов прямого сноса присутствуют минералы, переотложенные из древних коллекторов. Большинство переотложенных минералов имеет «признаки древности» (гипергенная коррозия, связанная со среднепалеозойской корой выветривания, докоровый и послекоровый механический износ), по которым их теоретически можно отличить от продуктов современного размыва кимберлитов [Афанасьев, Зинчук, 1999]. К сожалению, на практике абсолютно надежно отличить переотложенные минералы (пиропы и пикроильмениты) от минералов прямого сноса оказалось затруднительно, поэтому мы воспользовались уникальной особенностью кимберлитов Верхнемунского поля – изобилием свежего (не серпентинизованного) оливина: именно оливин служит надежным индикатором современного размыва кимберлитов, поскольку из-за физико-химической неустойчивости он не сохраняется в древних ореолах, прошедших среднепалеозойскую кору выветривания, и, соответственно, отсутствует в переотложенном состоянии. Выбор оливина в качестве индикатора современной эрозии кимберлитов ориентировал методику опробования руслового аллювия на получение представительного количества именно этого минерала, независимо от количества других ИМК. Остальные минералы использовались как дополнительный материал.

Пробы отбирались по руслу реки Муна с интервалом 5-10 км, и на крупных притоках за пределами долины реки Муна с интервалом около 1 км. Объем проб варьировал от 20 до 600 л в зависимости от качества материала и концентрации ИМК.

Полученные шлиховые пробы были обработаны автором в лаборатории по стандартной методике, предусматривающей отсадку тяжелой фракции в бромформе, ситовой анализ, выделение монофракций ИМК, которые изучались визуально с помощью бинокулярного микроскопа и сканирующего электронного микроскопа. Особое внимание было уделено признакам механического износа на оливинах.

Реальные кривые распределения минералов по концентрации и гранулометрии имеют сложный зубчатый характер, отражающий неоднородность опробования, различный тип и качество «ловушек», поэтому пришлось прибегнуть к аппроксимации данных с помощью трендов.

На графике видно, что по мере удаления от коренного источника концентрация оливина резко падает по закону, близкому к экспоненциальному (рис. 1). Наиболее хорошо данная зависимость видна на примере зерен оливина класса крупности (-1+0.5). Более крупные классы выпадают вблизи коренного источника, что не позволяет выявить характер их распределения. Зерна класса -1+0.5 мм и меньше прослежены на расстояние более 150 км и, бесспорно, могут быть прослежены дальше при повышении объемов опробования. По мере удаления от коренных источников объемы опробования, необходимые для достижения представительного количества минералов прямого сноса, должны экспоненциально возрастать в связи экспоненциальным падением их концентрации.



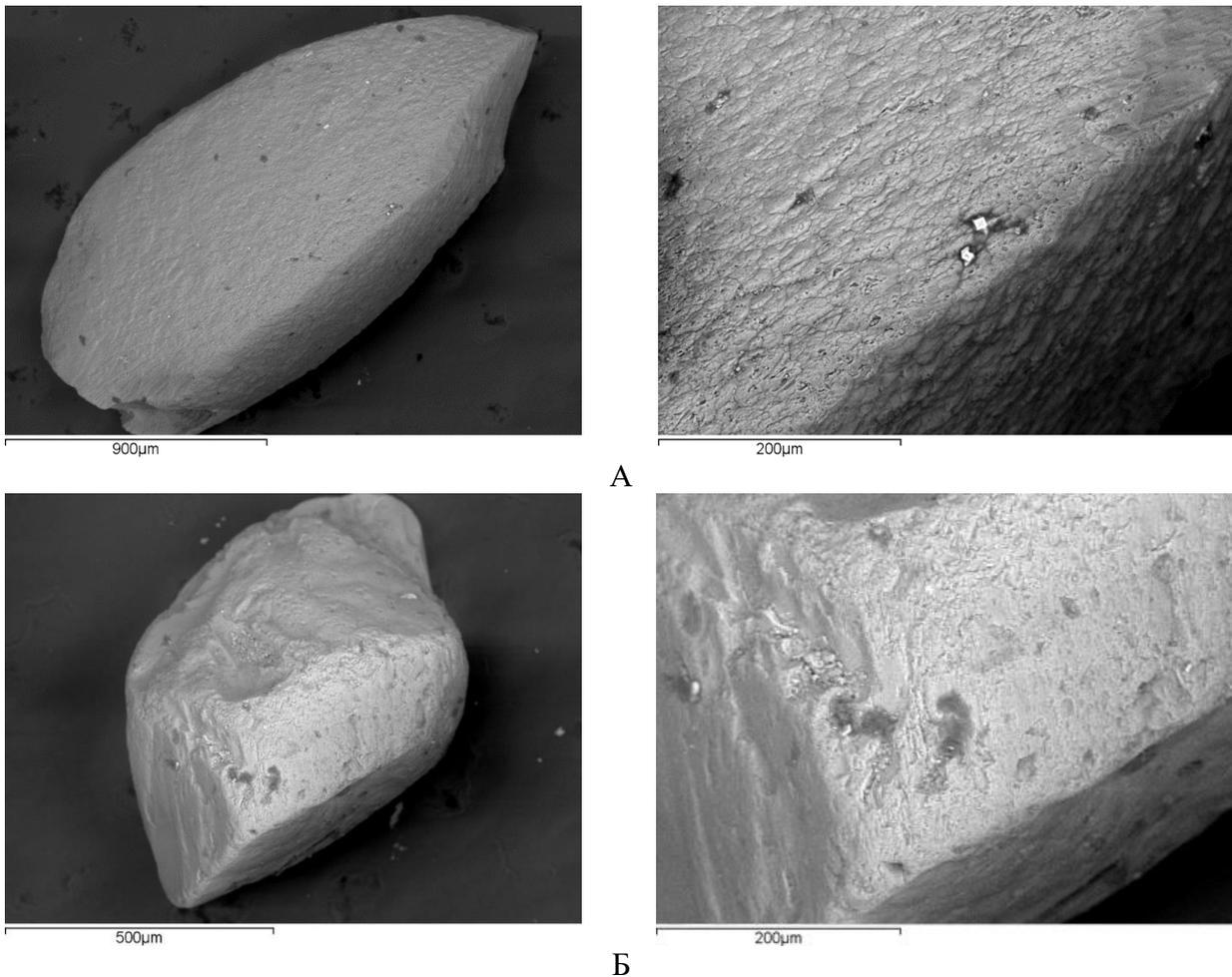
**Рис. 1.** Изменение концентрации оливина различных классов крупности по мере удаления от коренного источника.

Изучение механического износа оливинов показало, что на зернах из россыпи Аэродромная коса вблизи кимберлитового поля износ не фиксируется (рис. 2 А), а на оливинах из пробы, взятой в районе впадения р. Эгелинде приблизительно в 150 км от устья р. Улах-Муна, видны лишь незначительные потертости на ребрах и вершинах (рис. 2 Б).

Таким образом, изучение современного потока рассеяния ИМК Верхнемунского поля подтверждает теоретическую модель транспортировки ИМК и дает конкретные оценки дальности транспортировки и степени окатанности минералов для данной геоморфологической обстановки.

По мере удаления от коренного источника концентрация ИМК падает по экспоненте, соответственно, опробование одинаковыми объемами позволяет выделить ограниченный фрагмент ореола, приближенный к коренному источнику; масштабы выделенного фрагмента будут зависеть от объема проб.

По мере удаления от коренного источника за счет гидравлической сортировки шлиховая ассоциация обедняется крупными гранулометрическими классами и тяжелыми ИМК (главным образом пикроильменитом). Возможность эрозии кимберлитов и дальность транспортировки ИМК в платформенных условиях определяются геоморфологической обстановкой на рассматриваемый период развития ореолов. Для современных ореолов оптимальной является средняя степень расчлененности рельефа, обеспечивающая формирование развитых потоков рассеяния и возможность выхода по ним на коренные источники.



**Рис. 2.** Механический износ оливинов на разном удалении от коренных источников. А - 2 км, Б - 150 км.

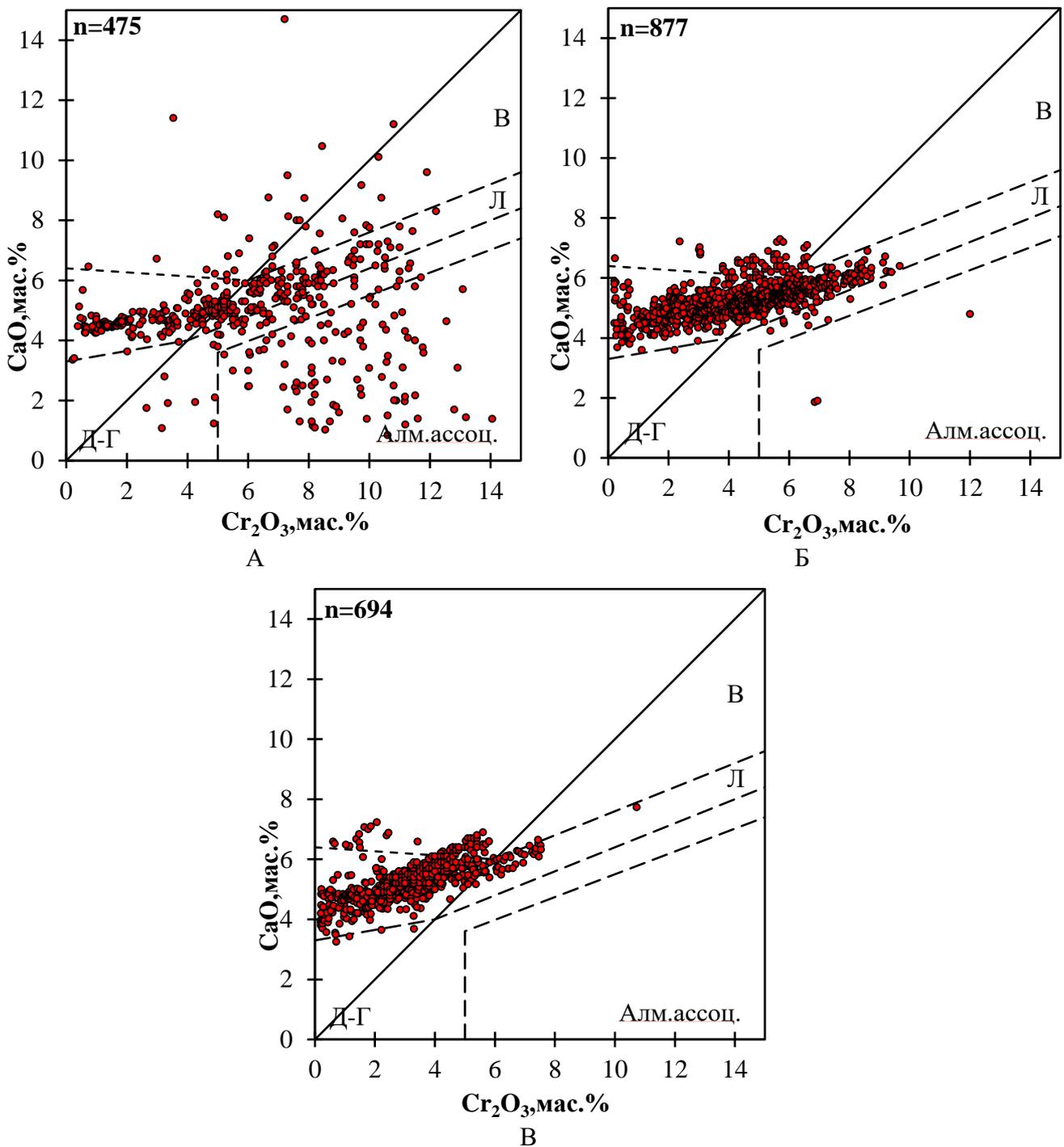
### **Второе защищаемое положение.**

*Комплекс критериев для оценки возраста коренных источников ИМК Сибирской платформы включает состав гранатов, степень их механического износа и гипергенной коррозии. Гипергенная коррозия и повышенный механический износ ИМК, наряду с широкими вариациями состава гранатов и наличием гранатов алмазной ассоциации, свидетельствуют о среднепалеозойском возрасте коренных источников; ИМК из триасовых и юрско-меловых коренных источников лишены признаков гипергенной коррозии, слабо окатаны и характеризуются сокращением парагенетического разнообразия, сужением интервала по хромистости и отсутствием или очень низким содержанием гранатов алмазной ассоциации.*

Для Сибирской платформы известны три эпохи кимберлитового магматизма – среднепалеозойская, триасовая и юрско-меловая. Продуктивной является среднепалеозойская, хотя среди ее кимберлитов имеются как промышленные месторождения, так и низкоалмазоносные или безалмазные трубки. Триасовая эпоха также алмазоносна, но уровень алмазоносности известных кимберлитовых тел значительно ниже, чем среднепалеозойской, в большинстве известных триасовых кимберлитов алмазы не установлены. Юрско-меловые кимберлиты практически не алмазоносны.

В качестве первого критерия рассмотрен химический состав гранатов из разновозрастных кимберлитовых тел. Химический состав гранатов ультраосновных парагенезисов из среднепалеозойских кимберлитов наиболее вариабелен и отражает максимальное разнообразие

парагенезисов гранатов в кимберлитах [Sobolev et al., 1973] (диаграмма Н.В. Соболева в координатах CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, рис. 3 А). Основная масса гранатов принадлежит лерцолитовым парагенезисам, в значительном количестве представлены дунит-гарцбургитовые и верлитовые гранаты. Присутствуют гранаты алмазного парагенезиса, куда попадают высокохромистые субкальциевые гранаты, по составу соответствующие большей части включений в алмазах ультраосновных парагенезисов.

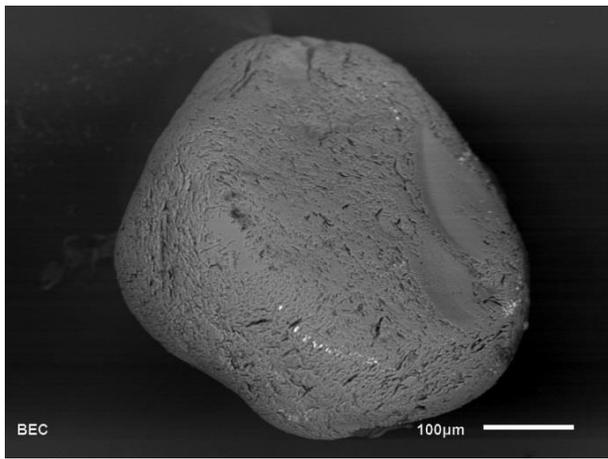


**Рис. 3.** А - трубки Удачная, Айхал, Зимняя (средний палеозой); б - трубки Эвенкийская, Университетская, Малокуонапская (триас), в - трубки Обнаженная, Второгодница, Оливиновая, Ирина (юра). Поля по [Sobolev et al., 1973]: В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм. ассоц – гранаты алмазной ассоциации.

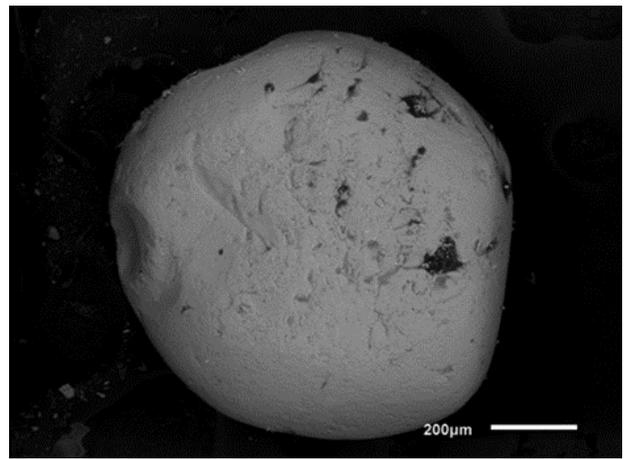
Триасовые кимберлиты в определенной мере наследуют распределение составов гранатов, характерное для среднепалеозойских кимберлитов, диаграммы составов в координатах  $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$  несут черты сходства. Однако в популяциях гранатов ультраосновных парагенезисов из кимберлитов данного возраста значительно снижены доли гранатов гарцбургит-дунитового и верлитового парагенезисов, а также гранатов с наиболее высокими содержаниями хрома ( $> 10$  мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); гранаты алмазной ассоциации представлены в незначительных количествах или отсутствуют (рис. 3 Б). Тем не менее, только по составу разделить пиропы из кимберлитов среднепалеозойского и триасового возраста в случае их смешивания в ореолах достаточно сложно.

Юрско-меловые кимберлиты имеют значительно отличающееся распределение составов гранатов (рис. 3 В), поскольку мощный глубинный метасоматоз в мезозое переработал основание литосферы и изменил характер гранатсодержащих пород [Pokhilenko et al., 1999, 2015]. Гранаты из этих трубок главным образом малохромистые и относятся к так называемым, лерцолитам аномального состава [Тычков и др., 2010]. Кимберлиты юрско-мелового возраста не алмазоносны из-за сокращения мощности литосферы и уничтожения алмазов процессами метасоматической переработки глубинных частей литосферной мантии базитовыми агентами, представленными сублитосферными расплавами Сибирского суперплюма на границе пермского и триасового периодов [Pokhilenko et al., 1999]. Отражением этих событий являются значительные отличия распределений составов гранатов ультраосновных парагенезисов из юрско-меловых кимберлитов от таковых для гранатов из кимберлитов среднепалеозойского и триасового возраста.

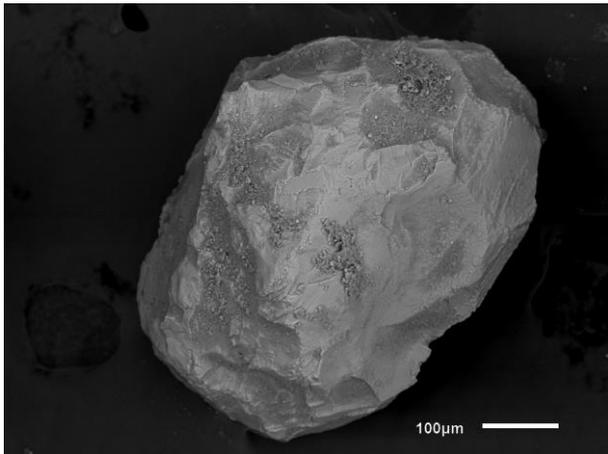
Второй критерий связан с морфологическими особенностями ИМК. Чем длительнее история минерала в ореоле, тем больше экзогенных факторов может на нем отразиться. Наиболее богата геологическими событиями история гранатов из ореолов среднепалеозойских кимберлитов. После формирования кимберлитовых тел и начального этапа их эрозии в фамене территория Сибирской платформы испытала мощную трансгрессию, которая оставила за собой абразионный пенеплен и обусловила сильное окатывание индикаторных минералов (рис. 4 А, Б) [Афанасьев и др., 2013]. Абразионный пенеплен резко изменил характер седиментогенеза в последующие эпохи. Наступление моря на ранее пенепленизированную сушу имело уже характер не трансгрессии с активной береговой абразией, а ингрессии, т.е. подтопления суши, в результате чего сохранялись в качестве базальных горизонтов ранее сформированные отложения континентального генезиса. Такие коллекторы начали развиваться со среднего карбона, и это продолжалось далее на протяжении всего мезозоя и даже кайнозоя. В условиях ингрессии существенный износ минералов не мог осуществиться, поэтому характерен слабый износ (рис. 4 В, Г), механогенная полировка твердых минералов, в том числе и пиропы (рис. 4 Е). Следовательно, для минералов из ореолов, прошедших среднепалеозойский этап истории, характерен широкий диапазон степени износа – от слабой до предельной, причем преобладает средняя степень износа. После среднего карбона на минералах появляются признаки износа второго этапа, но степень износа не выше слабой. Тем самым два этапа износа на одном зерне с высокой долей вероятности указывают на среднепалеозойский возраст коренного источника минерала, особенно если второй этап развивается по каплевидному рельефу (рис. 4 Е). Если зерно имеет признаки только слабого износа, то оно весьма вероятно может происходить из мезозойских кимберлитов (триасовых или юрско-меловых), но не исключен и мезозойский размыв среднепалеозойских кимберлитов.



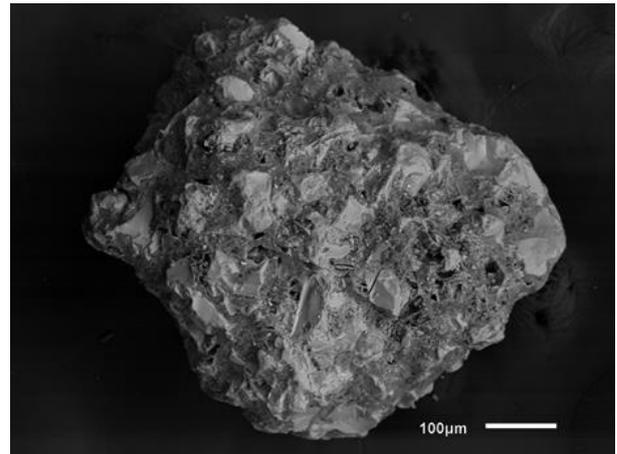
А



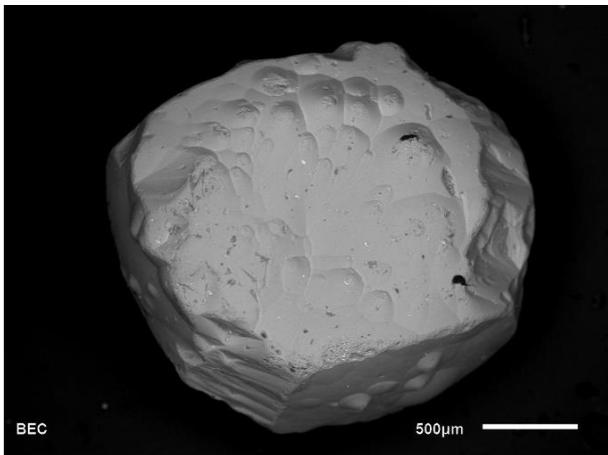
Б



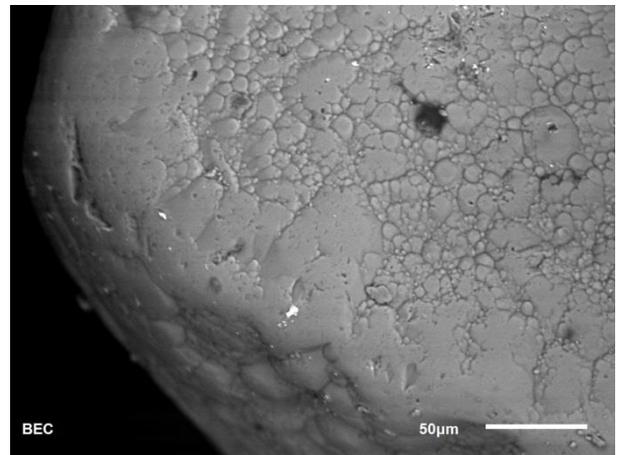
В



Г



Д



Е

**Рис. 4.** Морфологические особенности ИМК: А – сильноокатанный пироп, Б – сильноокатанный пикроильменит, В – пироп со слабым износом, Г – слабоокатанный пикроильменит с микропирамидальным рельефом, Д – кубоид пироба, Е – пироп с механогенной полировкой, развитой по гипергенной коррозии

Третий критерий связан с физико-химическими изменениями минералов. В конце фамена – начале раннего карбона на Сибирской платформе в условиях тропического климата на выровненной после трансгрессии поверхности была сформирована кора выветривания, в которой индикаторные минералы, в первую очередь пироп, приобрели признаки гипергенных изменений (рис. 4 Д, Е). Гипергенные изменения на пиробах проявляются в виде каплевидного рельефа, устойчивой формой растворения является выпуклогранный кубоид (рис. 4 Д) [Харьков,

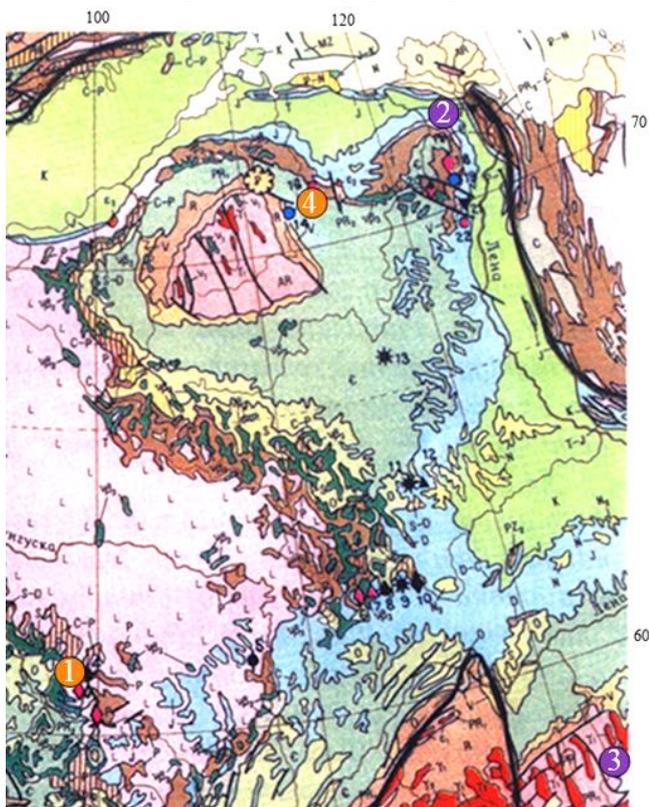
Волотовский, 1968, Афанасьев и др., 2001а]. В геологической истории фанерозоя, только в среднепалеозойской коре выветривания зафиксировано гипергенное растворение ИМК; коры выветривания в более поздние эпохи не оставляли следов на индикаторных минералах [Шамшина, 1979]. Следовательно, признаки гипергенных изменений однозначно указывают на среднепалеозойский этап гипергенеза и, соответственно, на среднепалеозойский возраст коренных источников пиропов.

Указанные критерии по-отдельности могут быть схожими для разных эпох кимберлитового магматизма. Например, составы пиропов из триасовых и из среднепалеозойских кимберлитов с малыми содержаниями алмазов могут быть похожими. Кимберлитовые тела Накынского поля находились в ходе трансгрессии в пределах островной суши (Непско-Ботуобинская антеклиза), поэтому их минералы до формирования коры выветривания были окатаны слабо, но следы гипергенной коррозии определенно указывают на среднепалеозойскую эпоху кимберлитового магматизма. Следовательно, указанные критерии должны применяться в комплексе, что позволяет диагностировать принадлежность коренных источников к определенной эпохе кимберлитового магматизма с высокой надежностью.

### Третье защищаемое положение.

*На Анабаро-Уджинском междуречье, участках Тарыдак и Мирюга в бассейне р. Подкаменная Тунгуска содержатся ИМК типичные для среднепалеозойских коренных источников, на севере Оленекского поднятия и в Чомполинском поле – для триасовых. Наиболее перспективной на обнаружение среднепалеозойских алмазоносных кимберлитов является Анабаро-Уджинская площадь.*

С использованием комплекса критериев оценки возраста коренных источников по ИМК из ореолов рассеяния обоснован возраст коренных источников для ряда потенциально алмазоносных районов Сибирской платформы (рис. 5).



**Рис. 5.** Предполагаемый возраст коренных источников ИМК в изученных районах. Усл. обозначения:

- среднепалеозойские коренные источники,
- триасовые коренные источники

1 – участки Тарыдак и Мирюга в бассейне р. Подкаменная Тунгуска, 2 – северный склон Оленекского поднятия, 3 – Чомполинское поле; 4 – Анабаро-Уджинское междуречье;

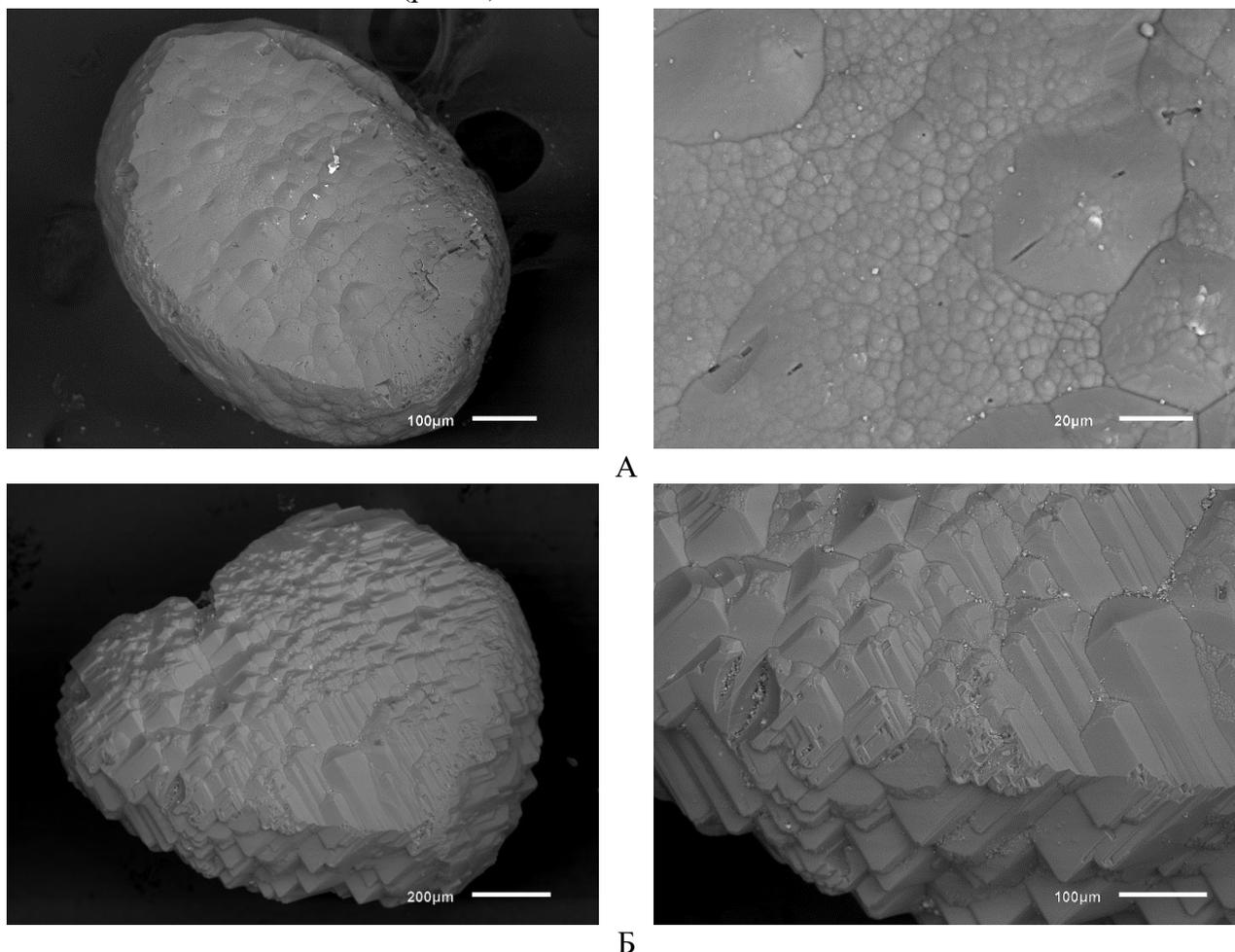
(Геологическая карта (фрагмент) [Атлас СССР, 1983] с дополнениями автора)

### Участки Тарыдак и Мирюга (бассейн р. Подкаменная Тунгуска)

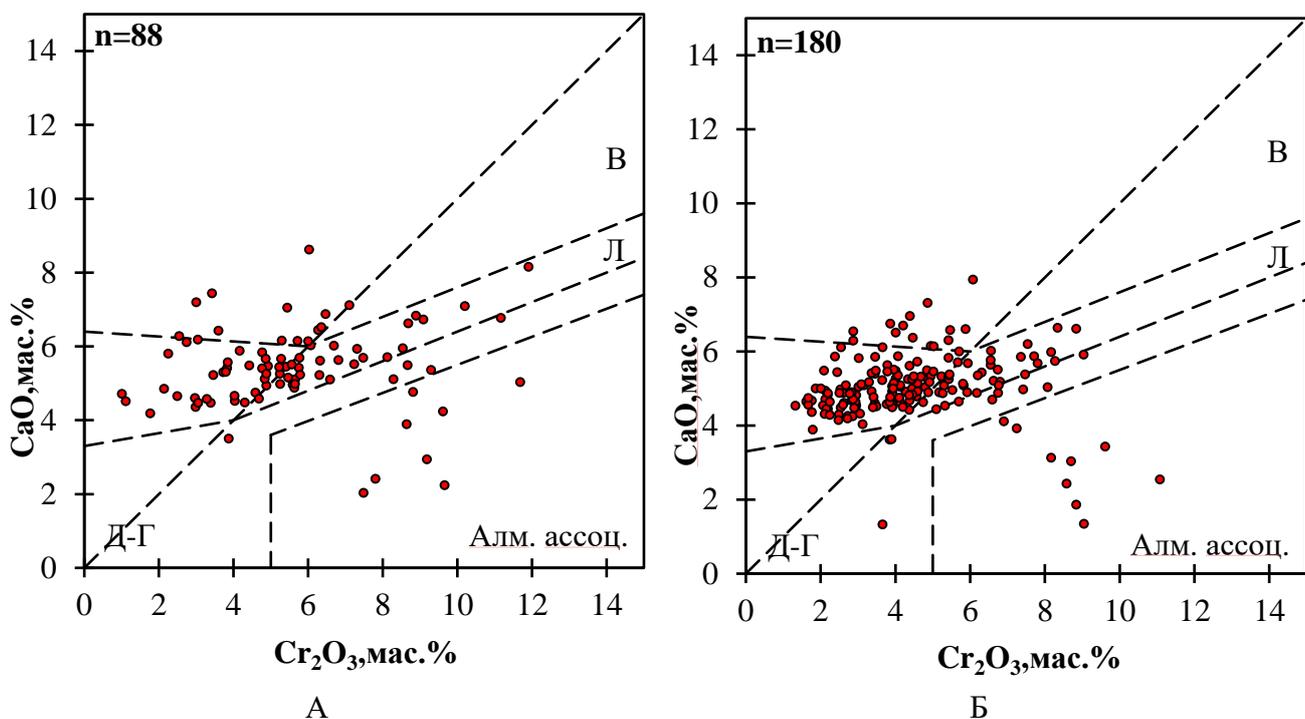
К северу от Чадобецкого поднятия в районе рек Тарыдак и Мирюга известен среднекарбонный континентальный коллектор индикаторных минералов. При опробовании данного коллектора было установлено, что индикаторные минералы кимберлитов представлены сильно окатанными пиропами и алмазами с признаками износа. Данная степень механического износа достижима только в прибрежно-морских трансгрессивных обстановках [Афанасьев, Зинчук, 1999]. Это объясняет отсутствие в ассоциации пикроильменита, который, в силу меньшей абразивной устойчивости, полностью уничтожается в условиях трансгрессии.

По механогенным поверхностям пиропов, практически на всех зернах, развит каплевидный рельеф (рис. 6 А), в некоторых случаях полностью уничтожающий следы докорового износа. На пиробах из Мирюгинского коллектора развит пирамидально-черепитчатый рельеф (рис. 6 Б), который связан с тем, что после этапа гипергенеза ИМК в среднепалеозойской коре выветривания, пиропы из Мирюгинского коллектора испытали на себе воздействие пермо-триасовых дифференцированных траппов [Афанасьев, 1985].

По химическому составу пиропы с Тарыдакского и Мирюгинского участков показывают типичное среднепалеозойское распределение составов в координатах  $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$ , с наличием гранатов алмазной ассоциации (рис. 7).



**Рис. 6.** Морфологические особенности пиропов уч. Тарыдак и Мирюга: А - сильно окатанные пиропы с каплевидным рельефом, уч. Тарыдак, Б – пирамидально-черепитчатый рельеф на пиробах уч. Мирюга .



**Рис. 7.** Химический состав гранатов уч. Тарыдак (А) и Мирюга (Б). Поля по [Sobolev et.al., 1973]: В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм. ассоц. – гранаты алмазной ассоциации.

Таким образом, совокупность морфологических особенностей ИМК и состава пиропов с Тарыдакского и Мирюгинского участков указывают на наличие в данном районе коренных источников, соответствующих алмазоносным среднепалеозойским кимберлитовым телам. Однако, на данной территории кимберлитовые тела погребены под терригенными отложениями, вмещающими ореолы индикаторных минералов кимберлитов, что значительно осложняет поиски [Афанасьев, 1989].

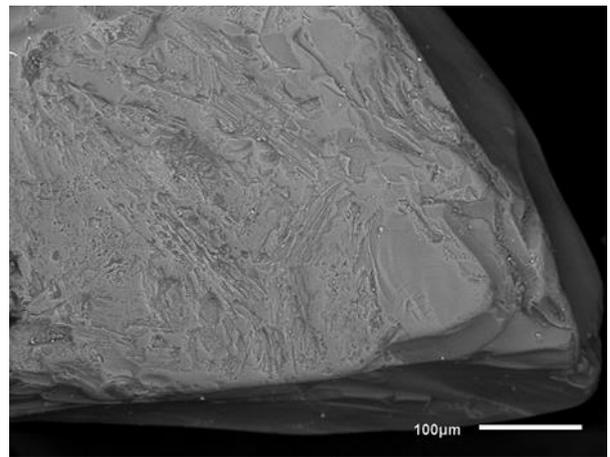
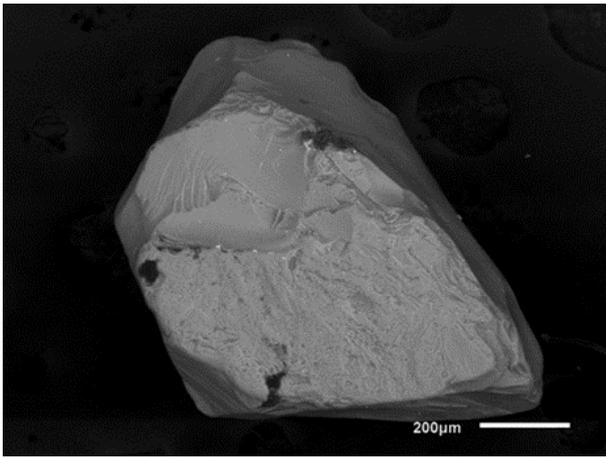
#### **Северная часть Оленекского поднятия.**

Изучаемый район расположен на северо-восточной окраине Оленекского поднятия у его подножья на границе с краем Чекановского в бассейнах рек Келимяр, Никабыт, Хорбусуонка.

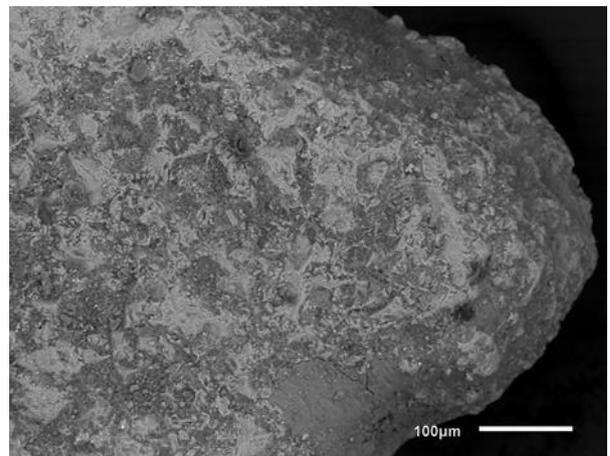
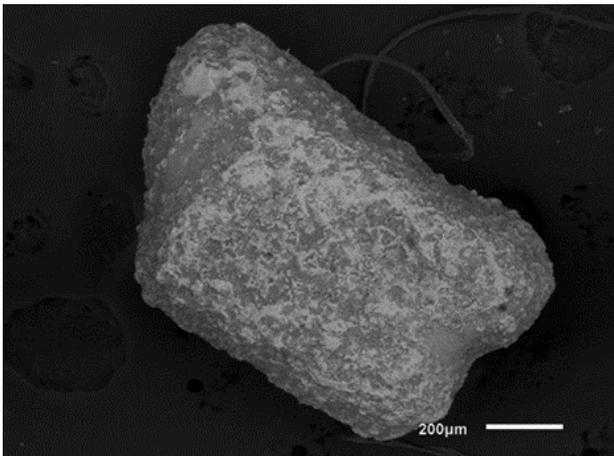
Большинство пиропов на Келимярской территории характеризуется слабым механическим износом при отсутствии гипергенной коррозии (рис. 8 А). Для пикроильментитов характерна слабая до средней степень механического износа с шероховатым механогенным или микропирамидальным рельефом (рис. 8 Б, В).

Распределение составов пиропов на диаграмме указывает на среднепалеозойский или триасовый возраст (рис. 9). В некоторых пробах в незначительных количествах присутствуют гранаты алмазной ассоциации, что позволяет предполагать низкую алмазоносность коренных источников.

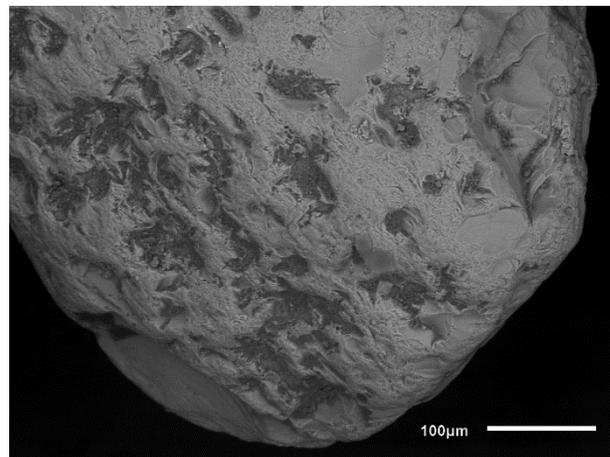
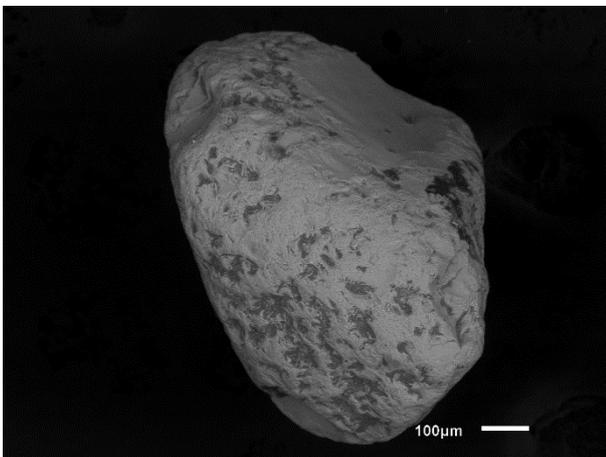
На основании морфологии и состава индикаторных минералов наиболее вероятно, что на Келимярской площади распространены кимберлиты триасового возраста. Слабый механический износ и отсутствие гипергенной коррозии характерны как для триасовых, так и для юрских кимберлитов. Однако распределение составов пиропов на диаграмме не характерно для юрских кимберлитов, к тому же присутствуют не типичные для последних гранаты алмазной ассоциации. В ходе полевых работ 2013 г. в шлиховых и мелкообъемных пробах нами было найдено 15 алмазов, 4 из них относятся к типичным кимберлитовым. Поэтому наиболее вероятным источником индикаторных минералов являются триасовые убогоалмазоносные кимберлиты.



А

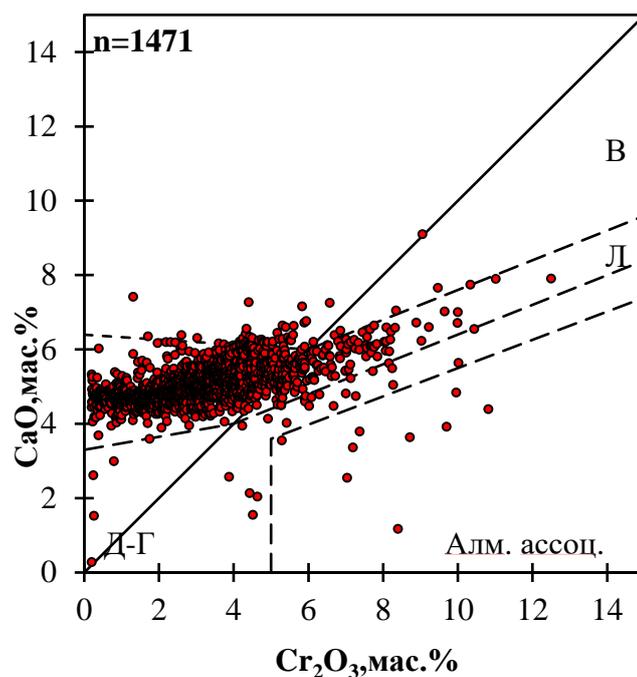


Б



В

**Рис. 8.** Морфология пиропов и пикроильменитов: А – пироп с первичной морфологией, Б – пикроильменит со слабым механическим износом и микропирамидальным рельефом, В – пикроильменит со средним механическим износом,



**Рис.9.** Химический состав гранатов Келимьярской площади. Поля по [Sobolev et al., 1973]: В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм. ассоц – гранаты алмазной ассоциации.

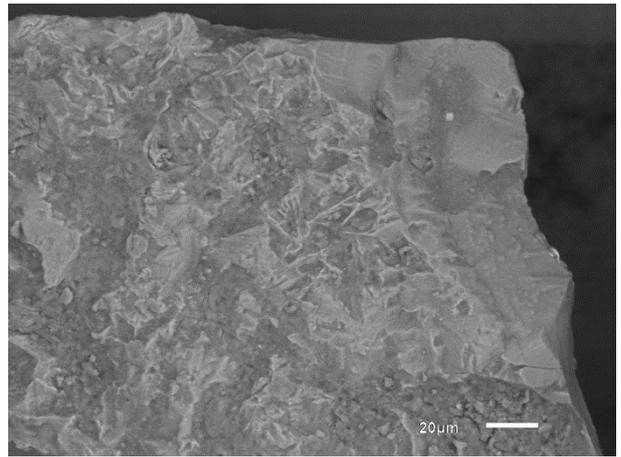
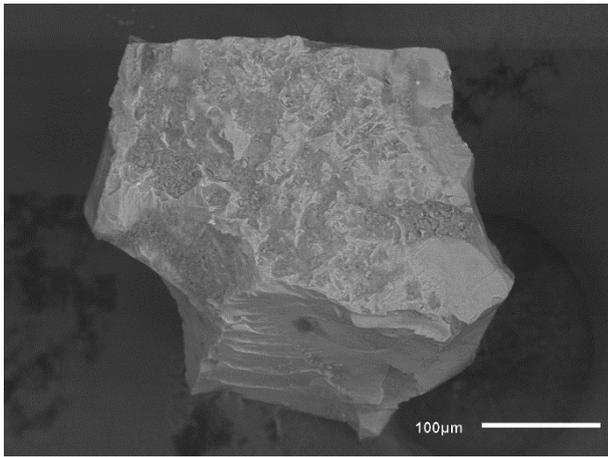
### Чомполинское поле

Чомполинское поле расположено в юго-восточной части Сибирской платформы, в верховьях реки Амга. Трубки взрыва и дайки считались ранее кимберлитовыми, но исследования сотрудников ИГМ СО РАН показали, что эти породы являются лампрофирами [Nikolenko et al., 2020]. На большей части его территории на дневной поверхности обнажены породы кембрия-протерозоя, которые являются лампрофировмещающими, на водоразделах встречаются реликты нижнеюрских отложений, содержащих индикаторные минералы.

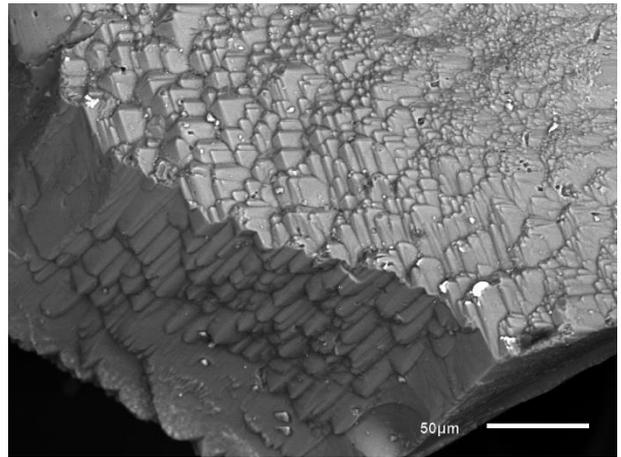
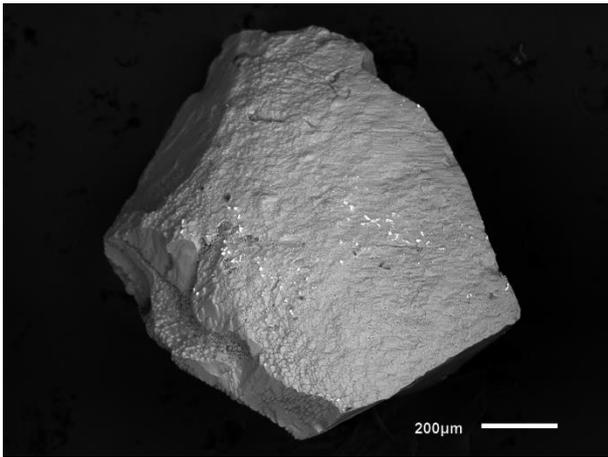
Степень механического износа пиропов слабая, и лишь единичные зерна могут быть отнесены к средней степени износа. Как правило, для пиропов характерен «первичный» рельеф, сформированный в коренном источнике (рис. 10 А). Реже встречается развитый в разной степени пирамидально-черепитчатый рельеф (рис. 10 Б), который на данной территории можно связать с периодом познеюрской – меловой магматической активизации, обусловившей формирование сиенитовых массивов при формировании Ямалахского горста [Афанасьев и др., 2020].

Для пикроильменита характерно наличие микропирамидального рельефа хорошей сохранности (рис. 11 А), что указывает на слабый механический износ. В редких случаях встречаются среднеокатанные зерна, переотложенные из ранее существовавшего промежуточного коллектора (рис. 11 Б).

Распределение составов гранатов из всех проб Чомполинского поля соответствует мезозойским источникам (рис.12) и показывает отсутствие субкальциевых высокохромистых пиропов дунит-гарцбургитового парагенезиса, характерных для алмазоносных кимберлитов [Sobolev et al., 1973].

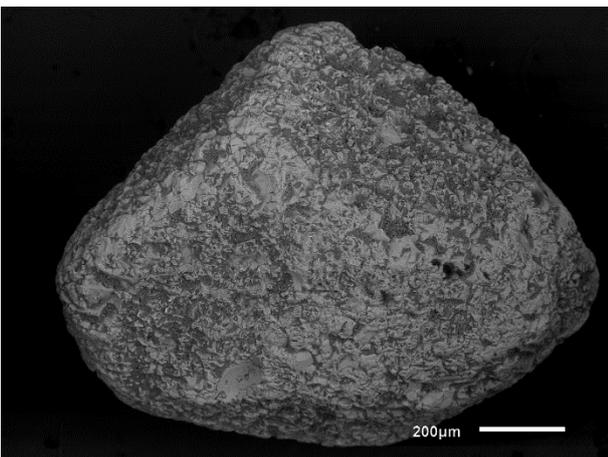


А

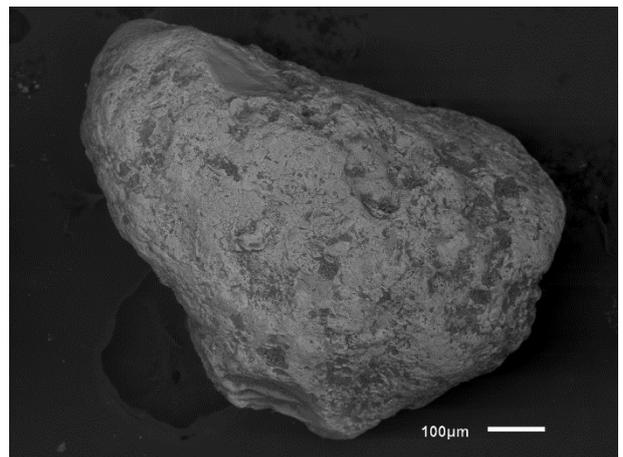


Б

**Рис. 10.** Морфология пиропов: А - «первичный» рельеф, Б - пирамидально-черепитчатым рельефом

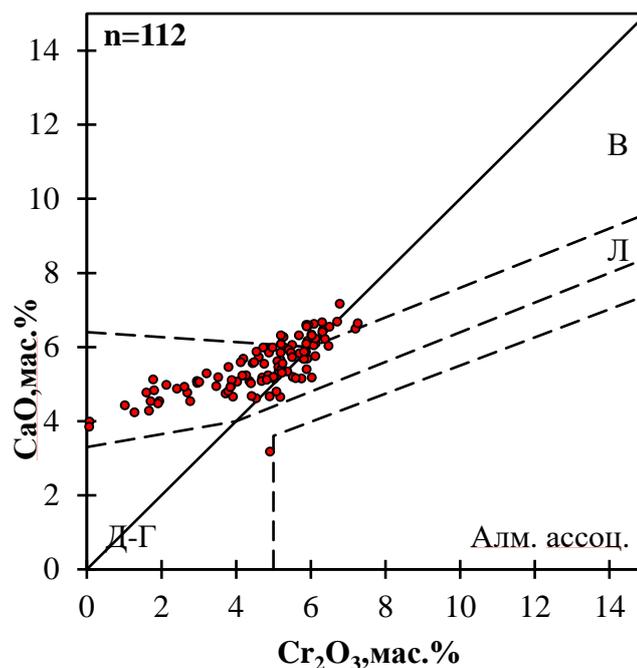


А



Б

**Рис.11.** Морфологические особенности пикроильменита: А – слабая степень механического износа, Б – средняя степень износа.



**Рис. 12.** Химический состав гранатов Чомполинского поля. Поля по [Sobolev et.al., 1973]: В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм. ассоц. – гранаты алмазной ассоциации.

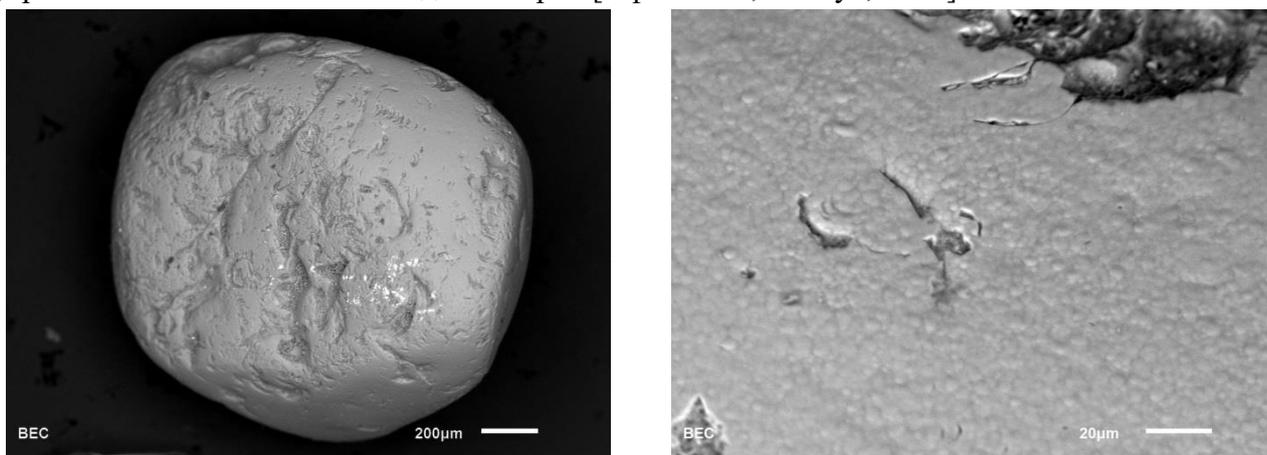
Комплекс минералогических критериев оценки возраста коренных источников индикаторных минералов, показывает, что основное количество минералов лампрофиров происходит из неалмазоносных мезозойских источников, о чем свидетельствует преимущественно слабый износ индикаторных минералов, отсутствие гипергенных изменений, типичное для мезозойских источников распределение составов пиропов с полным отсутствием высокохромистых субкальциевых гранатов алмазной ассоциации. Однозначно определить возраст лампрофиров Чомполинского поля пока сложно. Изотопные датировки  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом указывают на юрско-меловой возраст [Nikolenko et al., 2020]. Однако, по геологическим данным более вероятен триасовый возраст, поскольку трубка Перевальная частично перекрыта юрскими отложениями, к тому же сохранившийся на данной территории юрский коллектор содержит комплекс индикаторных минералов.

#### **Анабаро-Уджинское междуречье (северо-восток Сибирской платформы).**

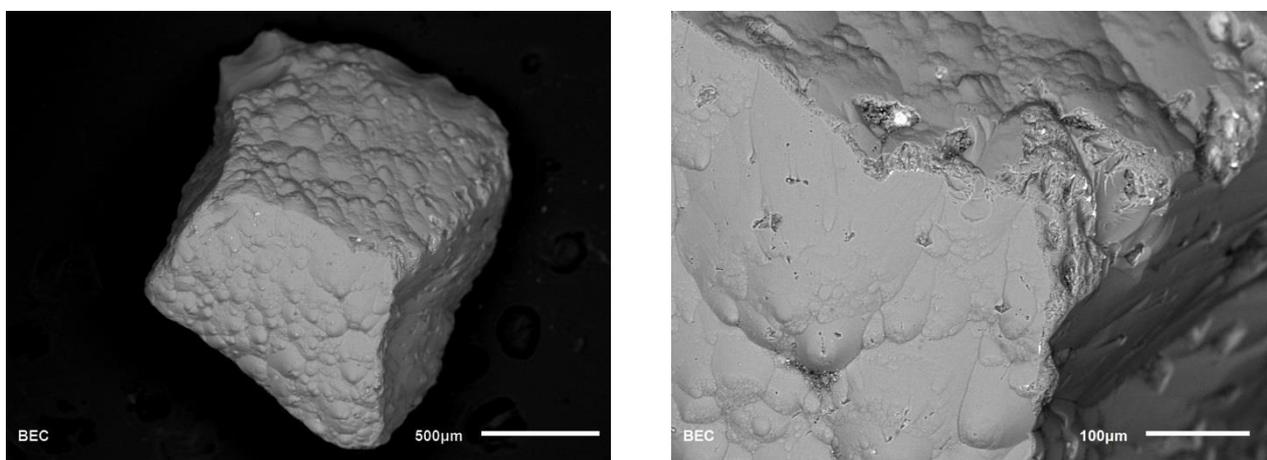
Индикаторные минералы изученной площади представлены пиропом и пикроильменитом. Хромиты, найденные в небольшом количестве, относятся к так называемому «курунговскому» типу, т.е. происходят не из кимберлитов, а из неизвестных пород ультраосновного состава [Афанасьев и др., 2000].

Большинство зерен пиропов имеют признаки гипергенной коррозии. На пиробах из бассейнов рек Уджа и Маят она, как правило, практически не видна в бинокляр, но применение сканирующего электронного микроскопа позволяет увидеть слабые ее проявления практически на всех зернах (рис. 13 А). В бассейнах рек Биллях и Эбелях степень гипергенной коррозии пиропов значительно выше. Практически все пиробы представлены хорошо развитыми кубоидами (рис. 13 Б).

Степень докоррозионного износа разная – от слабой до предельной (рис. 14), что связано с локальными различиями условий механического износа, в целом характерными для внутриконтинентальных мелководных морей [Афанасьев, Зинчук, 1999].

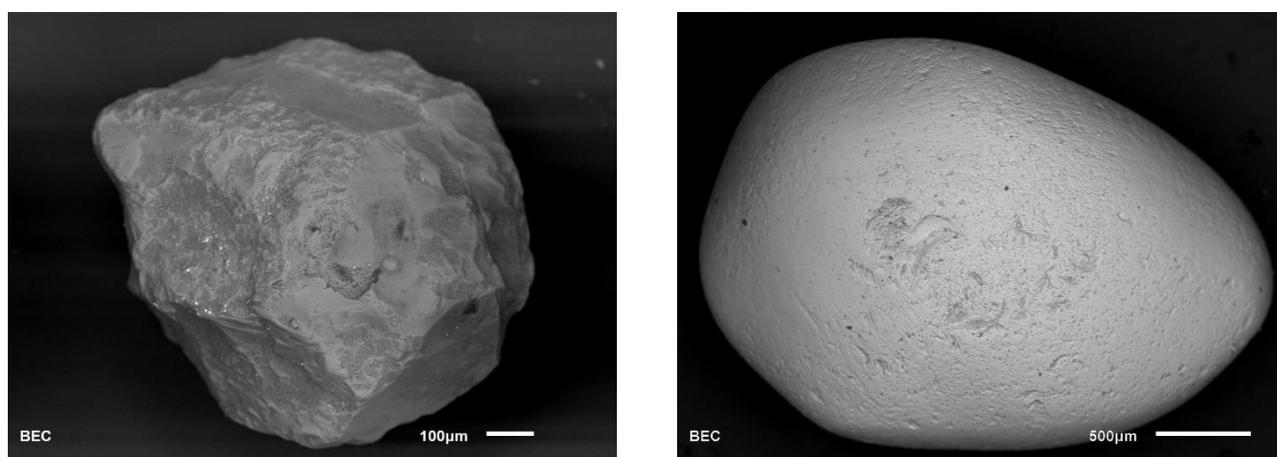


А



Б

**Рис. 13.** Различные степени гипергенной коррозии пиропов: А – Слабая степень, заметная только при применении сканирующего электронного микроскопа (р. Уджа), Б – кубоид, устойчивая форма растворения (р. Биллях).



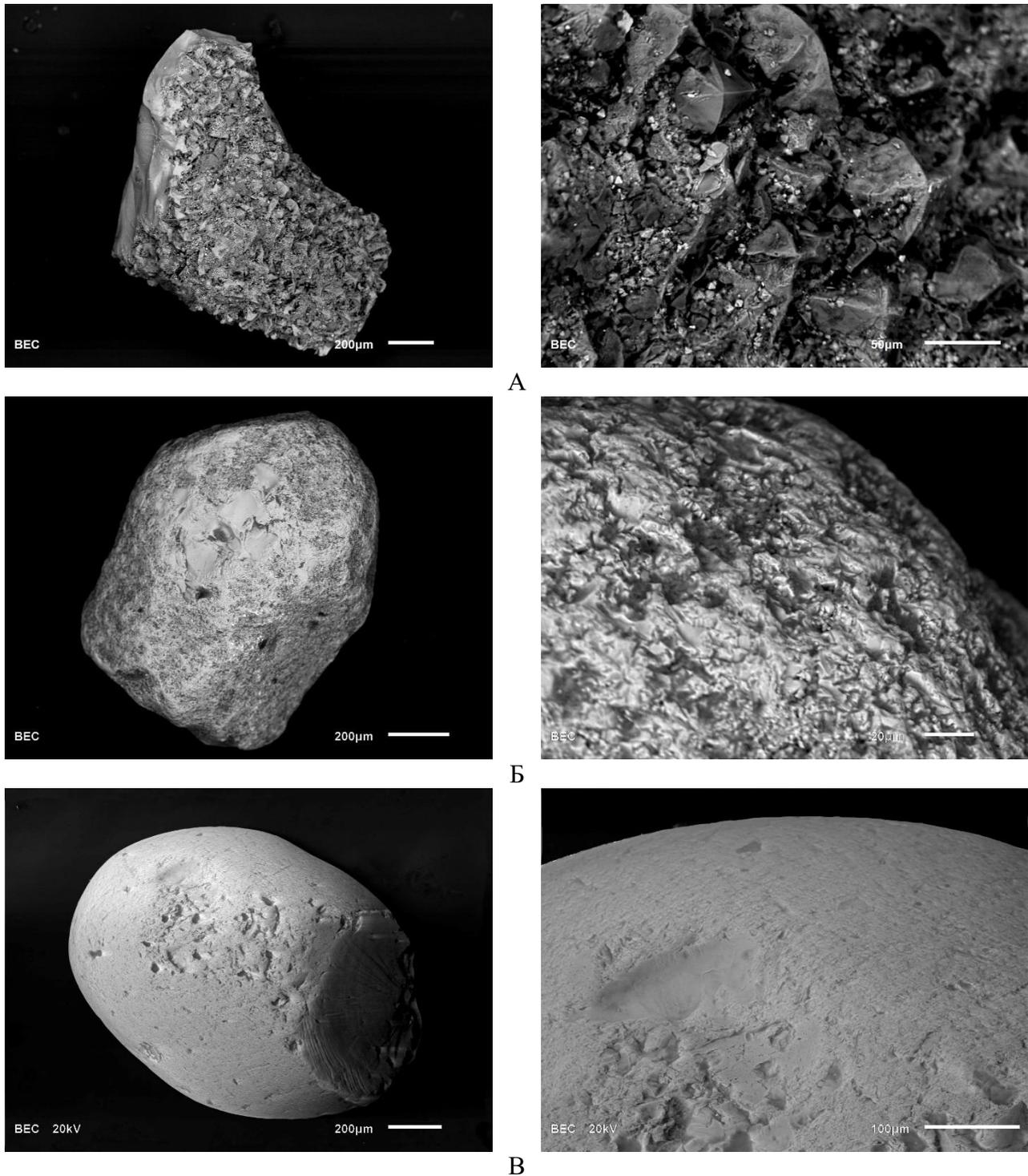
А

Б

**Рис. 14.** Механический износ пиропов: А – слабая степень механического износа; Б – предельная степень докоррозионного износа

Зерна пиропов, по морфологическим особенностям соответствующие продуктам прямого современного размыва кимберлитов, не обнаружены, все пиропы переотложены из ранее существовавших коллекторов.

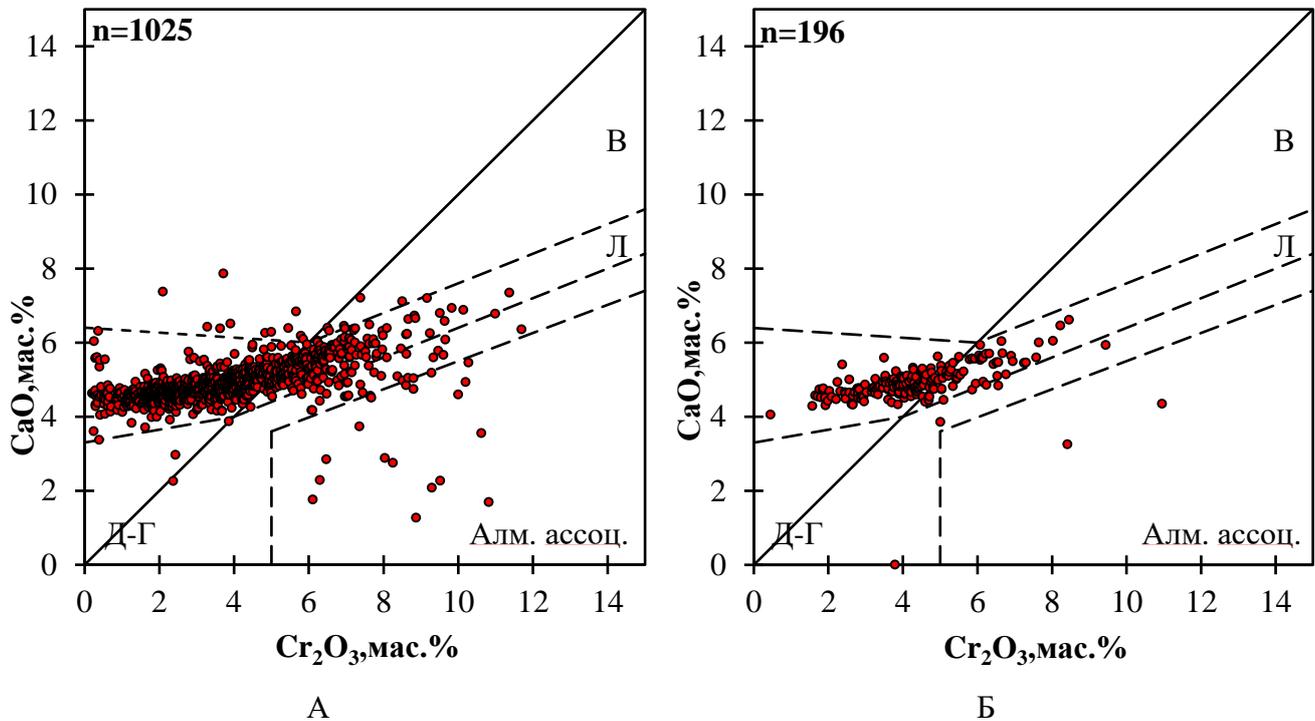
Степень механического износа пикроильменита варьирует от визуально нефиксируемой до предельной с формированием псевдогексагональных табличек. Преобладает средняя степень механического износа (рис. 15).



**Рис. 15.** Морфология пикроильменита: А – пикроильменит без следов механического износа, Б – пикроильменит со средним износом, первичный рельеф практически уничтожен; В – предельная степень окатывания пикроильменита;

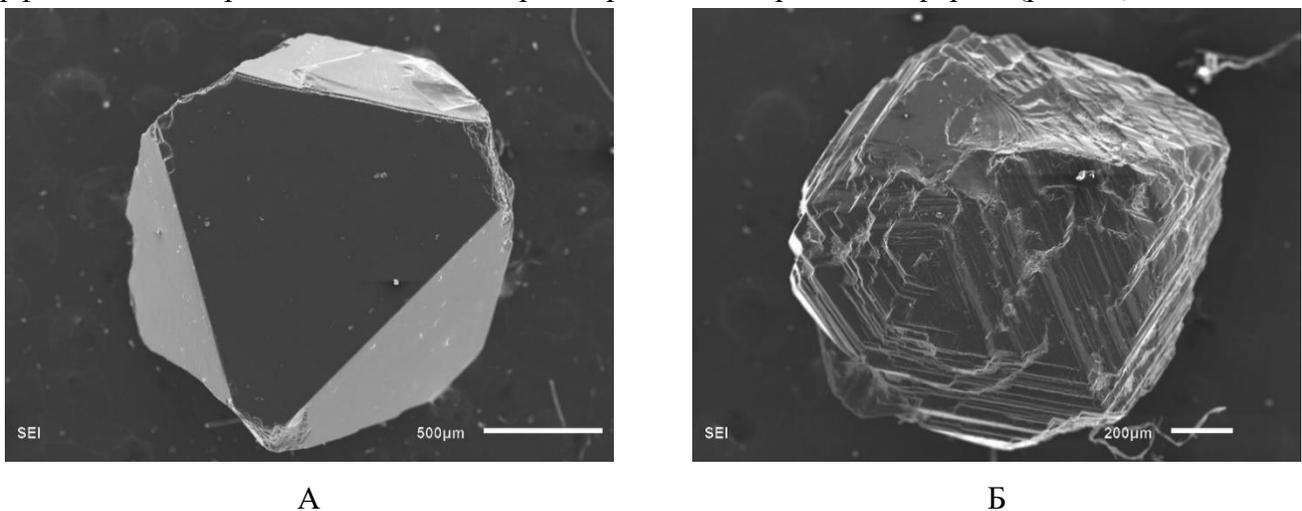
Такой широкий диапазон по степени износа свидетельствует о переотложенном характере пикроильменитов и сложной истории развития ореолов. Наибольший интерес представляют зерна пикроильменитов с минимальным износом, однако, из-за невыраженности гипергенной коррозии не ясно, являются ли они продуктом первичного размыва кимберлитов в девоне, или более поздними поступлениями.

Распределение составов гранатов для всех районов Анабаро-Уджинского междуречья соответствует среднепалеозойским источникам. В небольшом количестве присутствуют гранаты алмазной ассоциации (рис. 16).



**Рис. 16.** Составы гранатов А – р. Уджа с притоками, Б – р. Биллях. Поля по [Sobolev et.al., 1973]: В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм. ассоц – гранаты алмазной ассоциации.

Всего в шлиховых пробах найдено 179 алмазов. Большинство из них соответствуют по морфологии кимберлитовым, это октаэдры и кристаллы переходной формы (рис. 17).



**Рис. 17.** Алмазы кимберлитового типа Анабаро-Уджинского междуречья

На большинстве кимберлитовых алмазов хорошо виден еще один признак происхождения из среднепалеозойских кимберлитов – признаки ожелезнения в коре выветривания, выраженные в коричневых примазках гидроокислов железа на поверхности кристаллов.

Комплекс минералогических критериев оценки возраста коренных источников индикаторных минералов показывает, что основное количество кимберлитовых минералов происходит из среднепалеозойских коренных источников, о чем свидетельствует наличие гипергенных изменений минералов, различная, в том числе повышенная, степень механического износа минералов, типичное «среднепалеозойское» распределение составов пиропов. Присутствие в пробах гранатов алмазной ассоциации, а также широкая распространенность алмазов кимберлитового типа, свидетельствуют об алмазоносности коренных источников.

### Заключение

Проведенные в данной работе исследования дополняют ранее полученные результаты по поисковой минералогии коренных источников алмазов и сводятся к следующему:

1. На природном объекте (Верхнемунское кимберлитовое поле) показано, что при размыве кимберлитов дальность транспортировки индикаторных минералов кимберлитов в аллювиальных условиях может превышать 150 км, сопровождаясь одновременно падением концентрации минералов по мере удаления от источника, поэтому при использовании одинаковых объемов опробования индикаторные минералы улавливаются на ограниченном расстоянии от источника.

2. Онтогенетический и типоморфный анализы индикаторных минералов кимберлитов, опирающиеся на историю развития ореолов Сибирской платформы, позволили разработать комплекс минералогических критериев оценки возраста кимберлитов по их индикаторным минералам из ореолов рассеяния:

-среднепалеозойские кимберлиты диагностируются по признакам повышенного механического износа, гипергенной коррозии минералов и специфике составов пиропов, в том числе алмазной ассоциации;

-триасовые кимберлиты диагностируются преимущественно слабому механическому износу гранатов, отсутствию их гипергенной коррозии, сокращению парагенетического разнообразия пиропов диапазона их хромистости.

-юрско-меловые кимберлиты диагностируются преимущественно слабому механическому износу ИМК, отсутствию их гипергенной коррозии и специфическому составу ассоциаций пиропов, который связан с преобразованием литосферы в мезозое в результате глубинного метасоматоза.

3. Использование комплекса критериев оценки возраста по индикаторным минералам из ореолов позволило надежно обосновать возраст коренных источников для ряда изученных площадей, тем самым выделив из них наиболее перспективные с кимберлитами среднепалеозойского возраста. Данный результат является весомым вкладом в практику геологоразведочных работ на алмазы.

### Список основных публикаций автора по теме диссертации

- *Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:*

1) Афанасьев В.П., Самданов Д.А., Зольников И.Д., Глушкова Н.В., **Егорова Е.О.** Поиски месторождений алмазов: роль рельефа в формировании поисковых обстановок // Отечественная геология, 2012, №3, с. 25-30.

2) **Егорова Е.О.**, Афанасьев В.П., Самданов Д.А. Закономерности транспортировки индикаторных минералов при формировании механических ореолов рассеяния // Руды и металлы, 2013, № 6, с. 35-39.

3) **Егорова Е.О.**, Афанасьев В.П., Похиленко Н.П. О среднепалеозойском кимберлитовом магматизме северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук, 2016, т.470, № 6, с.692-695.

4) Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., **Егорова Е.О.**, Линденблот Е.С. Древнейшие кристаллы алмаза Сибирской платформы // Доклады Академии наук, 2019, т. 489, № 6. с. 611-615.

5) Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Вавилов М.А., Желонкин Р.Ю., Земнухов А.Л., **Барабаш Е.О.**, Самданов Д.А., Федорова Е.И., Малыгина Е.В. Перспективы коренной алмазоносности правобережья реки Анабар (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология, 2019, № 6, с. 3-16.

- *Тезисы конференций:*

1) **Егорова Е.О.**, Афанасьев В.П. Реконструкция истории и условий формирования ореолов индикаторных минералов кимберлитов по минералогическим данным // XX Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Томск: Изд-во ТПУ. 2016. Т.1. С. 220-222

2) **Egorova E.**, Afanas'ev V Mineralogical Features for Determining Age of Kimberlites from Siberian Craton by Kimberlite Indicator Minerals from Placers // Goldschmidt Abstracts. 2017. P. 1036

3) Афанасьев В.П., **Егорова Е.О.**, Похиленко Н.П. Прогнозная оценка перспективных участков коренной алмазоносности Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. 2018. Т.1. С. 183-186.

4) **Егорова Е.О.** Прогнозная оценка перспективных участков коренной алмазоносности Сибирской платформы // XXII Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Томск: Изд-во ТПУ. 2018. Т.1. С. 169-170

5) Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., **Егорова Е.О.**, Линденблот Е.С. Древнейшие алмазы Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах. 2019. С. 114-116.

6) Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Самданов Д.А., **Егорова Е.О.**, Линденблот Е.С. Новые аспекты докембрийской алмазоносности Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах. 2019. С. 116-117.

7) **Егорова Е.**, Афанасьев В.П. Типоморфизм индикаторных минералов кимберлитов из ореолов бассейна реки Муна и закономерности развития их ассоциаций // Литосфера и щелочно-

ультраосновной магматизм Сибирской платформы и ее обрамления: процессы формирования алмазных месторождений, методы прогнозирования и поиска. Сборник научных трудов по фундаментальным исследованиям Института геологии и минералогии СО РАН. Новосибирск. 2018. С. 135-148.

8) **Egorova E.O.**, Afanasiev V.P. "History and formation conditions of Nakyn placers containing kimberlite indicator minerals" // Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics. Book of abstracts. Baku. 2018. P. 149