На правах рукописи

ОПАРИН Николай Александрович

СТРОЕНИЕ, МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВОЗРАСТ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК ХОМПУ-МАЙСКОГО ПОЛЯ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

1.6.3 - Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск.

Научный руководитель:
Олейников Олег Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и петрологии алмазоносных провинций ФГБУН Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск.

Официальные оппоненты:
Афанасьев Валентин Петрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск).
Каргин Алексей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) (г. Иркутск).

Защита состоится «25» декабря 2026 года в 10.00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в большом конференц-зале по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-05-18; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/oparin/dis-Oparin.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01, кандидат геол.-мин. наук А.В. Котляров

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Кимберлиты представляют собой щелочные ультраосновные магматические породы, изучение которых является ключом к пониманию процессов формирования алмазоносных систем. Кимберлитовые трубки Манчары и им. А.П. Смелова Хомпу-Майского поля (ХМП), в отличие от детально изученных тел Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП), остаются малоисследованными, что делает их важными объектами для изучения и уточнения геологических аспектов и особенностей кимберлитового магматизма юго-востока Сибирского кратона. Комплексный подход, включающий анализ строения трубок, минералогического состава слагающих их пород, петрохимических и геохимических особенностей, а также применение современных высокоточных методов геохронологии позволил получить уникальные данные о генезисе кимберлитов Алданской антеклизы.

Результаты исследования способствуют оптимизации стратегии поисковых работ на алмазоносные кимберлиты в недооценённых районах Сибирской платформы. В условиях истощения разрабатываемых алмазных месторождений исследования малоизученных тел, расположенных в стороне от известных кимберлитовых полей ЯКП, представляют значительный научный и практический интерес, так как способствуют обнаружению новых алмазоносных объектов.

Цель работы: установить петрогенетические особенности формирования кимберлитов и возраст трубок Хомпу-Майского поля.

Задачи исследований:

1. Провести минералого- петрографический анализ кимберлитовых пород.

2. Изучить особенности химического состава минералов.

3. Определить петрохимические и геохимические характеристики кимберлитовых пород, их генетические особенности и степень постмагматических преобразований и сравнить с близкими по составу кимберлитами других регионов мира.

4. Оценить возраст кимберлитового магматизма ХМП и его позицию в истории кимберлитообразования Сибирской платформы.

Научная новизна

Впервые доказано, что кимберлитовые диатремы Манчары и им. А.П. Смелова слабо эродированы, а строение их апикальных частей обусловлено процессами постмагматической серпентинизации и карбонатизации кимберлитовых пород. Установлена последовательность преобразования кимберлитов, изменение текстурно-структурных признаков пород, что обуславливает степень сохранности минералов-индикаторов кимберлитов в вертикальном разрезе.

Впервые в кимберлитах Сибирской платформы, в трубке Манчары, диагностированы редкие циркониевые минералы – гранаты кимцеит и керимасит,

титаноцирконат кальция кальциртит, а также редкий гипергенный магнезиально-железистый водный карбонат – коалингит.

Впервые установлен раннеордовикский возраст кимберлитов трубки Манчары, что подтверждает существование на Сибирской платформе раннепалеозойской эпохи кимберлитового магматизма.

Раннепалеозойский возраст и геологическое положение ХМП обосновывают выделение Алданской субпровинции в составе ЯКП.

Теоретическая и практическая значимость работы

Выявленные минералогические особенности кимберлитов, включая наличие циркониевых минералов, подчёркивают уникальность условий формирования этих пород, связанных с обогащением расплава Zr, Ba, Sr, F и CO_2. Кроме того, теоретическая значимость исследования определяется развитием представлений о процессах преобразования верхней части раннепалеозойских кимберлитов Хомпу-Майского поля.

Практическая значимость определяется возможностью использования полученных данных о строении верхних горизонтов трубок для оптимизации поисковых стратегий на кимберлитовые тела с малым эрозионным срезом, где традиционные минералы-индикаторы кимберлитов могут быть утрачены в результате воздействия постмагматических процессов. Установленный раннеордовикский возраст трубки Манчары (472±1 млн лет) расширяет временные рамки кимберлитового магматизма на Сибирской платформе и увеличивает перспективы обнаружения алмазоносных кимберлитовых трубок на новой территории, так как все известные коренные месторождения алмаза на Сибирской платформе не моложе среднепалеозойского возраста.

Материалы исследований использованы в производственных отчетах АК «АЛРОСА» и АО «Якутскгеология».

Защищаемые положения

1. Кимберлиты трубок Хомпу-Майского поля обладают сходными текстурно-структурными особенностями, обусловленными эксплозивными процессами и преобразованием в результате серпентинизации и карбонатизации на постмагматической стадии. Постмагматические преобразования пород определяют минимальную сохранность минералов-индикаторов кимберлитов на самых верхних горизонтах трубок.

2. Кимберлиты трубок Хомпу-Майского поля формировались при участии Ba–Sr–F–CO_2-обогащённого флюида, что выражено в присутствии стронциевого кальцита в виде включений в макрокристаллах магнезиохромита и в основной массе, бариевого флогопита и стронциевого фторапатита и позволяет отнести эти породы к кальцитовым кимберлитам. В трубке Манчары данный режим сопровождался локальным обогащением остаточного расплава цирконием в SiO_2-дефицитных условиях и кристаллизацией редких циркониевых фаз – керимасита, кимцеита и кальциртита.

3. Раннеордовикский возраст кимберлитовой трубки Манчары (472±1 млн лет), установленный методом U-Pb (ID-TIMS) датирования перовскита, обосновывает существование новой раннепалеозойской эпохи кимберлитового магматизма на Сибирской платформе и позволяет выделить Алданскую субпровинцию в составе Якутской кимберлитовой провинции.

Фактический материал и методы исследований

Фактическим материалом исследования послужили образцы кимберлитов трубок Манчары (n=342) и им. А.П. Смелова (n=56), отобранные лично автором из кернового материала. Для проведения аналитических работ было изготовлено 450 шлифов, 217 аншлифов, 24 полированных шлифа и 106 порошковых проб. Для реализации поставленных задач использовались макро- и микроописание пород, методы оптической и электронной микроскопии, микрозондового анализа, порошкового рентгенофазового анализа, силикатного анализа, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, комбинационного рассеяния (КР) и U-Pb (ID-TIMS) датирования. Микроскопическое изучение петрографических особенностей пород проводилось на поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axioscop 40 (ИГАБМ СО РАН). Петрохимическое исследование кимберлитовых пород проводилось в ИГАБМ СО РАН методом силикатного анализа. Минеральный состав кимберлитовых пород определялся методом качественного рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 PHASER фирмы Bruker в ИГАБМ СО РАН. Состав, зональность и взаимоотношение различных минеральных фаз определялись в ИГАБМ СО РАН (г. Якутск) на электронном сканирующем микроскопе Jeol (JSM-6480LV) с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА, на микрозондовом анализаторе Jeol (JXA-8230) с волновым спектрометром в Центральной аналитической лаборатории НИГП АК "АЛРОСА" (г. Мирный), а также на микрозондовом анализаторе Jeol (JXA-8230) с волновым спектрометром в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Картирование методом комбинационного рассеяния (КР) проводилось на автоматизированной системе Apryon в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Определение редких элементов в образцах кимберлитов исследуемых трубок проводилось в ООО «ХАЦ «Плазма» (г. Томск) на масс-спектрометре ELAN (модель DRC-e, № W1520501) по методике МВИ № 002-ХМС-2009, ФР.1.31.2010.06997, зарегистрированной в Федеральном реестре аттестованных методик выполнения измерений. U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования перовскита основной массы кимберлита осуществлялись в лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом режимах (при помощи счётчика ионов).

Апробация работы и публикации

Материалы исследований опубликованы в 12 научных статьях, 11 из которых входят в перечень ВАК, а в 8 соискатель является первым автором. Результаты исследований были доложены на 11 конференциях: «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», IV – XV Всероссийские и

международные научно-практические конференции (ИГАБМ СО РАН, Якутск, с 2014 по 2026 гг.); XVII Всероссийской конференции «Глубинный магматизм, его источники и плюмы» (ИГХ СО РАН, Иркутск, 2024).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается: в отборе образцов, их первичной пробоподготовке для минералогических, петрохимических и геохимических исследований; макро- и микроскопическом изучении кимберлитов, проведении исследований рентгеноспектральным методом анализа; обработке, интерпретации и визуализации всех полученных результатов, формулировке основных научных выводов и защищаемых положений.

Структура и объем диссертации

Диссертация объемом 277 страниц состоит из титульного листа, оглавления, введения, 6 глав, заключения и списка литературных источников из 238 наименований. В работе содержится 67 рисунков, 6 таблиц и 27 приложений. В главе 1 рассмотрены история открытия и степень изученности ХМП, а также его геологическое положение и палеогеодинамические условия сохранности трубок. В главе 2 изложены методические подходы и аналитические методы исследований. В главе 3 приведена петрографическая характеристика кимберлитов ХМП В главе 4 представлена петролого-геохимическая характеристика исследуемых кимберлитов. В главе 5 охарактеризован минеральный состав кимберлитов ХМП. В главе 6 обсуждается возраст кимберлитов ХМП и приведены результаты U–Pb (ID-TIMS) датирования перовскита кимберлитов трубки Манчары и их интерпретация.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, к.г.-м.н. Олейникову Олегу Борисовичу (ИГАБМ СО РАН), за ценные рекомендации, консультации и всестороннюю поддержку на всех этапах выполнения диссертационной работы. Особую признательность автор выражает к.г.-м.н. Стифеевой Марии Владимировне (ИГГД РАН) за помощь в проведении геохронологических исследований и профессиональные советы по кристаллохимии минералов супергруппы граната.

Автор благодарен д.г.-м.н. Корсакову Андрею Викторовичу (ИГМ СО РАН) за помощь в проведении КР-исследований и к.г.-м.н. Антону Дмитриевичу Павлушину (ИГАБМ СО РАН) за консультации по кристаллографии, которые помогли пониманию исследуемой темы.

Отдельная благодарность выражается главному геофизику АО "Якутскгеология" Бекреневу Константину Алексеевичу за плодотворное сотрудничество и поддержку в ходе выполнения исследований.

Автор выражает искреннюю признательность к.г.-м.н. Королевой Ольге Валерьевне (ИГАБМ СО РАН) за ценные замечания и внимательное отношение к деталям, которые способствовали улучшению качества работы.

Автор глубоко благодарен сотрудникам лаборатории геологии и петрологии алмазоносных провинций ИГАБМ СО РАН Биллер Анастасии Яковлевне,

Новгородову Анатолию Николаевичу и Потаповой Виктории Владимировне за техническую помощь в подготовке диссертации и обработке каменного материала, а также коллективу Отдела физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН за содействие в проведении аналитических исследований.

Особую благодарность автор выражает своей семье за неизменную поддержку, понимание и терпение на протяжении всего периода работы над диссертацией.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (проект FUFG-2024-0007).

Изложение результатов в автореферате дается по защищаемым положениям.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ХОМПУ-МАЙСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

Объектом исследования являются кимберлиты трубок ХМП, которое расположено в 800 км к юго-востоку от ЯКП на северном склоне Алданской антеклизы Сибирского кратона в пределах Учурского террейна Алдано-Станового щита (Smelov, Timofeev, 2007) (рис. 1). Поле включает восемь тел, образующих Хомпу-Майский (трубки Манчары, им. Артемова, Эрэл Турахская) и Барылайский кусты (трубки им. А.П. Смелова, Дабан, Апрельская и Атырдах). Трубки прорывают карбонатные породы среднего кембрия и перекрыты юрскими терригенными толщами мощностью до 150 м (рис. 1). Для исследования были выбраны трубки Манчары и им. А.П. Смелова, как наиболее репрезентативные.

Трубки ХМП приурочены к древним зонам тектонического меланжа (ЗТМ), что типично для большинства кимберлитовых полей ЯКП, которые располагаются вблизи таких зон на расстоянии ~60 км (Смелов и др., 2012). Пограничные области с ЗТМ могут рассматриваться как площади, частично контролирующие проявление кимберлитового магматизма (Смелов и др., 2012). Значимым фактором является рельеф кристаллического фундамента Алданской антеклизы, представленного гранитоидами возрастом 2540 ± 34 млн лет (Смелов и др., 2013). Трубка Манчары приурочена к участку с резким перегибом рельефа фундамента (Смелов и др., 2012), где мощность осадочного чехла, состоящего из рифейских, кембрийских и мезозойских отложений, не превышает 3 км (Никулин и др., 2002). Это соответствует общей закономерности расположения кимберлитовых полей Сибирской платформы на склонах крупных пологих поднятий фундамента с маломощным чехлом (до 2–3 км) (Брахфогель, 1984).

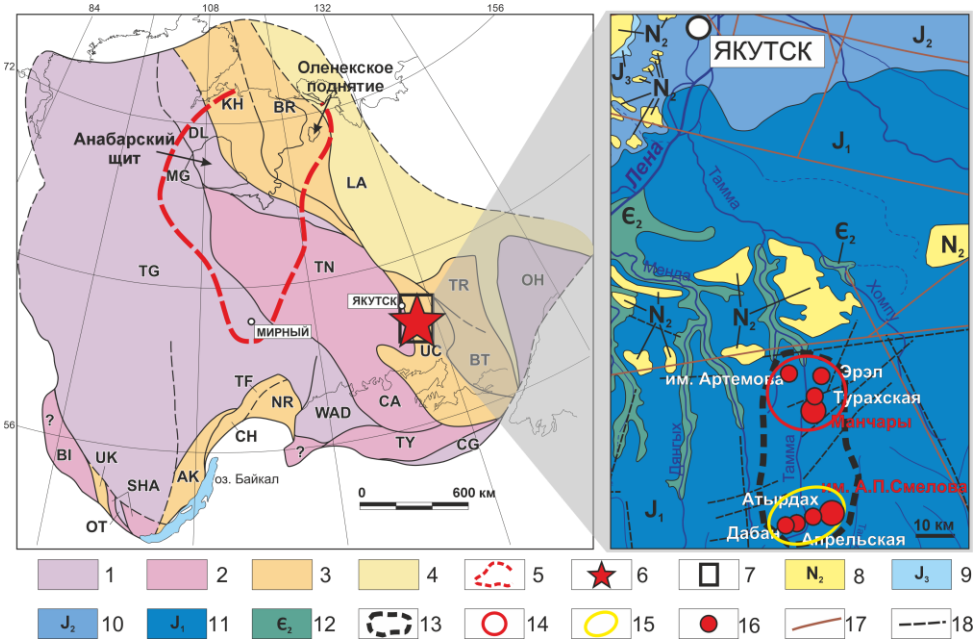

Рис. 1. Положение Хомпу–Майского кимберлитового поля и Якутской кимберлитовой провинции, по (Smelov, Timofeev, 2007): 1 – архей; 2 – архей и палеопротерозой нерасчлененные; 3 – палеопротерозой; 4 – мезопротерозой; 5 – контур Якутской кимберлитовой провинции; 6 – Хомпу–Майское кимберлитовое поле; 7 – область врезки; 8 – верхний неоген; 9 – верхняя юра; 10 – средняя юра; 11 – нижняя юра; 12 – средний кембрий; 13 – контур Хомпу–Майского поля; 14 – Хомпу–Майский куст; 15 – Барылайский куст; 16 – кимберлитовые трубки; 17 – линейные элементы, предположительно разломной природы; 18 – разломы неустановленной морфологии. Докембрийские террейны: Западно–Алданский (WAD), Центрально–Алданский (CA), Учурский (UC), Батомгский (BT), Чогарский (CG), Тындинский (TY), Далдынский (DL), Хапчанский (KH), Маганский (MG), Акитканский (AK), Чуйский (CH), Нечерский (NR), Тонодский (TF), Шарыжалгайский (SHA), Онотский (OT), Охотский (OH), Урикско–Лийский (UK), Бирюсинский (BL), Тунгусский (TG), Тюнгский (TN), Биректинский (BR), Тырынский (TR), Лено–Алданский (LA).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

<u>Первое защищаемое положение:</u> *Кимберлиты трубок Хомпу-Майского поля обладают сходными текстурно-структурными особенностями, обусловленными эксплозивными процессами и преобразованием в результате серпентинизации и карбонатизации на постмагматической стадии. Постмагматические преобразования пород определяют минимальную сохранность минералов-индикаторов кимберлитов на самых верхних горизонтах трубок.*

Обе исследуемые трубки в плане имеют овальную форму. Трубка им. А.П. Смелова (300 × 500 м) вскрыта буровыми скважинами до глубины 200 м от поверхности диатремы, а трубка Манчары (250 × 300 м) до 120 м. В разрезе трубка им. А.П. Смелова имеет конусовидную форму (рис. 2, а), а трубка Манчары – воронкообразную (рис. 3, а). В соответствии с петрографическими особенностями кимберлитов и наблюдаемыми вторичными изменениями в строении апикальных частей исследуемых трубок выделены три горизонта – нижний, средний и верхний, мощности которых в конкретной трубке индивидуальны (Опарин, Олейников, 2022). Трубка Манчары сложена преимущественно порфировым кимберлитом с массивной текстурой цемента и средне-крупнопорфировой структурой при содержании ксенолитов осадочных пород и серпентинитов менее 10 об.%. В трубке им. А.П. Смелова вследствие неравномерного распределения ксенолитов присутствуют как порфировые кимберлиты (<10 об. % ксенолитов), так и кимберлитовые брекчии (10–40 об. % ксенолитов). Между порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией наблюдаются постепенные переходы и отсутствуют магматические контакты (Опарин, Олейников, 2022).

Трубка им. А.П. Смелова. Нижний горизонт (172–200 м), сложен наименее изменёнными порфировым кимберлитом (рис. 2, е) и кимберлитовой брекчией (Опарин, Олейников, 2022; Опарин, Олейников, 2024). Порфировая структура обусловлена наличием в разной степени серпентинизированных зерен оливина (рис. 2, ж). Среди вкрапленников отмечаются макрокристаллы пикроильменита и пиропа. Мезостазис состоит из кальцита, серпентина, флогопита, апатита, ильменита, минералов группы шпинели и перовскита.

В интервале глубин 45–172 м среднего горизонта наблюдается чередование блоков наименее изменённых и фрагментированных кимберлитов (рис. 2, а). Это чередование связано с эксплозивными процессами и постмагматической серпентинизацией, благодаря которой сформировалась кальцит–серпентиновая связующая масса, содержащая реликты наименее измененного кимберлита с флогопит–серпентин–карбонатным мезостазисом. Реликты преимущественно неправильной и, редко, шарообразной формы, обуславливают автолитоподобную текстуру породы (рис. 2, г, д). Морфология реликтов позволяет рассматривать их как возможные магмакласты, сформированные при эксплозивной фрагментации частично раскристаллизованного кимберлитового материала, впоследствии интенсивно переработанного постмагматическими процессами. Реликты характеризуются порфировой структурой, обусловленной псевдоморфозами серпентина по оливину. Мезостазис реликтов характеризуется преобладанием кальцита над серпентином и повышенным содержанием рудных минералов (рис. 2., д). Первичные минералы в связующей массе сохранились в виде единичных зерен флогопита, перовскита, минералов группы шпинели и апатита.

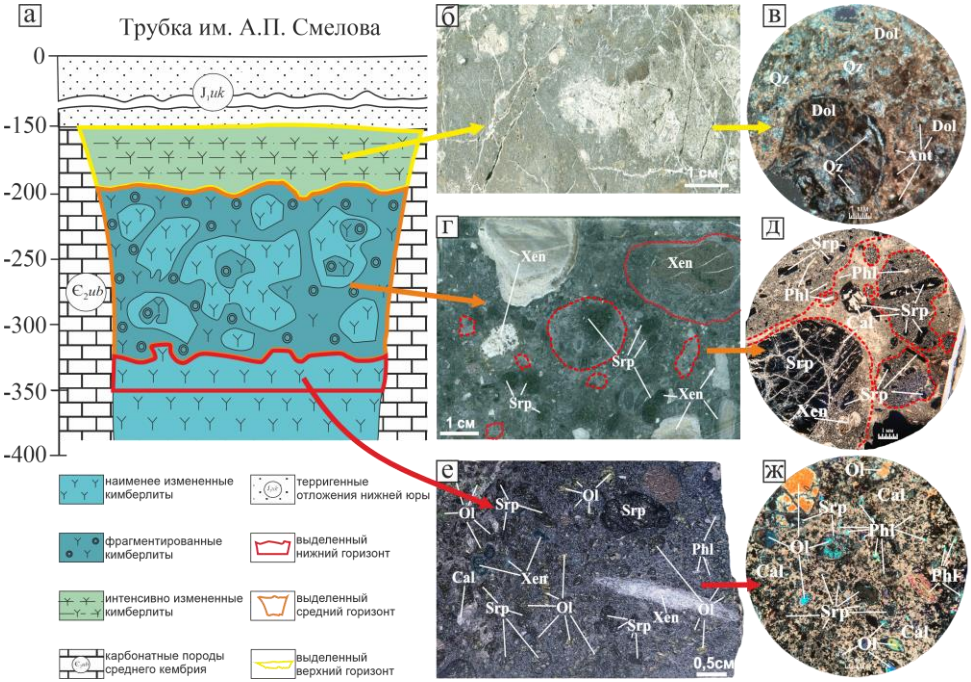

Рис. 2. Вертикальное строение кимберлитовой трубки им. А.П. Смелова: а – схематический разрез трубки, б – окварцованный кимберлит, верхний горизонт; в – микрофотография окварцованного кимберлита, николи скрещены; г – фрагментированная кимберлитовая брекчия, средний горизонт; д – микрофотография фрагментированной кимберлитовой брекчии, николи параллельны; е – наименее измененный порфировый кимберлит, нижний горизонт; ж – микрофотография мезостазиса порфирового кимберлита, николи скрещены. Условные обозначения: Xen – ксенолит, Ol – оливин, Phl – флогопит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, Qz – кварц, Dol – доломит, Ant – анатаз.

Верхний горизонт трубки им. А.П. Смелова до 45 м характеризуется хаотичным чередованием неравномерно карбонатизированых блоков с блоками частично окварцованных кимберлитов. Карбонатизация и окварцевание приводят к частичной утрате породой первичных текстурно–структурных признаков, что не исключает изначально фрагментированную природу кимберлитов этого горизонта. Мезостазис окварцованных кимберлитов выполнен преимущественно кварцем с реликтовыми зернами апатита и анатаза. Доломит присутствует в подчиненном количестве. Основная масса карбонатизированных кимберлитов имеет преимущественно доломитовый состав. Здесь также наблюдаются резорбированные зерна апатита и анатаза.

Трубка Манчары характеризуется аналогичным вертикальным строением (Опарин, Олейников, 2022). В ней также выделяются нижний (100–120 м) наименее

измененный, средний (30–100 м) фрагментированный и верхний (до 30 м) интенсивно карбонатизированный горизонты (рис. 3). Некоторые отличия заключаются в мощностях выделенных горизонтов и отсутствии окварцованных блоков в верхней части трубки Манчары (рис. 3, б, в).

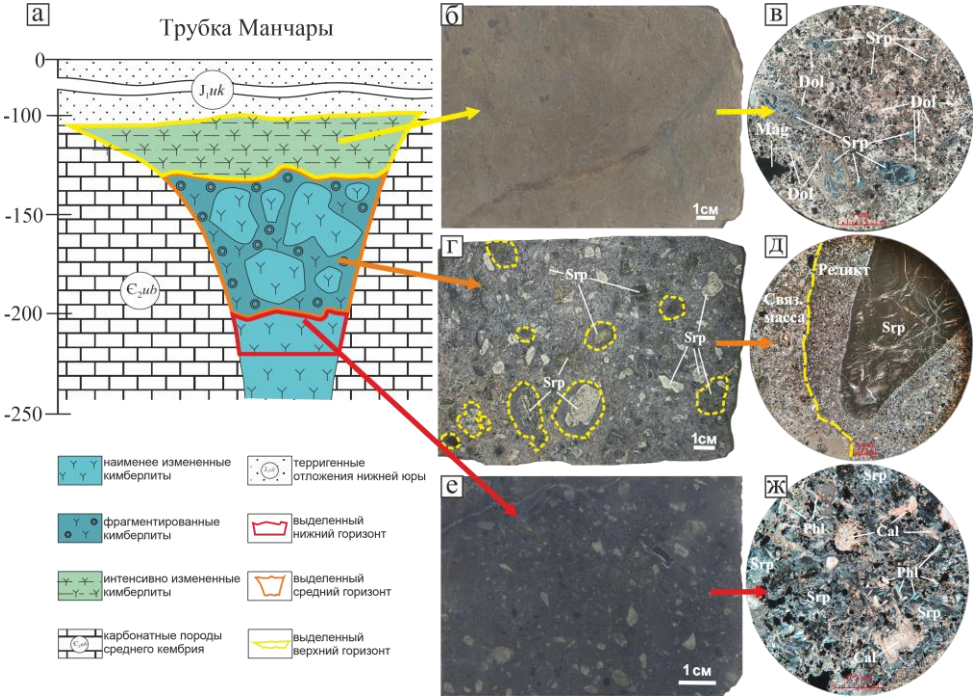

Рис. 3. Вертикальное строение кимберлитовой трубки Манчары: а – схематический разрез трубки, б – карбонатизированный кимберлит, верхний горизонт; в – микрофотография карбонатизированного кимберлита, николи скрещены; г – фрагментированный порфировый кимберлит, средний горизонт; д – микрофотография фрагментированного порфирового кимберлита, николи скрещены; е – наименее измененный порфировый кимберлит, нижний горизонт; ж – микрофотография мезостазиса порфирового кимберлита, николи скрещены. Условные обозначения: Phl – флогопит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, Dol – доломит.

Установленное вертикальное строение трубок ХМП отражает особенности формирования тел и обосновывает их небольшой эрозионный срез, который определяет практическое отсутствие ореолов рассеяния индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) – пикроильменита, пиропа и хромшпинелида, так как сохранился верхний горизонт изменённых вторичными процессами кимберлитов, в котором данные минералы в результате постмагматических изменений практически

отсутствуют (Опарин, Олейников, 2022). Этот факт подтверждается результатами обогащения керна, в котором автор принимал непосредственное участие.

<u>Второе защищаемое положение:</u> *Кимберлиты трубок Хомпу-Майского поля формировались при участии Ba–Sr–F–CO_2-обогащённого флюида, что выражено в присутствии стронциевого кальцита в виде включений в макрокристаллах магнезиохромита и в основной массе, бариевого флогопита и стронциевого фторапатита и позволяет отнести эти породы к кальцитовым кимберлитам. В трубке Манчары данный режим сопровождался локальным обогащением остаточного расплава цирконием в SiO_2-дефицитных условиях и кристаллизацией редких циркониевых фаз – керимасита, кимцеита и кальциртита.*

Кимберлиты были классифицированы по петрохимической схеме, основанной на соотношениях индикаторных оксидов FeO_{tot}, TiO_2 и K_2O (Костровицкий и др., 2004). Установленные медианные значения оксидов в кимберлитах трубки Манчары (FeO_{tot} = 10,26 мас. %, TiO_2 = 3,69 мас. % и K_2O = 0,35 мас. %) позволяют отнести их железисто-титанистому, низко-калиевому типу 4, а трубки им. А.П. Смелова (FeO_{tot} = 7,76 мас. %, TiO_2 = 2,43 мас. % и K_2O = 0,44 мас. %) - к магнезиально–железистому, высоко-титанистому, низко-калиевому типу 3.

На дискриминантной диаграмме Тейлора (Taylor et al., 1994) кимберлиты обеих трубок приурочены к полям кимберлитов группы 1, что соответствует умеренному обогащению K_2O, TiO_2 и P_2O_5 с сохранением магнезиального характера расплава (рис. 4, а). По оси функции Factor 2, отражающей баланс силикатной и кальциевой составляющих мезостазиса, трубки, образуют два частично перекрывающихся поля, что связано с различной интенсивностью проявления постмагматических процессов карбонатизации и серпентинизации.

На спайдердиаграммах в спектрах кимберлитов наблюдаются отрицательные аномалии K, Rb, Ba, Sr, Ti, Pb (рис. 4, б) и, в целом, сопоставимость более со спектрами кимберлитов группы I (Le Roex et al., 2003), чем кимберлитов ЯКП (Каргин и др., 2011). В трубке Манчары наиболее высокие концентрации Zr (725,2–1579,66 г/т) установлены в кимберлитах, содержащих скопления циркониевых гранатов и кальциртита, тогда как в образцах без циркониевых минералов содержание Zr (415,26 г/т) сопоставимо с кимберлитами трубки им. А.П. Смелова (272,53–680,49 г/т). Близкие концентрации Zr установлены в содержащих циркониевые гранаты и кальциртит (Mitchell, 1994) кальцитовых кимберлитах силлов Вэсселтон (439–1399 г/т) (White et al., 2012) и Бенфонтейн (1150 г/т) (McDonald et al., 1995). Сопоставление с медианными значениями содержаний Zr в кимберлитах Каапваальского (257,7 г/т) и Сибирского (146 г/т) кратонов (Giuliani et al., 2025) позволяет сделать вывод о том, что кимберлиты ХМП по содержанию Zr близки кимберлитам группы I Южной Африки. Повышенные содержания Zr характерны для кальцитовых кимберлитов, что дополнительно подтверждает принадлежность изученных кимберлитов к этой группе пород.

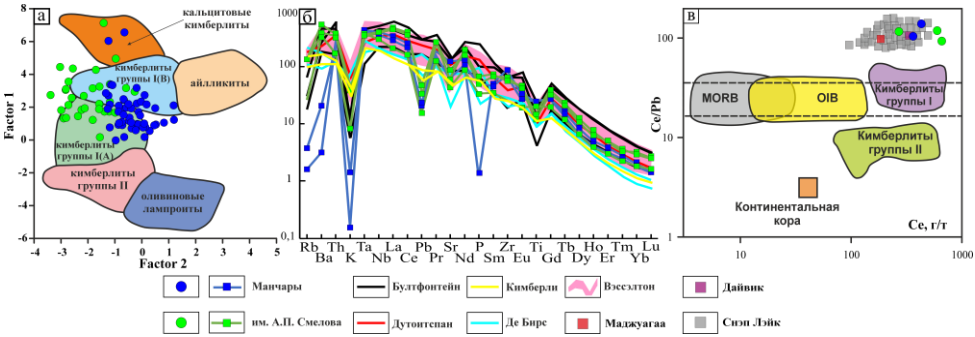

Рис. 4. Особенности химического и микроэлементного состава кимберлитов Хомпу-Майского поля: а – дискриминантная диаграмма Factor 1 – Factor 2 по (Taylor et al., 1994), б – нормированные к примитивной мантии (McDonough, Sun, 1995) содержания редких элементов в кимберлитах Хомпу–Майского поля и провинции Кимберли (ЮАР) (Le Roex et al., 2003); в – диаграмма Ce–Ce/Pb в кимберлитах Хомпу–Майского поля по (Le Roex et al., 2003). Поле базальтов океанических островов Южной Атлантики (OIB) нанесены по (Le Roex, 1985; Le Roex et al., 1990; Le Roex et al., 2003). Поле базальтов срединно-океанических хребтов Южной Атлантики (MORB) нанесены по (Le Roex et al., 2002). Поля кимберлитов групп I и II по (Le Roex et al., 2003). Значения для континентальной коры по (Rudnick, Fountain, 1995). Составы кальцитовых кимберлитов дайки Снэп Лэйк по (Fulop et al., 2018), трубки Дайвик и дайки Маджуагаа по (Zech et al., 2025).

Соотношения несовместимых микроэлементов Nb/U (34,64–65,35) дополняют сходство трубок Манчары и им. А.П. Смелова с кимберлитами группы I, подтверждая происхождение исследуемых кимберлитов из субконтинентальной литосферной мантии при низких степенях частичного плавления (Le Roex et al., 2003). Близкие значения Ce/Pb (рис. 4, в) с кальцитовыми кимберлитами даек Снэп Лэйк (Fulop et al., 2018) и Маджуагаа (Zech et al., 2025), а также трубки Дайвик (Zech et al., 2025) подтверждают тот факт, что такое экстремальное соотношение Ce/Pb хоть и не характерно для кимберлитов группы I, но соответствует минимальному вовлечению корового вещества (Le Roex et al. 2003) и, по всей вероятности, является типоморфным геохимическим признаком кальцитовых кимберлитов, подтверждая принадлежность исследуемых нами кимберлитов к этой группе пород.

Несмотря на значительные постмагматические изменения в кимберлитах трубок Манчары и им. А.П. Смелова сохранились первичные магматические минералы. В трубке Манчары оливин по всему изученному разрезу полностью замещён серпентином и кальцитом. В трубке им. А.П. Смелова реликты неизмененного оливина установлены в кимберлите наиболее глубоких горизонтов. Для большинства зерен оливина характерно зональное строение (рис. 5, а).

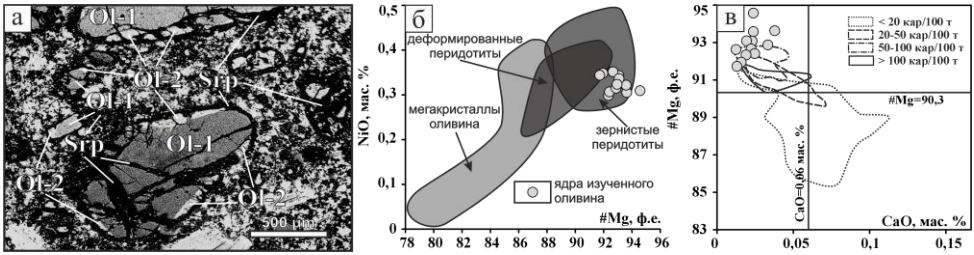

Рис. 5. Оливин из кимберлитов трубки им. А.П. Смелова: а - BSE-изображение зональных кристаллов оливина (Ol-1 – ядро, Ol-2 – кайма, Srp – серпентин);б - состав ядер зональных кристаллов оливина в координатах #Mg-NiO; в - состав ядер зональных кристаллов оливина в координатах CaO-#Mg. Поля составов оливина из ксенолитов зернистых и деформированных перидотитов, а также мегакристаллов оливина нанесены по (Giuliani, 2018). Поля содержаний алмаза в кимберлитах мира в зависимости от соотношения CaO–#Mg в оливине нанесены по (Giuliani et al., 2023).

Зональность оливина, характеризуется уменьшением магнезиальности #Mg в направлении ядро→кайма. Ядра являются высокомагнезиальными (Kamenetsky et al., 2008; Howarth, Taylor, 2016; Giuliani, 2018; Lim et al., 2018; Soltys et al., 2020, Abersteiner et al., 2022), диапазон #Mg составляет 91,73–94,57 (рис. 5, б). С понижением магнезиальности в направлении ядро→кайма наблюдается общая тенденция к уменьшению содержаний NiO и увеличению концентраций MnO и CaO, что интерпретируется как результат кристаллизации кайм из эволюционирующего кимберлитового расплава (Kamenetsky et al, 2008; Brett et al., 2009; Arndt et al, 2010; Giuliani, 2018; Abersteiner et al, 2022; Howarth et al, 2025; Головин, Тарасов, 2025). В большинстве кимберлитов каймы оливина обеднены Cr_2O_3 относительно ядер из-за раннего выделения Cr-содержащих фаз. В оливине трубки им. А.П. Смелова каймы обогащены Cr_2O_3 до 0,14 мас. %, что согласуется с отсутствием в них включений и редкой кристаллизацией хромита/магнезиохромита в мезостазисе. Поэтому рост кайм оливина происходил до кристаллизации хромсодержащих Fe–Ti-оксидов основной массы кимберлита. Составы ядер оливина попадают в поле составов оливина из ксенолитов зернистых перидотитов кратонной литосферной мантии (рис. 5, б). На диаграмме CaO–#Mg (рис. 5, в) исследуемые ядра оливина из кимберлитов трубки им. А.П. Смелова (высокие значения #Mg при низком содержании CaO) сосредоточены в левом верхнем квадранте – области, связанной с кимберлитами, пересекающими слабо метасоматизированные, обеднённые кальцием высокомагнезиальные участки литосферной мантии, потенциально благоприятные для сохранности алмазов (Giuliani et al., 2023).

Пикрольменит диагностирован в наименее карбонатизированных кимберлитах нижнего и среднего горизонтов обеих трубок. В трубке Манчары установлены только макро- и мегакристаллы (Опарин, Олейников, 2019). Содержание MgO в них составляет 7,5 – 13,5 мас %. В трубке им. А.П. Смелова

пикроильменит представлен единичными макрокристаллами и многочисленными микрокристаллами мезостазиса. Среди них встречаются зональные и однородные зерна. Центральные зоны с высоким MgO (12–15 мас. %), внешние зоны с высоким содержанием MnO (5–7 мас. %) и пониженным MgO (4–6 мас. %) и примесью Nb_2O_5 до 2,43 мас. %. Подобные Mn-ильмениты были установлены в кальцитовых кимберлитах трубок Премьер (Wyatt, 1979; Dongre, Tappe, 2019) и Койду (Tompkins, Haggerty, 1985). Вокруг макрокристаллов обеих трубок также наблюдаются реакционные каймы минералов группы шпинели и перовскита, образованных при взаимодействии кристаллов ильменита с кимберлитовым расплавом, а позже с посткимберлитовым CO_2-флюидом в условиях высокой активности кислорода (Геншафт, Илупин, 1982; Agee et al., 1982; Голубкова и др., 2013).

По содержанию Cr_2O_3 среди пикроильменитов наблюдаются высокохромистая и низкохромистая популяции (Опарин, Олейников, 2019). Пикроильменит обеих трубок соответствует правой ветви параболы Хаггерти, что свидетельствует о восстановительных условиях формирования минерала (Haggerty et al., 1979). Учитывая, что на раннемагматической стадии Cr предпочтительнее входит в состав макрокристаллов хромита и магнезиохромита, в большом количестве присутствующих в трубке Манчары (Опарин, Олейников, 2018), можно предположить, что к кимберлитовому пикроильмениту относятся его низкохромистые разности, а высокохромистые имеют ксеногенную природу.

Минералы группы шпинели в кимберлитах трубок ХМП встречаются в виде макрокристаллов (хромит и магнезиохромит) и микрокристаллов, причем в трубке им. А.П. Смелова макрокристаллы единичны (Опарин, Олейников, 2024). Отдельные макрокристы магнезиохромита из трубки Манчары содержат включения кальцита. Микрокристаллы в обеих трубках присутствуют в виде атолловых (магнезиохромит, магнезиоферрит, магнетит) кристаллов, входят в состав полиминеральных реакционных кайм (магнезиоферрит, магнетит) вокруг макрокристаллов пикроильменита, а также фиксируются в виде включений в перовскитe (магнетит, магнезиоферрит) и флогопите (магнезиохромит).

Макрокристаллы магнехиохромита и хромита из трубки Манчары на диаграмме Fe^{3+}-Al-Cr (рис. 6) попадают в поле первичной шпинели (Roeder, 2008) и являются кимберлитовыми. Микрокристаллы эволюционируют от магнезиохромита к магнезиоферриту и далее к титаномагнетиту и магнетиту (рис. 6), образуя тренд от поля составов первичной шпинели (Chr) до полей магнезиального ульвошпинель-магнетита (Mum) и магнетита (Mag). Этот тренд характерен для шпинелидов обеих трубок и расположен ближе к тренду 2 по (Roeder, 2008), обусловленному сокристализацией с флогопитом мезостазиса, истощающего расплав по Mg и Al, что приводит к повышению Fe^{3+} и Ti в минералах группы шпинели (рис. 6).

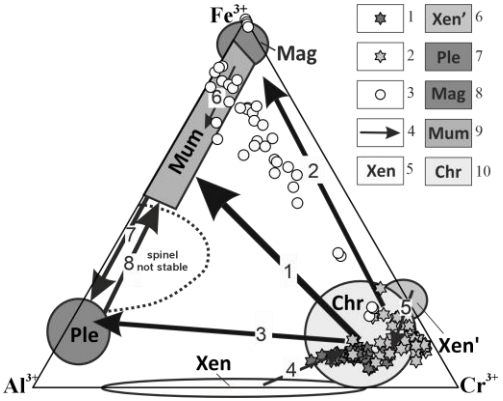

Рис. 6. Составы шпинелидов трубки Манчары: 1 – макрокристаллы магнезиохромита, 2 - макрокристаллы хромита, 3 – микрокристаллы минералов группы шпинели; тренды и поля составов по (Roeder, 2008): 4 – эволюционные тренды, 5 – шпинелевые ксенокристы из перидотитов, 6 – метасоматизированные шпинелевые ксенокристы из перидотитов, 7 – плеонаст, 8 – магнетит, 9 – магнезиальный ульвошпинель-магнетит, 10 – первичный хромит.

Перовскит является широко распространённым минералом основной массы. Он также входит в состав реакционных полиминеральных кайм вокруг пикроильменита. В перовскite трубки Манчары, из-за низкой совместимости Na в перовскite (D_{Na} ~ 0,17–0,19) (Chakhmouradian et al., 2013) от центра к краю отмечается снижение Na_2O (от 0,8 до 0,63 мас. %). Также наблюдается уменьшение содержаний ΣREE вследствие их конкурирующего накопления в апатите, который в карбонатно-насыщенных системах способен иметь D_{REE} от 1 до 7 (Guo et al., 2024). Для трубки Манчары рассчитанные значения fO_2 по перовскитовому оксибарометру ΔNNO (Bellis, Canil, 2007; Bellis, Canil, 2008) находятся в интервале значений от −4,80 до −1,60. Близкие оценки фугитивности кислорода Δ_{log}(FMQ) от +0,23 до -4,95 установлены для ксенолитов перидотитов Сибирского кратона (Dymshits et al., 2020; Yaxley et al., 2012). Это свидетельствует об относительно восстановительных условиях кристаллизации перовскита трубки Манчары. Для трубки им. А.П. Смелова установлен диапазон ΔNNO от −2,47 до +0,62 и частично сопоставим с лампрофирами Аладно-Станового щита (Doroshkevich et al., 2022). Полученные значения fO_2 для обеих трубок укладываются в широкий интервал, характерный для кимберлитов мира (Bellis, Canil, 2007).

Флогопит в трубке Манчары присутствует в виде мегакристаллов, сегрегаций и минерала основной массы (Опарин, Олейников, 2021). Ядра мегакристов обогащены Cr_2O_3 до 0,86 мас. % и попадают в область слюд мантийных перидотитов (Dawson, Smith, 1975) (рис. 7, а). Периферийные зоны характеризуются низкими содержаниями Cr_2O_3 до 0,02 мас. % и попадают в область мегакристов из кимберлитов (рис. 7, а). Сегрегации слюды образованы разноориентированными пластинками, межзерновое пространство между которыми выполнено серпентином и кальцитом. Пластинки имеют зональное строение с общей тенденцией уменьшения BaO от центра к краю и по составу соответствуют бариевому и барийсодержащему флогопиту (рис. 7, б) (Опарин, Олейников, 2021). Слюда основной массы ассоциирует с апатитом и также представлена разнонаправленными пластинками с обратной по барию зональностью (рис. 7, б).

В трубке им. А.П. Смелова флогопит мезостазиса представлен пластинками с обратной, редко с прямой зональностью по BaO и незональным бариевым флогопитом (Опарин, Олейников, 2024). Флогопиты основной массы обеих трубок образуют единое поле с флогопитом кальцитовых кимберлитов дайки Снэп Лейк (Kopylova et al., 2010) и трубки Премьер (рис. 7, б), отличаясь от слюд из карбонатитов (Gaspar, Wyllie, 1984), айликитов (Tappe et al., 2004; Nielsen et al., 2009; Kargin et al., 2017; Dongre, 2020; Nosova et al., 2020), йолитов (Beccaluva et al., 2017), лампрофиров (Greenwood, 1998), мелилититов (Velde et al., 1979) и мантийных перидотитов (Gaspar, Wyllie, 1984). Это может свидетельствовать о универсальности режимов кристаллизации флогопита на позднемагматической стадии формирования кальцитовых кимберлитов. Таким образом, исследуемый флогопит кристаллизовался в несколько этапов. Первая генерация флогопита, представленная высокохромистыми ядрами мегакристов образовалась в мантии. Завершение их кристаллизации происходило в кимберлитовом расплаве, что подтверждается низкохромистыми краевыми зонами мегакристов. Затем на позднемагматической стадии при высокой концентрации Ba в остаточном расплаве началась кристаллизация бариевого флогопита, и по мере снижений его концентраций формировались зоны барийсодержащего флогопита.

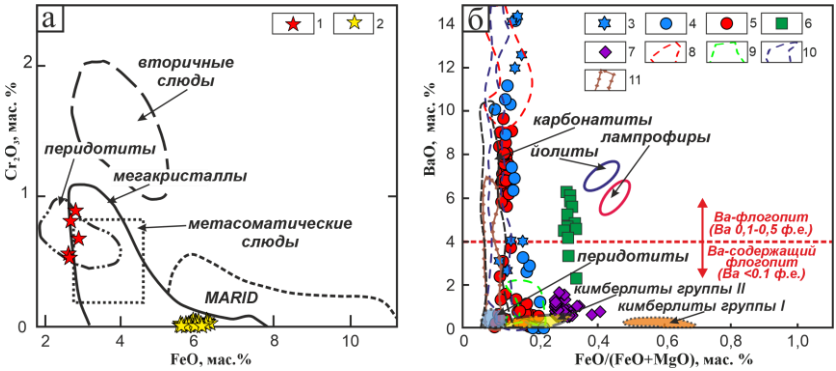

Рис. 7. Состав флогопита кимберлитов трубок Хомпу-Майского поля в координатах (а) FeO-Cr_2O_3 (Dawson, Smith, 1975), (б) FeO/(FeO+MgO)-BaO (Gaspar, Wyllie, 1982: 1 – ядра мегакристаллов флогопита трубки Манчары, 2 – края мегакристаллов флогопита трубки Манчары, 3 – флогопит сегрегаций трубки Манчары, 4 – флогопит мезостазиса трубки Манчары, 5 – флогопит мезостазиса трубки им. А.П. Смелова, 6 - флогопит мелилититов (Velde et al., 1979), 7 - флогопит айлликитов (Tappe et al., 2004; Nielsen et al., 2009; Kargin et al., 2017; Dongre, 2020; Nosova et al., 2020), 8 – поле состава флогопита из гипабиссального кимберлита Пайбалд трубки Премьер (Dongre et al., 2019), 9 – поле состава флогопита кальцитового кимберлита трубки Премьер (Dongre et al., 2019), 10 – поле составов флогопита дайки Снэп Лейк (Kopylova et al., 2010), 11 – поле составов флогопита силлов Вэссэлтон (Zech et al., 2025). Поля составов

карбонатитов, перидотитов и кимберлитов по (Gaspar et al., 1984), йолитов по (Beccaluva et al., 2017), лампрофиров по (Greenwood et al., 1998).

Апатит в трубке Манчары представлен идиоморфными зернами с обратной зональностью по SrO (Опарин, Олейников, 2020). В мезостазисе он ассоциирует с флогопитом и перовскитом (рис. 8, а). По составу минерал соответствует высокостронциевому фторапатиту (2,85-3,53 мас. % F, до 9,64 мас. % SrO) (рис. 8, б). В трубке им. А.П. Смелова апатит незонален, хотя встречается в тех же парагенезисах, что и в трубке Манчары (Опарин, Олейников, 2024). Он представлен гипидиоморфными резорбированными кристаллами: на нижних горизонтах это низкостронциевый фторапатит (3,29-3,66 мас. % F, 0,26-0,3 мас. % SrO), по составу близкий к апатиту силлов Бенфонтейн (Soltys et al., 2017) (рис. 8, б), а в среднем и верхнем – стронциевый фторсодержащий гидроксиапатит (1,66-2,26 мас. % F, 1-3,65 мас. % SrO), частично совпадающий с полем составов апатита дайки Снэп Лейк (Milligan, 2017) (рис. 8, б). Появление стронциевого фторапатита и бариевого флогопита связывается с выделением из остаточного расплава на позднемагматической стадии CO_2-обогащённого флюида, в котором накапливаются несовместимые элементы Ba, Sr и F.

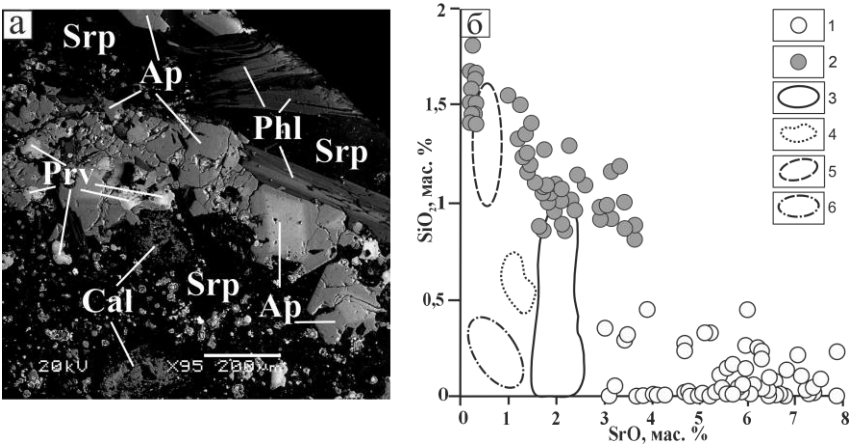

Рис. 8. Апатит из кимберлитов Хомпу-Майского поля: а – апатит в мезостазисе трубки Манчары, б – состав апатита в координатах SrO-SiO₂. Условные обозначения: 1 – трубка Манчары, 2 – трубка им. А.П. Смелова, 3 – дайка Снэп Лейк (Milligan, 2017), 4 – силлы Вэссэлтон (Soltys et al., 2017), 5 – силлы Бенфонтейн (Soltys et al., 2017), 6 – ксенолиты перидотитов из базальтов комплекса Янъюань (Zhao et al., 2015). Ap – апатит, Srp – серпентин, Cal – кальцит, Phl – флогопит, Prv – перовскит.

Впервые для кимберлитов Сибирской платформы установлены редкие циркониевые минералы: Ca–Ti-гранаты – кимцеит ($Ca(Zr,Ti)_2(Si,Al^{3+})_3O_{12}$) и керимасит ($Ca(Zr,Ti)_2(Si,Fe^{2+})_3O_{12}$), а также титаноцирконат кальция – кальциртит ($Ca_2Zr_5Ti_2O_{16}$) (Опарин и др., 2025). Гранаты и кальциртит присутствуют

неравномерно в мезостазисе нижнего и среднего горизонтов трубки Манчары в ассоциации друг с другом и с типичными позднемагматическими минералами – перовскитом, шпинелидами, апатитом и флогопитом (рис. 9, а). Циркониевые гранаты представлены мелкими скелетно-зональными (часто атолловыми) кристаллами и их сростками (рис. 9, а). В зональных ядрах обычно прослеживается следующая последовательность, обусловленная уменьшением содержания Zr в зонах от центра к краю ядра: керимасит/кимцеит→Zr-шорломит→андрадит (рис. 9, б). Внешняя скелетная зона соответствует гидрогранату андрадитового состава (рис. 9, б), что подтверждается результатами КР-спектроскопических исследований. Кристаллизация циркониевых минералов в трубке Манчары связана с локальным обогащением позднемагматического остаточного расплава Zr на фоне общей эволюции кимберлитового расплава к SiO_2-дефицитным, карбонатно-обогащённым составам и выделения CO_2-флюида из остаточного расплава. Источником Zr могли служить обломочные цирконы из метаморфических пород, фиксируемые в тяжёлой неэлектромагнитной фракции. Незакономерный характер изменения содержаний Zr в кимберлитах трубки Манчары и морфологические особенности зерен циркониевых гранатов однозначно свидетельствуют об их метасоматическом происхождении.

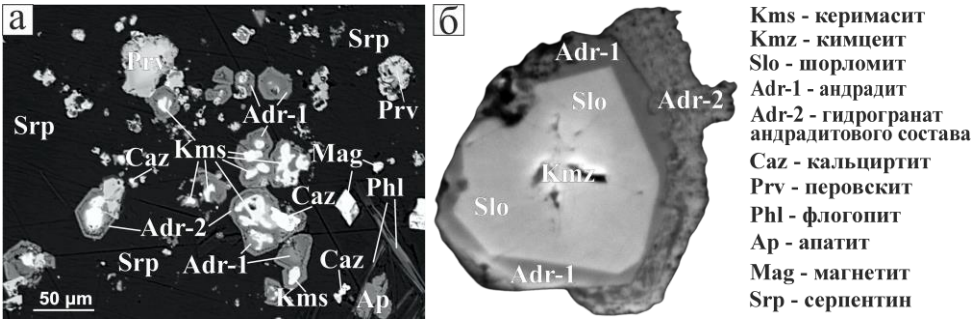

Рис. 9. Циркониевые минералы трубки Манчары: а – скопления атолловых скелетно-зональных кристаллов гранатов в мезостазисе кимберлита, б – скелетно-зональный кристалл граната с фрагментом внешней скелетной зоны и идиоморфным зональным ядром. BSE.

Карбонатные минералы присутствуют в обеих трубках. В трубке Манчары кальцит выявлен в полифазных, повторяющих форму минерала хозяина, включениях в макрокристаллах магнезиохромита (рис. 10, а). Часть зерен кальцита проявляет зональность по SrO – до 2,6 мас. %. Некоторые из включений вскрыты трещинами, образованными под влиянием эффекта декомпрессии (Arndt et al., 2010) (рис. 10, а). В нижнем горизонте трубки Манчары встречаются идиоморфные зерна кальцита и железистого кальцита в срастании с апатитом и перовскитом (рис. 10, б). Среди них также встречаются индивиды, зональные по SrO (от 1,83 до 3,63 мас. % SrO). Подобные идиоморфные стронциевые карбонаты были зафиксированы в кальцитовых кимберлитах силлов Бенфонтейн и Вэссэлтон, дайки Снэп Лейк, трубок Дайвик и Маджуагаа (Masun, 1999; Armstrong et al., 2004; Mitchell, 2008;

Castillo-Oliver et al., 2018; Zech et al., 2025) и интерпретируются как индикаторы позднемагматической стадии эволюции мезостазиса, накапливающие стронций из CO_2-флюида, выделившегося из остаточного расплава. Наиболее распространённый тип карбонатов в обеих трубках – ксеноморфные выделения, заполняющие интерстиции мезостазиса. По составу они варьируют от кальцита и железистого кальцита в нижних горизонтах трубок до доломита и железосодержащего доломита на верхних уровнях (рис. 10, в). Разграничить первично магматические и постмагматические ксеноморфные карбонаты сложно из-за их возможной перекристаллизации (Wilson et al., 2007; Giuliani et al., 2017, Зинчук, 2023). В среднем горизонте трубки Манчары впервые для кимберлитов установлен редкий экзогенный магнезиально-железистый водный карбонат коалингит ($Mg_{10}Fe_2(OH)_{24}(CO_3)2H_2O$), интерпретируемый как продукт локального взаимодействия дезинтегрированного кимберлита с межпластовыми водами (Zayakina et al., 2015). Нормативные оценки, рассчитанные по данным валового содержания CO_2 в кимберлитах обеих трубок, показывают рост карбонатной компоненты снизу вверх по разрезу, что отражает усиление постмагматической карбонатизации. При этом существенное отличие трубки им. А.П. Смелова от трубки Манчары заключается в более высоком нормативном количестве карбонатных минералов уже на нижних горизонтах.

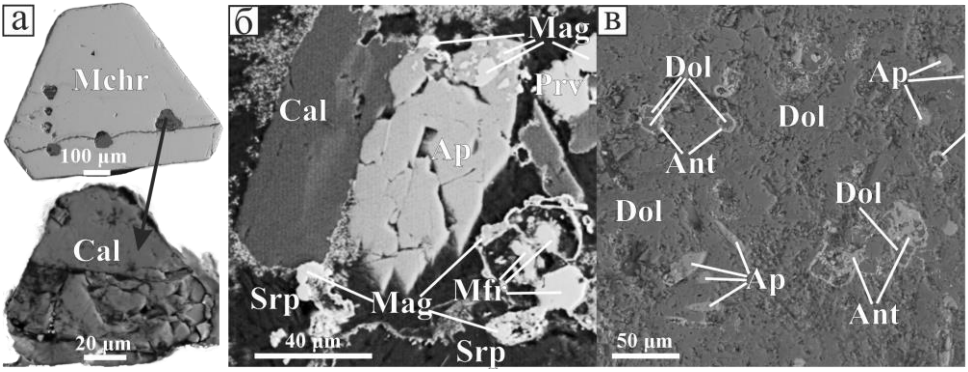

Рис. 10. Карбонатные минералы трубок Хомпу-Майского поля: а – включения кальцита в макрокристаллах магнезиохромита из трубки Манчары, б – идиоморфный кальцит мезостазиса кимберлитов трубки Манчары, д – доломит мезостазиса кимберлитов верхнего горизонта трубки им. А.П. Смелова. Cal – кальцит, Dol – доломит, Mchr – магнезиохромит, Mag – магнетит, Mfr-магнезиоферрит, Prv – перовскит, Ant – анатаз, Srp – серпентин. BSE.

<u>Третье защищаемое положение</u>: *Раннеордовикский возраст кимберлитовой трубки Манчары (472 ± 1 млн лет), установленный методом U-Pb (ID-TIMS) датирования перовскита, обосновывает существование новой раннепалеозойской эпохи кимберлитового магматизма на Сибирской платформе и позволяет выделить Алданскую субпровинцию в составе Якутской кимберлитовой провинции.*

По результатам Rb–Sr датирования основной массы кимберлитов – 358±42 млн лет, трубка Манчары была отнесена к среднепалеозойской эпохе кимберлитообразования (Зайцев, Смелов и др., 2010). U–Pb датирование перовскита и апатита из трубок Атырдах и им. А.П. Смелова показали возраст 425–431 млн лет, а по кимберлитовым цирконам из тех же трубок – 485,1–486,6 млн лет (Махоткин и др., 2021). Нами были проведены U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования микронавесок перовскита мезостазиса кимберлитов трубки Манчары получен конкордантный возраст 472 ± 1 млн лет (рис. 11, а) (Олейников и др., 2024). Такие значения, свидетельствуют о том, что кимберлитовый магматизм ХМП относится к ранее не выделяемой для ЯКП раннепалеозойской эпохе. С учетом отсутствия доказательной базы полихроности кимберлитовых полей ЯКП (Мальковец и др., 2017) предполагается, что полученная датировка соответствует возрасту этого поля. Раннепалеозойский возраст трубки Манчары Хомпу-Майского поля согласуется с существованием на данной территории перерыва в осадконакоплении – «палеотектонической ниши», соответствующей этапу длительного или контрастного воздымания больших частей Сибирской платформы (Брахфогель, 1984). Кимберлитовый раннепалеозойский магматизм в пределах Алданской антеклизы, по всей видимости, мог быть вызван небольшими мантийными аномалиями или метасоматическими процессами в литосферной мантии, но не связан с крупномасштабными плюмами, подобными Якутскому и Сибирскому (Ernst, 2014), так как имеет более древний возраст (рис. 11, б).

Известные в пределах Алданской антеклизы щелочно-ультраосновные породы, слагающие мезозойские (Nikolenko et al., 2020) и докембрийские (Yarmolyuk et al., 2005; Прокопьев и др., 2022) трубки взрыва Чомполинского, Тобук-Хатыстырского, Ингилийского полей, а также дайки ультраосновного щелочного фоскорит-карбонатитового комплекса Арбарастах, ранее были идентифицированы, как кимберлиты (Каминский, Потапов, 1970; Глаголев и др., 1974). Это послужило предпосылкой для выделения в данном районе Алданской кимберлитовой провинции (Каминский, Потапов, 1970). Более поздние исследования пород этих тел показали, что по минералогическим, петрохимическим и другим особенностям эти породы не являются кимберлитами, а относятся к лампроитам, миннетам и ультраосновным лампрофирам (Богатиков и др., 1991; Корнилова, 1997; Nikolenko et al., 2020; Doroshkevich et al., 2022). Их главными особенностями являются: значительная роль в составе клинопироксена и калиевого полевого шпата, отсутствие граната дунит-гарцбургитового алмазного парагенезиса и, в подавляющем большинстве случаев, пиропа. Таким образом, исторически сложившееся представление об «Алданской кимберлитовой провинции» в первоначальном смысле опиралось на породы, которые при современном уровне изученности не следует рассматривать как проявления кимберлитового магматизма.

Трубки ХМП по петрографическим, геохимическим и минералогическим данным сложены порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией (Смелов и др., 2010; Опарин, Олейников, 2022; Опарин, Олейников, 2024). Поэтому наличие кимберлитовых трубок в пределах Алданской антеклизы служит прямым

свидетельством существования кимберлитового магматизма на ее территории. При этом Хомпу-Майское поле имеет возраст, отличный от возрастов полей ЯКП, и территориально удалено от кимберлитоконтролирующих зон, в пределах которых сосредоточены поля ЯКП (Брахфогель, 1984). В связи с этим выделение Алданской кимберлитовой субпровинции (Олейников и др., 2024), как структурно и геохронологически самостоятельной части ЯКП, представляется обоснованным. Эпоха кимберлитообразования такого возраста расширяет поисковый потенциал новой территории, включая вероятность выявления алмазоносных трубок, поскольку все известные коренные месторождения алмазов на Сибирской платформе не моложе среднепалеозойского возраста (Брахфогель, 1984; Зайцев, Смелов и др., 2010; Мальковец и др., 2017).

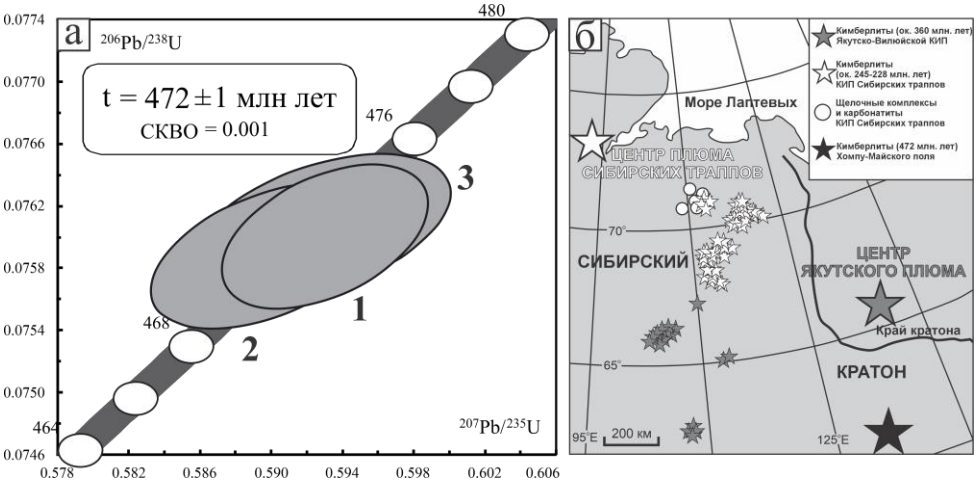

Рис. 11. Диаграмма с конкордией для перовскита из кимберлитов трубки Манчары (а) и схема расположения кимберлитов Хомпу-Майского поля относительно кимберлитов Якутской кимберлитовой провинции и центров мантийных плюмов по (Ernst, 2014) (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трубки ХМП имеют сходное вертикальное строение, обусловленное эксплозивными процессами и различной степенью постмагматических преобразований. Постмагматические преобразования пород определяют минимальную сохранность минералов-индикаторов кимберлитов на самых верхних горизонтах трубок.

Петрохимические и геохимические данные указывают на принадлежность кимберлитов трубок Манчары и им. А.П. Смелова к единой петрогенетической общности и на их соответствие низкокремнеземистым кимберлитам группы I. Соотношения Nb/U и Ce/Pb, а также выраженная Pb-аномалия согласуются с

происхождением расплавов из субконтинентальной литосферной мантии при минимальном вовлечении корового вещества. Высокое соотношение Ce/Pb, по всей вероятности, является типоморфным геохимическим признаком кальцитовых кимберлитов, подтверждая принадлежность исследуемых кимберлитов к этой группе пород.

Минералогические данные свидетельствуют об участии на позднемагматической стадии CO_2-флюидов, обогащённых Ba, Sr, F и Zr, выделившихся из остаточного расплава. Наличие редких цирконийсодержащих минералов, характерных для кальцитовых кимберлитов, также позволяет отнести породы исследуемых трубок к кальцитовым кимберлитам.

Полученный раннеордовикский возраст кимберлитов трубки Манчары подтверждает существование на Сибирской платформе раннепалеозойской эпохи кимберлитового магматизма и обосновывает выделение Алданской субпровинции в составе ЯКП.

Результаты работы создают основу для дальнейших исследований кимберлитов Алданской антеклизы, направленных на уточнение источников и петрогенезиса магм, оценку роли флюидов и развитие минералого-геохимических критериев прогнозирования и поиска алмазоносных тел в данном регионе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Смелов А.П., Белоусова Е.А., Зайцев А.И., Олейников О.Б., Павлушин А.Д., **Опарин Н.А.** Первые данные о составе и возрасте погребённого фундамента Алданской антеклизы (Сибирская платформа): результаты датирования ксеногенного циркона из кимберлитов трубки Манчары // Отечественная геология. 2013. № 5. С. 68–72.

Зайцев А.И., Олейников О.Б., **Опарин Н.А.**, Алтухова З.А., Бабушкина С.А. Rb-Sr изотопная геохимия и возраст кимберлитов аномалии ТНМ-04-11 (Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия) // Отечественная геология. - 2014. - № 5. - С. 64–68.

Zayakina N.V., Oleinikov O.B., Vasileva T.I., **Oparin N.A.** Coalingite from kimberlite breccia of the Manchary pipe, Central Yakutia // Geology of ore deposits. 2015. V. 57 (8). P. 732–736.

Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности минерального состава кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля // Арктика XXI век. Технические науки. 2015. № 1 (3). С. 12–20.

Опарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 37–44.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // Отечественная геология. 2018. № 5. С. 35–41.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // Отечественная геология. 2019. № 6. С. 43–49.

Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 3. С. 15–26.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Минералы ряда флогопит-киноситалит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 4. С. 29–42.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Т. 27, № 4. С. 486–498.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Вещественный состав кимберлитов трубки им. А.П. Смелова (Центральная Якутия) // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 31–41.

Олейников О.Б., Стифеева М.В., **Опарин Н.А.**, Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ощепкова М.Г. U-Pb (ID-TIMS)-возраст перовскита из кимберлитов трубки Манчары (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 517, № 2. С. 203–207.