

На правах рукописи



Жгилев Александр Павлович

**ГЕОХИМИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТОВЫХ МАГМ И
МЕГАКРИСТАЛЛОВ ТЭСИЙНГОЛЬСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО АРЕАЛА
СЕВЕРНОЙ МОНГОЛИИ**

Специальность 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические
методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Перепелов Александр Борисович, доктор геолого-минералогических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН), г. Иркутск

Официальные оппоненты:

Цыганков Андрей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ

Чувашова Ирина Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории изотопии и геохронологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток

Защита диссертации состоится **24 декабря 2025 г. в 10-00 часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 664033, а/я 9, г. Иркутск, ул. Фаворского, стр. 1А.
e-mail: dmitrieva@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте <http://www.igc.irk.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Гребенщикова В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В последние более чем 30 млн. лет, начиная от олигоцена и вплоть до голоцена в Центральной Азии, в южном обрамлении Сибирского кратона, в Монголии и Китае проявился щелочно-базальтовый вулканизм. В результате дискретной во времени эндогенной активности здесь была образована большая группа рассеянных в регионе вулканических ареалов, природа которых до сих пор дискутируется. Итоги исследований вулканизма этого региона отражены во многочисленных публикациях, к примеру [Кисилев и др., 1979; Рассказов, 1996; Barry et al., 2003; Demonterova et al., 2007; Savatenkov et al., 2010; Hunt et al., 2012; Tsypukova et al., 2014; Yarmolyuk et al., 2014; Ivanov et al., 2015; Ancuta, 2017; Liu et al., 2018; Litasov et al., 2019; Togtokh et al., 2019; Perepelov et al., 2020; Цыпукова и др, 2022].

Совокупность полученных ранее сведений о кайнозойском вулканизме в Центральной Азии позволяет рассматривать вопросы строения и взаимодействия вещества литосферной и астеносферной мантии, реконструировать природу и состав источников базальтоидных магм, и геодинамические условия их проявления. Тем не менее, новые исследования ранее не изученных или слабо изученных кайнозойских вулканических ареалов в этом регионе нередко дополняют или устанавливают ограничения на ранее разработанные петрогенетические модели.

На территории Монголии одним из крупных и слабоизученных позднекайнозойских вулканических ареалов с проявлением щелочно-базальтовых магм является Тэсийнгольский ареал, расположенный в пределах Тувино-Монгольского микроконтинента в Северной Монголии [Салтыковский, Генштафт, 1983]. В строении этого ареала выделяются лавово-пирокластические толщи, лавовые плато и вулканические центры. В вулканогенных породах ареала широко распространены мантийные ксенолиты перидотитов и пироксенитов, а также мегакристаллы калиевых и темноцветных минералов. Ряд таких вопросов, как возраст формирования, особенности минералогического и изотопно-геохимического состава пород, а также вопросы происхождения щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов ареала, как и вопросы их парагенетической связи до сих пор оставались не решенными.

Тэсийнгольский позднекайнозойский вулканический ареал и входящие в его состав вулканические центры Угуумур и Бодь-уул являются **главными объектами** исследований настоящей диссертационной работы.

Актуальность проведенного исследования заключается в разработке модели развития магматической системы Тэсийнгольского вулканического ареала, что вносит значительный вклад в понимание причин и особенностей развития позднекайнозойской внутриплитной вулканической активности в Центральной Азии. Актуальным также является определение условий происхождения мегакристаллов темноцветных минералов, процессов их преобразования, и роли карбонатного вещества в происхождении и эволюции щелочно-базальтовых магм.

Целью работы является установление источников, условий происхождения и минералого-геохимических особенностей внутриплитных щелочно-базальтовых магм и определение парагенетических связей с ними мегакристаллов калиевых и темноцветных минералов на примере Тэсийнгольского позднекайнозойского вулканического ареала Северной Монголии.

Основные задачи исследования - определить возраст формирования вулканических центров Тэсийнгольского вулканического ареала; - провести типизацию пород и установить направленность вещественной эволюции вулканизма во времени; - определить составы минеральных парагенезисов вулканических пород и мантийных ксенолитов; - провести изучение мегакристаллов калиевых и темноцветных минералов, установить их состав,

изотопные и редкоэлементные характеристики; -изучить процессы преобразования мегакристаллов при их транспортировке щелочно-базальтовыми магмами; - установить парагенетические связи щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов; - определить источники вещества и роль карбонатного вещества в образовании и эволюции щелочно-базальтовых магм Тэсийнгольского ареала.

Фактический материал. Исследования выполнены на основе коллекции пород и минералов научного руководителя Перепелова А.Б. и материалов, полученных с участием автора при проведении экспедиционных исследований Тэсийнгольского вулканического ареала с 2016 по 2023 год. Коллекция включает 165 образцов пород, 162 мегакристаллов и 25 мантийных включений. Изучено более 80 шлифов пород, 30 аншлифов, получено более 3300 анализов минералов и 80 анализов составов пород.

Методы исследований. Аналитические исследования вулканических пород, мегакристаллов и ксенолитов Тэсийнгольского ареала проведены в ИГХ СО РАН (ЦКП «Изотопно-геохимических исследований», г. Иркутск), в ИЗК СО РАН (ЦКП «Геодинамика и геохронология», г. Иркутск), в ГИН СО РАН (ЦКП «Геоспектр», г. Улан-Удэ), а также в ИГМ СО РАН (ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований», г. Новосибирск).

В работе использовались минералого-петрографические и изотопно-геохимические методы исследований. Структуры пород и их минеральный состав изучались с использованием современных поляризационных микроскопов. Составы минералов были установлены с применением EDS метода микроанализа, дифрактометрии. Состав пород, мегакристаллов и отдельных мантийных ксенолитов, а также содержания в них редких элементов определены с применением рентгено-флуоресцентного метода, метода масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой и лазерной абляции. Использовались аттестованные методики с контролем качества анализов по международным стандартным образцам. Обработка результатов определения составов пород и минералов и графические построения выполнялись с использованием лицензионного программного обеспечения и специализированных петрологических и минералогических программ. Определение возраста пород Тэсийнгольского ареала выполнено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом. В работе использованы сведения по теме работы из российских и зарубежных литературных источников, а также материалы из геологических фондов.

Личный вклад. Автор участвовал в экспедиционных работах в Северной Монголии, изучал геологическое строение Тэсийнгольского вулканического ареала и систематизировал необходимую для исследований коллекцию проб вулканических пород, мегакристаллов и мантийных ксенолитов. Автор осуществлял подготовку препаратов для минералого-геохимических исследований, участвовал в определении составов парагенезисов минералов, выполнял кристаллохимические расчеты, проводил фотосъемку образцов пород и мегакристаллов. Осуществлял интерпретацию полученных минералогических и изотопно-геохимических данных, проводил расчеты РТ условий формирования щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов ареала, изучал процессы преобразования мегакристаллов под воздействием базальтовых магм. Лично и в соавторстве готовил и представлял на российских конференциях доклады и участвовал в подготовке публикаций по направлению работ для российских и зарубежных журналов. Все выводы и защищаемые положения диссертационной работы сформулированы лично автором.

Научная новизна. Проведены геохронологические и минералого-геохимические исследования Тэсийнгольского позднекайнозойского вулканического ареала, в том числе модельных вулканических центров Угуумур и Бодь-уул. Установлено, что вулкан Бодь-уул имеет раннемиоценовый (~17 млн. лет) а вулканический центр Угуумур среднемиоценовый возраст (~12.5 млн. лет). Показано, что в раннем миоцене проявлялись щелочные, а в среднем миоцене субщелочные базальтоидные магмы. Определен состав минеральных

ассоциаций пород, установлена роль карбонатного вещества в эволюции магматической системы. В породах ареала впервые обнаружены мегакристаллы граната, апатита и флогопита, получены редкоэлементные и изотопные характеристики пород и мегакристаллов. Определены РТ условия происхождения щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов ареала и изучены процессы преобразования мегакристаллов клинопироксенов под воздействием щелочно-базальтовых магм. Выдвинуто предположение о том, что в качестве одного из источников щелочно-базальтовых магм Тэсийнгольского ареала могло быть вещество древней субдуцированной океанической литосферы.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования данных изотопного датирования пород Тэсийнгольского ареала при корреляции геологических и геодинамических событий в кайнозой Центральной Азии. Петрологическое значение имеет определение РТ условий происхождения щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов, а также установление изотопных признаков участия в магмообразовании древнего рециклированного вещества. Прикладное значение может иметь факт обнаружения среди продуктов извержений в ареале полимиктовых брекчий, обогащенных мегакристаллами ильменита, которые являются потенциальным сырьем для получения рудного концентрата.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, общим объёмом 181 страница, включая 67 рисунков, 6 таблиц, 29 табличных приложений и список литературы из 178 наименований.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории геохимии гранитоидного магматизма и метаморфизма Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в 2021-2024 гг. Автор выражает свою признательность коллективу лаборатории, а также сотрудникам других научных и аналитических подразделений Института и коллегам из других научных учреждений за помощь и поддержку в выполнении исследований, а именно: Щербакову Ю.Д., Белозеровой О.Ю., Зарубиной О.В., Финкельштейну А.Л., Чубарову В.М., Амосовой А.А., Дрилю С.И., Каневой Е.В., Каримову А.А., Канакину С.В и Хромовой Е.А. (ГИН СО РАН), Асеевой А.В. (ДВГИ ДВО РАН), Иванову А.В. и Демонтеровой Е.И. (ИЗК СО РАН). В проведении экспедиционных работ, отборе представительных коллекций материалов по объектам исследования, а также в получении и обсуждении ряда результатов исследований активное участие принимали Цыпукова С.С., Митичкин П.М. и Пузанков М.Ю. Автор благодарен монгольским коллегам Д. Одгэрэл, О. Гэрэл, Д. Энхбату и Д. Бат-Ульзий за научное сотрудничество и помощь в организации экспедиционных исследований на территории Монголии. Особую благодарность автор выражает М.А. Митичкину за помощь в изготовлении высококачественных препаратов для минералогических исследований.

В заключение, автор выражает свою признательность и благодарность д.г.-м.н. Перепелову А.Б., под научным руководством которого была выполнено данное диссертационное исследование.

Результаты исследований закреплены в **4-х защищаемых положениях**, которые представлены в основном содержании работы.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований докладывались на российских и международных конференциях. По теме работы автором опубликовано 2 статьи WOS, в том числе одна в зарубежном журнале «Minerals», а также 8 тезисов докладов в материалах российских конференций. В публикациях в необходимой степени отражены все главные результаты исследований.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГХ СО РАН, проект № 0284-2021-0007.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, представлена практическая значимость и научная новизна исследования, приведены защищаемые положения.

Глава 1. Геологическое строение и возраст объектов исследований

Тэсийнгольский вулканический ареал расположен в Северной Монголии (рис. 1) и представляет собой комплекс разобщенных между собой лавовых плато и нескольких локализованных эруптивно-лавовых вулканических центров, в частности вулканы Угуумур и Бодь-уул, которые являются главными объектами исследований. В строении лавовых плато выделяются поля развития шлаков и брекчированных пород, которые отличаются высокой насыщенностью обломками мегакристаллов калиевых и темноцветных минералов и наличием в эруптивных отложениях ксенолитов перидотитов и пироксенитов. Общий размер ареала достигает до 35 км по долготе и до 65 км по широте.

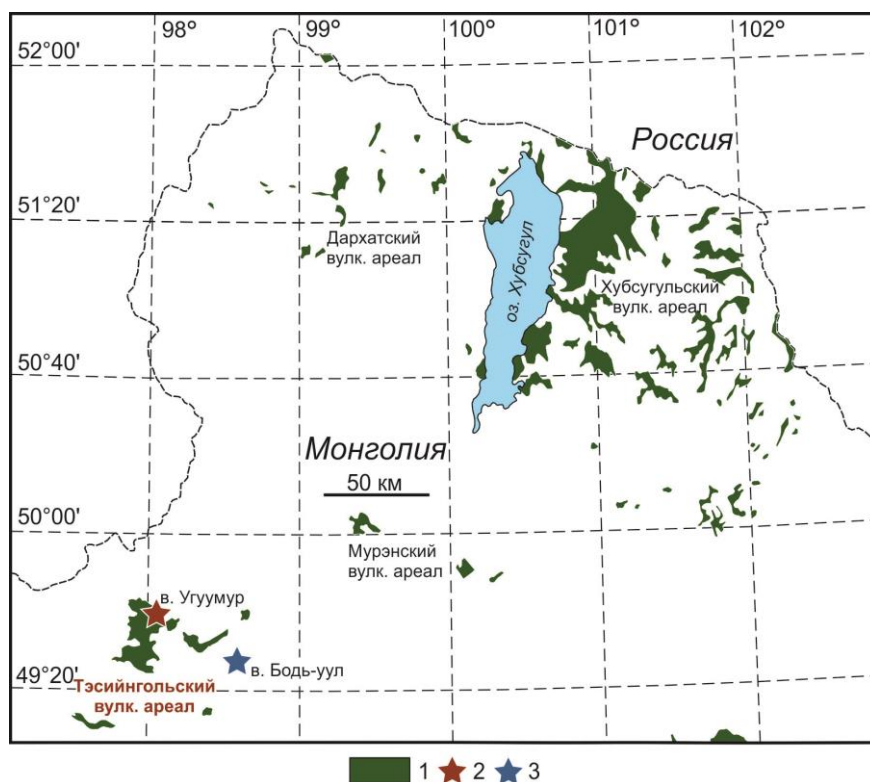


Рис. 1. Схема распространения позднекайнозойских вулканических ареалов Северной Монголии.

Названия ареалов приведены по [Savatenkov et al., 2010; Yarmolyuk et al., 2014] с дополнениями авторов. Условные обозначения: 1 – позднекайнозойские вулканические ареалы, 2 – вулкан Угуумур, 3 – вулкан Бодь-уул.

Фундаментом кайнозойских вулканических толщ ареала служат кембрийские метаморфизованные осадочные отложения, а также палеозойские гранитоидные интрузии, пермские вулканогенные комплексы и юрские терригенные толщи.

Вулкан Угуумур имеет до 1.5 км в диаметре с разрушенной и заполненной водой кратерной воронкой размером до 150 метров. Формирование вулкана связано с излияниями редких лавовых потоков трахиандезибазальтов и трахиандезитов. В лавах и эруптивных отложениях вулкана содержится значительное количество мегакристаллов, ксенолитов

перидотитов и пироксенитов, а также полимиктовых ильменит-содержащих магматических брекчий. Фундаментом вулкана служит нижнепалеозойская толща известняков, фосфоритов, кварцитов и метапесчанников.

Вулкан Бодь-уул находится вблизи озера Тунэмэн-нуур, существенно разрушен, и представлен в центральной части субвулканическими телами с развитием на периферии лавовых потоков. Постройка вулкана находится в окружении позднеплейстоцен-голоценовых озерных осадочных отложений и имеет вытянутую и изометричную форму с размерами ~ 2.7 x 1.4 км. В отличие от вулкана Угуумур породы вулканического центра Бодь-уул представлены базанитами и фонотефритами. В породах вулканов Угуумур и Бодь-уул отмечено значительное развитие карбонатного вещества.

Мегакристаллы вулкана Угуумур представлены санидинами (Sa) (~65-75 %), пироксенами (Cpx) (~ 10-15 %), ильменитами (Ilm) (3-4%), а также гранатами (Grt) (<1 %) [Perepelov et al., 2020; Цыпукова и др., 2021, Жгилев и др. 2025] (рис. 2).



Рис. 2. Мегакристаллы и ксенокристаллы минералов из пород Тэсийнгольского ареала.

Мегакристаллы: 1 – Grt, 2 – Sa, 3 – Cpx, 5 – Ilm, 6 – биотит (Bt). 4 – ксенокристалл Grt. Вне масштаба.

В отдельных мегакристаллах санидина отмечены субпараллельные трубчатые пустоты, а мегакристаллы пироксена и граната в значительной степени преобразованы. Мегакристаллы ильменита имеют следы термического воздействия. На некоторых участках лавового плато Тэсийнгольского ареала в породах обнаружены измененные мегакристаллы слюды размером до 2 см.

Ксенолиты перидотитов представлены среднезернистыми лерцолитами и дунитами. Среди ксенолитов установлены шпинелевые (Spl) и редкие по распространению Grt-Spl перидотиты и Grt-пироксениты.

Ранее изотопный возраст пород Тэсийнгольского ареала был определен в интервале средний–поздний миоцен (13.2-8.1 млн лет) [Ancuta et al., 2018]. Новые данные, полученные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом датирования, показали, что вулканический центр Угуумур сформировался во второй половине среднего миоцена (12.5 ± 0.2 млн лет). При этом вулканический центр Бодь-уул по времени образования оказался более древним и был сформирован во второй половине раннего миоцена (17.0 ± 0.5 млн лет). Таким образом показано, что вулканическая активность Тэсийнгольского ареала продолжалась в миоцене на протяжении не менее 8 млн лет.

Датирование $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом центральной и краевой зон крупного мегакристалла санидина показало его заметно более «древний» возраст (15.13 ± 0.17 и 15.15 ± 0.15 млн лет) в сравнении с вмещающими породами вулкана Угуумур [Цыпукова и др., 2021].

В результате проведенных геологических и геохронологических исследований Тэсийнгольского вулканического ареала сформулировано **1-е защищаемое положение**.

Вулканические центры Тэсийнгольского ареала Северной Монголии формировались в раннем миоцене (~17 млн лет) с проявлением щелочных базанитовых и фонотефритовых магм и затем в среднемиоценовое время (~12.5 млн лет) с преобладанием субщелочных трахиандезибазальтовых расплавов, высокой эксплозивной активностью и широким распространением в породах мантийных ксенолитов и мегакристаллов калиевых и темноцветных минералов. Возраст формирования мегакристаллов санидина составляет ~15 млн лет и находится во временном интервале активности магматической системы ареала.

Глава 2. Петрография и минералогия вулканических пород, мегакристаллов и ксеногенных включений

Трахиандезибазальты и трахиандезиты вулкана Угуумур обладают мелкопорфировыми структурами и близким минеральным составом. Главным минералом вкрапленником в них является оливин (Ol, Fo_{76-36}) с включениями Cr-шпинели (Spl). Субфенокристаллы в породах представлены Ol, плагиоклазами (Pl, $\text{An}_{51-3}\text{Ab}_{39-73}\text{Or}_{3-57}$) и Crx ($\text{Wo}_{42-47}\text{En}_{35-45}\text{Fs}_{13-20}$). На завершающем этапе кристаллизации расплавов формируется ассоциация микролитов $\text{Ol}+\text{Crx}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Ti-Mgt}+\text{Ilm}+\text{Ap}$.

Базаниты вулкана Бодь-уул отличаются порфировыми структурами. Оливин в них является единственным минералом вкрапленником (Fo_{84-70}) с включениями Al-Spl. Основная масса базанитов имеет тонкокристаллическую структуру с парагенезисом микролитов Crx ($\text{Wo}_{45-48}\text{En}_{39-43}\text{Fs}_{9-15}$), Ti-Mgt (TiO_2 13-19, MgO 2.3-3.3 мас. %), Ilm (TiO_2 51-54, MgO 3.4-7.8 мас. %), Ap (SrO 1.6-2.0, Cl 0.6-0.8, F 3.2-3.9 мас. %), Lc ($\text{Ks}_{74-78}\text{Qtz}_{22-23}$) и Ne ($\text{Ne}_{81-86}\text{Ks}_{9-12}\text{Qtz}_{4-10}$). Фонотефриты вулкана Бодь-уул в отличие от базанитов имеют более высокую степень раскристаллизации. Их сериально-порфировая структура определяется наличием вкрапленников оливина (Fo_{84-64}) с включениями Cr-Spl и субфенокристаллов Lc ($\text{Kls}_{76-78}\text{Qtz}_{22-24}$), Ne ($\text{Ne}_{79-81}\text{Kls}_{10-12}\text{Qtz}_{8-11}$) и Kfs ($\text{Or}_{53-63}\text{Ab}_{36-44}\text{An}_{2-3}$). Парагенезис микролитов в основной массе фонотефритов $\text{Ol}+\text{Spl}+\text{Crx}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Ti-Mgt}+\text{Ilm}+\text{Ap}+\text{Lc}+\text{Ne}$ сходен с базанитами.

Мегакристаллы полевых шпатов из лав и эруптивных отложений вулкана Угуумур представлены главным образом K-Na-санидинами ($\text{An}_{2.2-4.5}\text{Ab}_{34.4-51.4}\text{Or}_{45.3-61.8}$) и единичными K-санидинами с составами $\text{An}_{0.6-1.2}\text{Ab}_{17.3-18.1}\text{Or}_{81.0-81.8}$. Санидины содержат значимые концентрации Ba (0.21-0.50) и Sr (0.23-1.14 мас. %), которые увеличиваются до 2.5 мас. % в узких каймах вокруг трубчатых пустот (рис. 3). Согласно данным рентгеноструктурных исследований все изученные мегакристаллы полевых шпатов имеют моноклинную структуру. Мегакристаллы пироксенов принадлежат Ca-Na типу и близки по составам к омфацитам ($\text{Di}_{71-72}\text{Jd}_{16-19}\text{Ae}_{9-12}$). Концентрации Na_2O в них изменяются в пределах ~3.1-3.4 мас. %. Особенности состава мегакристаллов пироксена вулкана Угуумур, в сравнении с омфацитом, заключаются в более высоких концентрациях в минерале FeO и относительно низких – SiO_2 и MgO.

Мегакристаллы гранатов из лав и эруптивных отложений вулкана Угуумур отвечают по составам безхромистым альмандин-гроссуляр-пироповым гранатам ($\text{Alm}_{58-66}\text{Grs}_{17-20}\text{Prp}_{14-19}$). Они обладают признаками преобразования с формированием келифитовых и

симплектитовых текстур (рис. 3). Согласно классификации по [Grütter et al., 2004] мегакристаллы гранатов принадлежат эклогитовому парагенезису (рис. 4).

Гранаты из ксенолитов Grt-Sp-перидотитов имеют пироп-альмандин-гроссуляровый состав ($\text{Py}_{70-76} \text{Alm}_{10-17} \text{Grs}_{11-13}$) и отличаются повышенными содержаниями Cr_2O_3 (0.31-1.20 мас. %).

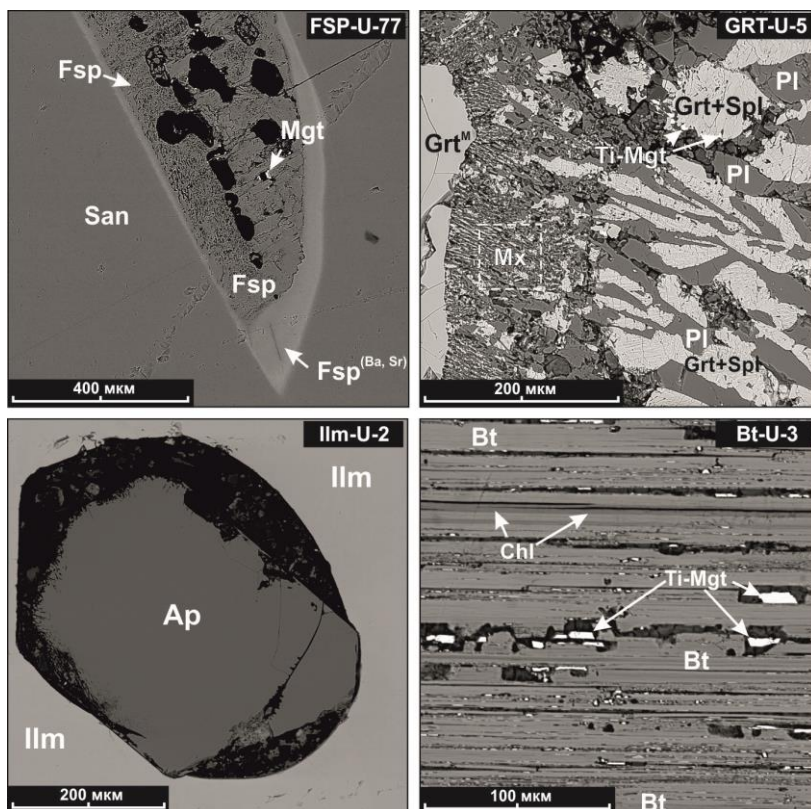


Рис. 3. Зоны преобразования и включения в мегакристаллах.

FSP-U-77 – трубчатые пустоты в санидине, GRT-U-5 – келифитовые и симплектитовые текстуры в гранате, Ilm-U-2 – включение Ap в ильмените, Bt-U-3 – хлориты и магнетиты в измененном биотите. Изображение в BSE.

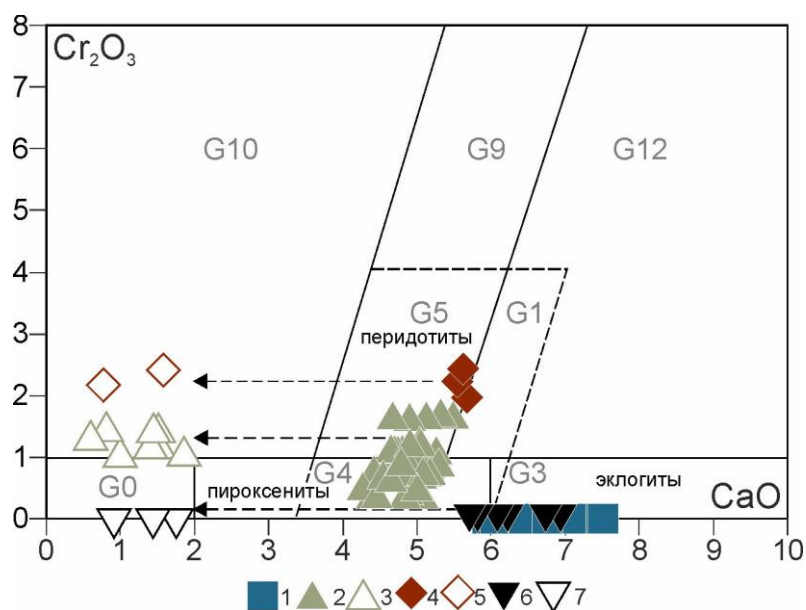


Рис. 4. Составы гранатов вулкана Угуумур на диаграмме [Grütter et al., 2004].

Точки составов гранатов: 1 – мегакристаллы Grt, 2-3 – пироповые Grt перидотитов (2) и их реакционных зон (3), 4-5 – ксенокристаллы пироповых Grt (4) и Grt их келифитовых текстур (5), 6-7 – Grt из Grt-пироксенитов (6) и их реакционных зон (7).

В ксенолитах Grt-пироксенитов гранаты имеют пироп-альмандин-гроссуляровые составы ($\text{Py}_{52-59}\text{Alm}_{22-32}\text{Grs}_{15-17}$) и, напротив, являются бесхромистыми. Редкие ксенокристаллы гранатов (рис. 2) имеют пироп-альмандин-гроссуляровые составы ($\text{Py}_{72-73}\text{Alm}_{12-13}\text{Grs}_{12-13}$).

Мегакристаллы ильменитов имеют достаточно сходные составы с небольшими вариациями содержаний $\text{TiO}_2=46-52$ и $\text{MgO}=0.9-3.0$ мас. % и соответствуют диапазону составов $\text{Ilm}_{89.3-96.4}\text{Gkl}_{3.2-10.2}\text{Prf}_{0.31-0.52}$. В качестве постоянной примеси в ильменитах присутствует V_2O_3 (0.26-0.54 мас. %). Для мегакристаллов Ilm характерно наличие структур распада с игольчатыми выделениями Ti-Mgt. В виде включений в ильменитах обнаружены стекла, близкие по составу к трахитам, и включения крупного до 500 мкм апатита с содержаниями $\text{F}=2-2.4$, $\text{Sr}=0.5-0.6$ и LREE до 0.5 мас. % (рис. 3).

Мегакристаллы слюды существенно изменены с формированием парагенезиса в составе $\text{Bt}+\text{Ti-Mgt}+\text{Chl}$ (рис. 3). Относительно свежие участки мегакристаллов слюды отвечают по составу Fe-биотитам ($\text{Phl}_{39.3-54.9}\text{Ann}_{45.1-60.7}$).

Ксенолиты перидотитов из лав и эруптивных отложений вулканического центра Угуумур обладают среднезернистыми структурами и по соотношению главных минералов $\text{Ol}+\text{Opx}+\text{Cpx}$ отвечают лерцолитам и дунитам. Составы Ol из лерцолитов изменяются в широком диапазоне Fo_{79-91} , а вблизи реакционных зон имеют повышенные содержания CaO (до 0.6 мас. %).

Пироксены из лерцолитов обычно представлены Cr-содержащими диопсидом (Cr_2O_3 до 1.2 мас. %) и энстатитом (Cr_2O_3 до 0.6 мас. %). В дезинтегрированных ксенолитах лерцолитов отмечено наличие тонкокристаллических прожилков ($\text{Ol}+\text{Opx}+\text{Cpx}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Mgt}+\text{Spl}$). Гранаты Grt-Spl перидотитов имеют пироп-альмандин-гроссуляровые составы ($\text{Prp}_{70-78}\text{Alm}_{12-20}\text{Grs}_{11-13}$) и в сравнении с мегакристаллами граната обнаруживают повышенные содержания Cr_2O_3 (0.3-1.8 мас. %) (рис. 4). Главным минералом среднезернистых ксенолитов Grt-содержащих пироксенитов является диопсид ($\text{Wo}_{47-49}\text{En}_{41-44}\text{Fs}_{8-9}$). Гранат в них имеет пироп-альмандин-гроссуляровый состав ($\text{Prp}_{52-55}\text{Alm}_{29-32}\text{Grs}_{15-17}$). В сростании с диопсидом и гранатом в них отмечен рутил и ильменит. В мелких тонкокристаллических прожилках и зонах в пироксенитах наблюдается парагенезис амфибола (Mg-гастингсит, паргасит), Pl ($\text{An}_{68-79}\text{Ab}_{21-29}\text{Or}_{0-2}$), Al-Spl и доломита (Dol).

Полимиктовые магматические брекчии насыщены обломками мегакристаллов Ilm (рис. 5) и содержат в «цементирующем» их магматическом матриксе (Mx) микролиты Ol, Cpx, Pl, Kfs и Mgt и субфенокристаллы Ol (Fo_{42-53}). Кроме мегакристаллов Ilm, в брекчиях обнаружены редкие мегакристаллы Ap (рис. 6), а также обломки лерцолитов (Lrz) (рис. 5). В мегакристаллах ильменитов из брекчий содержатся включения Ap, Mgt, Cal и пирита. Кальцит образует прожилки в кристаллах ильменита и выделения в матриксе брекчий.

Важная характеристика вулканических пород и ксенолитов Тэсийнгольского ареала повсеместное присутствие в них карбонатных фаз.

В основной массе трахиандезибазальтов вулкана Угуумур карбонатные фазы имеют кальцитовый (Cal) и доломитовый (Dol) состав и проявлены в основной массе пород в виде большого количества изометричных выделений, содержащих мелкие кристаллы Sr-содержащего (SrO до 0.8 мас. %) гидроксил- и фтор-apatита (рис. 6).

В оливинах из базанитов вулканического центра Бодь-уул включения представлены зональными силикатно-карбонатными кальцит-доломит-хлоритовыми ($\text{Cal}+\text{Dol}+\text{Chl}$) и карбонатными кальцит-доломитовыми фазами с участием Mg- и P-содержащего кальцита и Cu-содержащего доломита (CuO 0.9-1.3 мас. %) и Ap.

Карбонатные фазы установлены также в зонах преобразования перидотитовых и пироксенитовых ксенолитов, в полимиктовых магматических брекчиях и в виде возгонов на поверхностях пород.

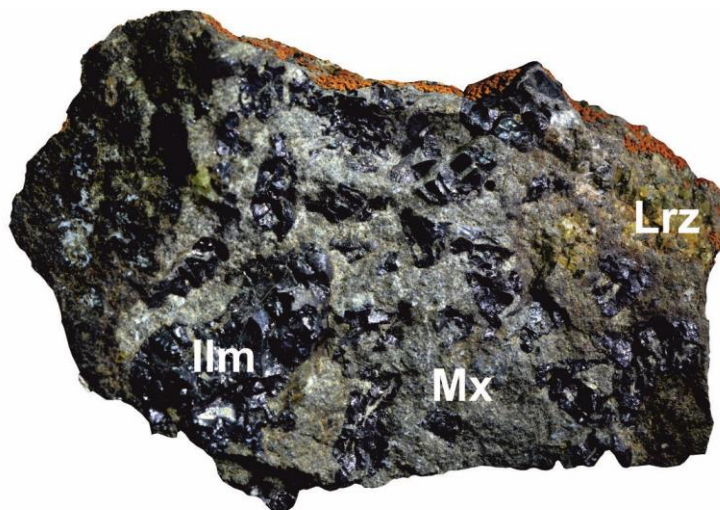


Рис. 5. Полимиктовая магматическая брекчия вулкана Угуумур.
Вне масштаба. Пояснения см. в тексте.

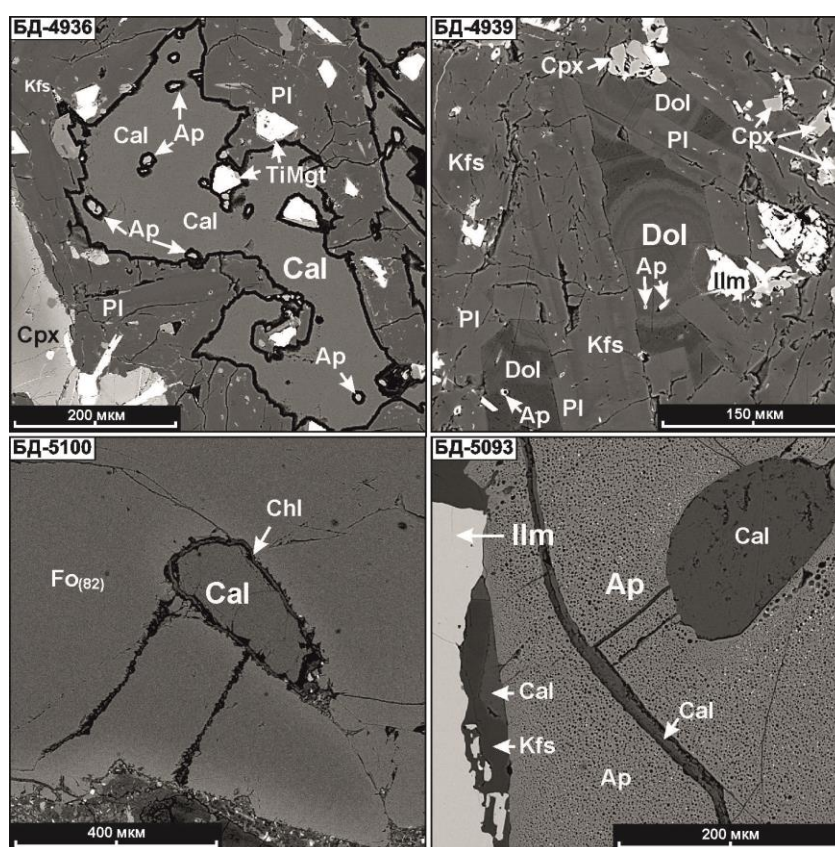


Рис. 6. Выделения и включения карбонатных фаз в породах и минералах.

БД-4936, БД-4939 – трахиандезибазальты вулкана Угуумур, БД-5100 – оливин в базаните вулкана Бодь-уул, БД-5093 – мегакристалл апатита в полимиктовой брекчии. Изображение в BSE.

Глава 3. Геохимия вулканических пород и мегакристаллов

Вулканические породы Тэсийнгольского ареала представлены в основном трахиандезибазальтами и в меньшей степени базанитами, фонотефритами и трахиандезитами (рис. 7). Трахиандезибазальты вулкана Угуумур имеют в основном Ну-нормативный минеральный состав ($Ne_N \leq 0.8$, $Hu_N = 0.4-16$), а базаниты и фонотефриты вулкана Бодь-уул отличаются исключительно Ne-нормативным составом ($Ne_N = 11-22$).

Щелочные породы вулкана Бодь-уул отличаются кремний недосыщенными и более магниальными составами (Mg# 55.4-63.6), повышенными содержаниями CaO, P₂O₅ и пониженными концентрациями Al₂O₃ по отношению к субщелочным породам вулкана Угуумур (Mg# 44.8-50.1). В целом отмечается, что с возрастанием кремнекислотности пород исследованных вулканических центров от базанитов и фонотефритов вулкана Бодь-уул к трахиандезибазальтам и трахиандезитам вулкана Угуумур в них снижаются уровни концентраций многих LILE (Th, U, REE, Sr, Y, W, Cr, V), HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf), сидерофильных (Co, Ni, Mo) и халькофильных элементов (Cu, Zn) (рис. 8).

В том же направлении для пород несколько уменьшаются значения таких индикаторных редкоэлементных отношений, как Sr/Y (от 49-52 до 42-46) и La/Yb (от 34-40 до 21-28) и возрастают величины отношений Ba/Nb (от 8-10 до 12-18) и Ga/Sc (от 1.6-1.7 до 1.6-2.2).

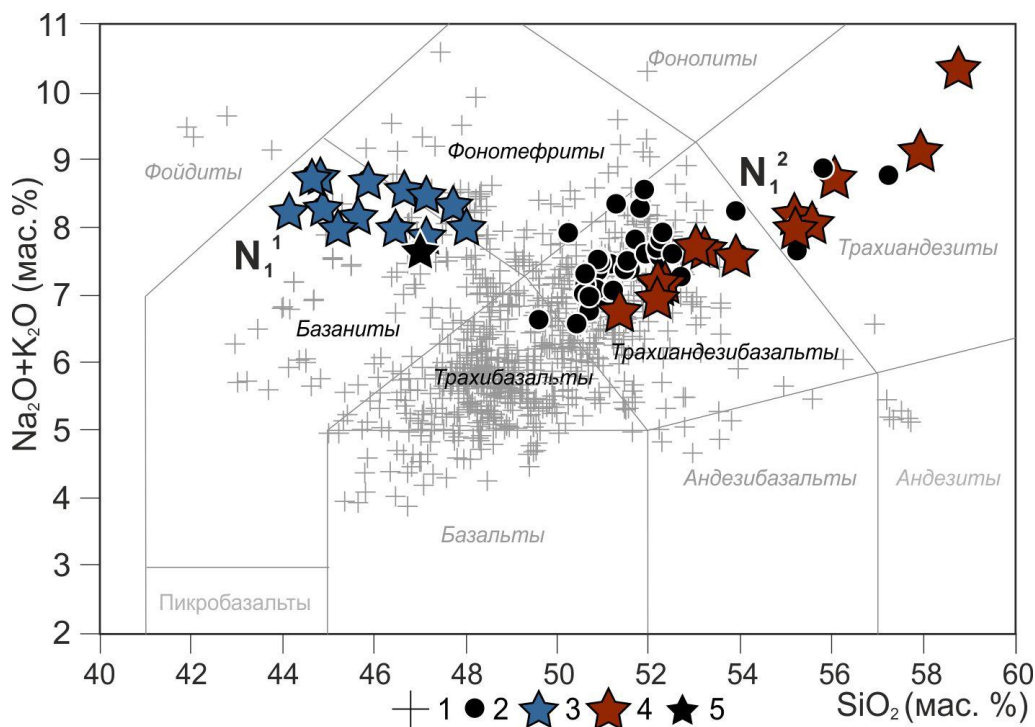


Рис. 7. Составы пород кайнозойских вулканических ареалов Монголии на диаграммах TAS - SiO₂-(Na₂O+K₂O) по [LeBas et al., 1986].

Точки составов пород: 1 – позднекайнозойских вулканических ареалов Монголии (n=669), 2 – Тэсийнгольского ареала Северной Монголии (n=81), 3 – раннемиоценового (N₁¹) вулкана Бодь-уул (n=13), 4 – среднемиоценового (N₁²) вулкана Угуумур (n=12), 5 – основание лавового плато Тэсийнгольского ареала (N₁¹). n – количество анализов. Составы пород Тэсийнгольского ареала приведены по [Ancuta et al., 2017; Perepelov et al., 2020] и оригинальным данным автора.

В сравнении со средним составом пород OIB типа составы трахиандезибазальтов и трахиандезитов вулкана Угуумур отличаются высокими концентрациями в них Rb, Ba, K, Sr, P и сравнительно низкими содержаниями Y и HREE (рис. 8). Еще более высокие концентрации LILE и HFSE элементов характерны для базанитов и фонотефритов вулкана Бодь-уул. В целом, составы пород Тэсийнгольского ареала соответствуют мантийной последовательности распределения редких элементов и являются типично внутриплитными образованиями. Яркой особенностью составов пород Тэсийнгольского ареала является их относительное обеднение U и Th (рис. 8).

Мегакристаллы санидинов, гранатов и пироксенов исследованы с применением EDS, XRF, ICP-MS и LA-ICP-MS методов анализа.

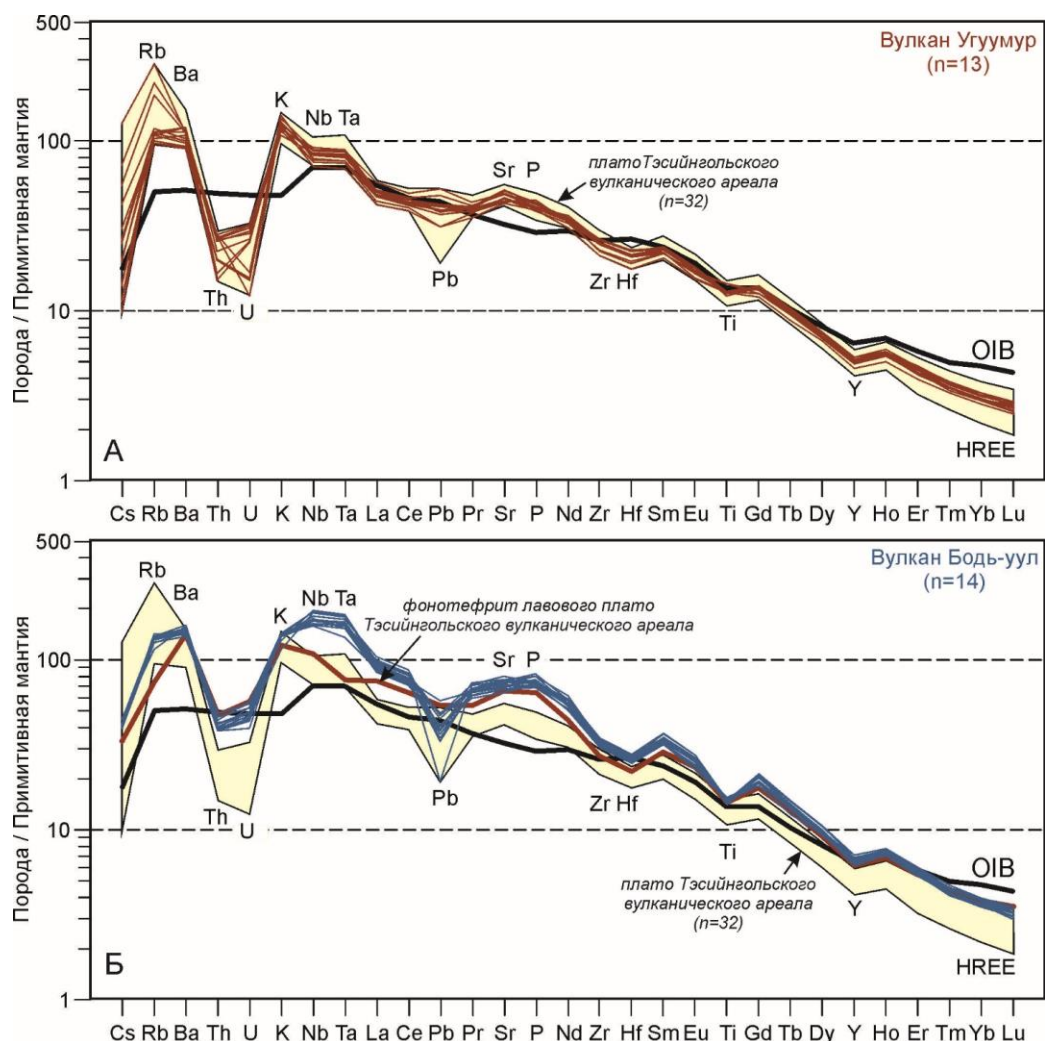


Рис. 8. Распределение нормированных концентраций магматофильных элементов для пород Тэсийнгольского вулканического ареала.

Составы пород (ppm) нормированы на содержания в примитивной мантии [McDonough, Sun, 1995].

Показано, что для санидинов характерны относительно высокие концентрации Ba, Sr, Rb, Ga, Pb и Eu ($Eu/Eu^*=9-19$) на фоне низких содержаний Th, U, REE, Y и слабой степени фракционирования РЗЭ ($La/Yb \sim 2-4$) (рис. 9).

Установлено, что все мегакристаллы Срх обладают близким между собой характером распределения редких элементов. При этом они отличаются по составу от пироксенов из эклогитов и перидотитов более высокими концентрациями LREE и обладают характером распределения REE, свойственным пироксенам из пород с Grt-содержащими минеральными парагенезисами (рис. 9).

Мегакристаллы Grt в отличие от гранатов из эклогитов и перидотитов имеют более высокие содержания LREE (Ce, Pr, Nd, Sm, Eu), HFSE (Zr, Hf), обогащены Ge, Y и HREE с исключительно низкими содержаниями Cr (<1 ppm). Для мегакристаллов гранатов характерны более высокие величины Gd/Yb отношений ($\sim 2.4-3.0$) в сравнении с гранатами из эклогитов ($\sim 0.5-0.9$) и гранатовых перидотитов ($\sim 0.2-0.6$).

Мегакристаллы Plm по данным ICP-MS анализа обогащены Nb, Ta и в меньшей степени Zr и Hf, имеют относительно высокие содержания V, Co, Cu и Zn. Для мегакристаллов апатитов из полимиктовых магматических брекчий свойственны высокие содержания F (3.1-5.1 мас. %) и Sr (до 0.8 мас. %). Распределение REE в ильменитах выражается в более высоких величинах La/Yb ($\sim 7-12$) в сравнении с другими минералами ассоциации мегакристаллов ($\sim 0.1-4.4$).

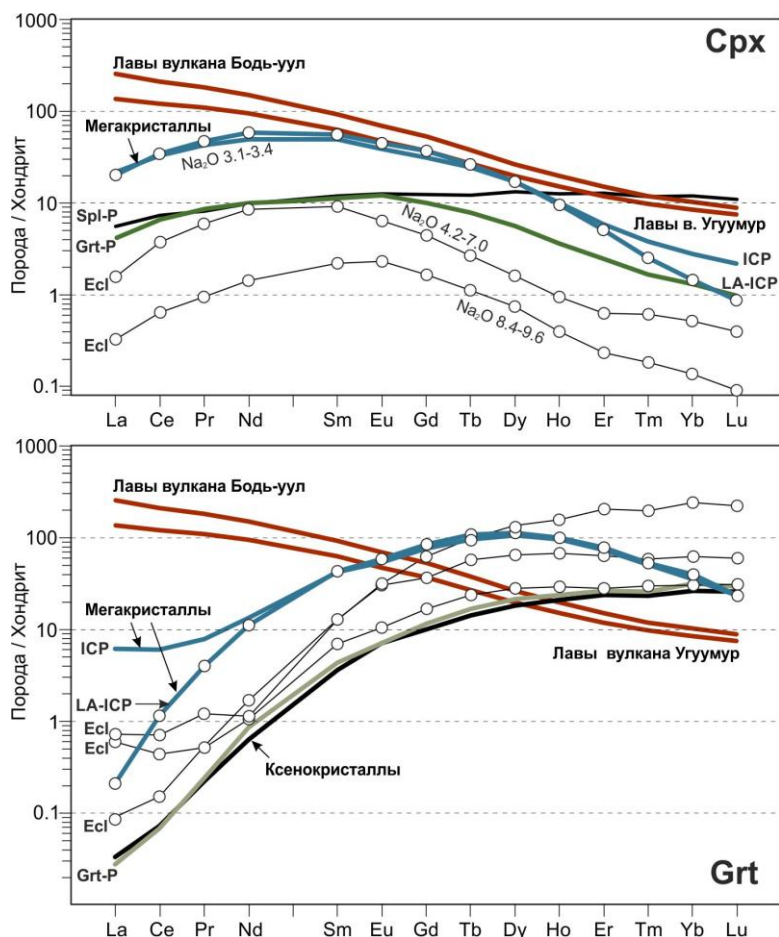


Рис. 9. Распределение РЗЭ в пироксенах и гранатах.

Диаграмма Срх: Ecl – омфациты из эклогитов, Sp-P – Срх из ксенолитов Spl-перидотитов, Grt-P – Срх из Grt- перидотитов. Диаграмма Grt: Ecl – Grt из эклогитов, Grt-P – Grt из Grt-перидотитов. Мегакристаллы Тэсийнгольского ареала: составы по данным ICP-MS и LA-ICP-MS методов анализа. Содержания РЗЭ (ppm) нормированы на хондрит по [Sun, McDonough, 1989].

Глава 4. Р-Т условия образования щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов

Расчет величин давления и температуры образования магм вулканов Угуумур и Бодь-уул выполнен для безводных условий по формулам 16, 42 из работы. [Putirka, 2008]. Установлено, что базанитовые и фонотефритовые магмы вулкана Бодь-уул на раннем этапе вулканической активности Тэсийнгольского ареала формировались в области астеносферной мантии при давлениях $25-28 \pm 2.9$ и $21-24 \pm 2.9$ кбар и температурах $1398-1432 \pm 19$ °C и $1359-1391 \pm 19$ °C соответственно (рис. 10).

Исходные магмы для пород фонотефритового состава, обнаруженных в основании лавового плато ареала, в сравнении с трахиандезибазальтовыми расплавами, формировались при более высоких давлениях (22 ± 2.9 кбар) и температурах (1376 ± 19 °C).

Более сложной задачей оказалось определение Р-Т условий происхождения трахиандезибазальтовых расплавов вулкана Угуумур на заключительном и более масштабном этапе магматической активности. Это связано с предполагаемым изменением их составов в результате контаминации расплавов ксеногенным веществом.

Установлено, что трахиандезибазальтовые магмы могли формироваться вблизи границы коры и верхней мантии при $P=10-16 \pm 2.9$ кбар и $T=1192-1237 \pm 19$ °C (рис. 10). Предполагается, что насыщенность магм карбонатным флюидом, декомпрессия и высокая скорость подъема магм на заключительном этапе привела к развитию взрывного процесса.

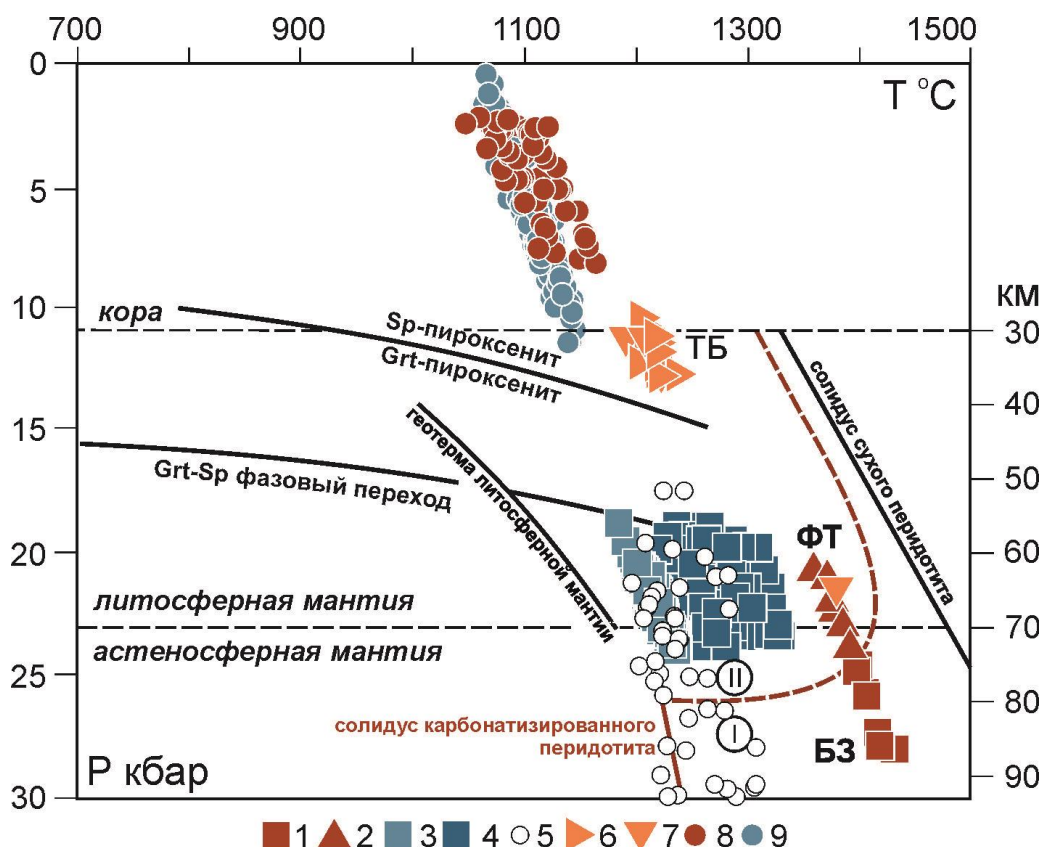


Рис. 10. P-T условия формирования щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов Тэсийнгольского вулканического ареала.

P-T условия формирования магм и кристаллизации минералов: 1– базанитов (БЗ) и 2 – фонотефритов (ФТ) вулкана Бодь-уул; 3 – мегакристаллов Срх [Putirka, 2008; 4 – мегакристаллов Срх+Grt [Putirka, 2008; Abbot, 2018]; 5 – мегакристаллов Срх+Grt [Sun, Liang, 2014; Abbot, 2018]; 6, 7 –трахиандезибазальтов (ТБ) вулкана Угуумур (6) и плато (7); 8 – Срх из пород вулкана Угуумур; 9 – пироксены из зон преобразования мегакристаллов Срх. Пунктир - граница, разделяющая область мантии, содержащей карбонатитовый расплавный компонент (I), и область мантии, в которой карбонатитовый компонент переходит в газообразную фазу (II) [Gudfinnsson, Presnall, 2005].

Согласно расчетам по формулам 32b и 32d из работы [Putirka, 2008], пироксены из лав формировались $P=2.3-8.2 \pm 2.6$ кбар и $T=1048-1165 \pm 58$ °C (рис. 10). Кристаллохимические особенности субфенокристаллов и микролитов пироксенов из лав Тэсийнгольского ареала также указывают на их происхождение в мало глубинных условиях. (рис. 11).

С использованием геотермобарометров, предназначенных для вулканических систем [Putirka, 2008] (формулы 32b и 32d) установлено, что мегакристаллы пироксена могли быть сформированы в безводных условиях при $T=1214-1243 \pm 58$ °C и в водосодержащих условиях ($H_2O=2.5$ мас. %) при $T=1202-1231 \pm 87$ °C и $P=18-24 \pm 2.6$ кбар (рис. 10).

В соответствии с установленными величинами давлений кристаллизации Срх, полученными по [Putirka, 2008] (формула 32b), температуры образования ассоциации Срх+Grt были определены по распределению в них REE [Abbot, 2018] и составили $1212-1331 \pm 75$ °C (рис. 10). По геобарометру [Sun, Liang, 2014] кристаллизация мегакристаллов Срх+Grt могла происходить в более широком диапазоне давлений $17-37 \pm 4$ кбар. Такие величины давлений соответствуют температурам формирования мегакристаллов Grt+Срх в диапазоне $T=1197-1309 \pm 75$ °C [Abbot, 2018] (рис. 10).

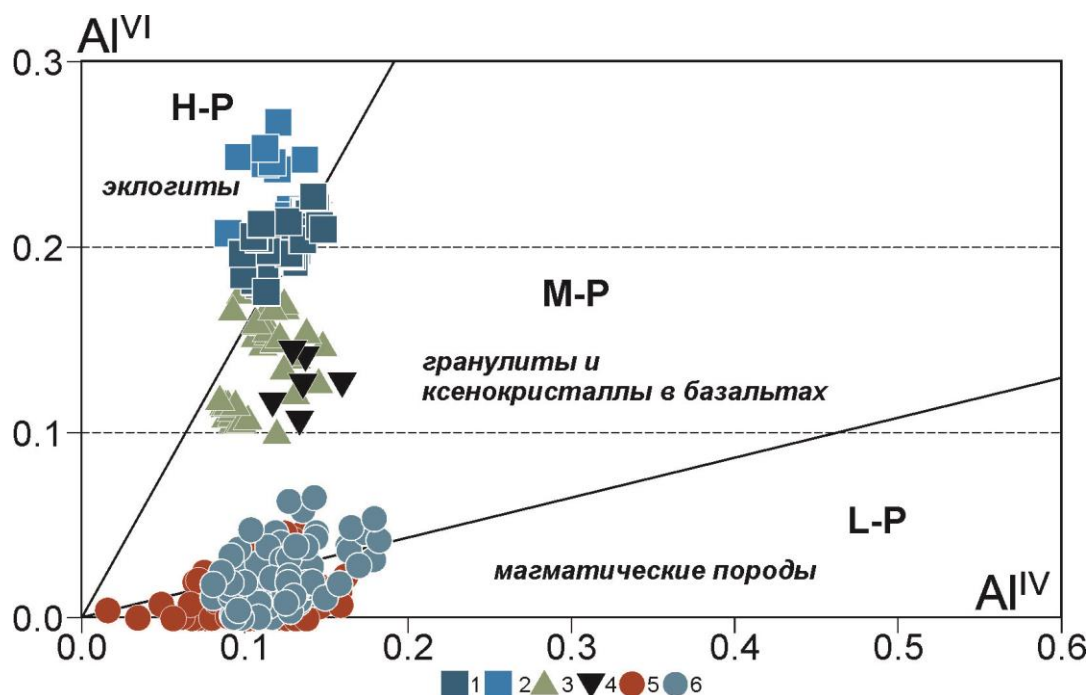


Рис. 11. Диаграмма Al^{IV} - Al^{VI} для составов пироксенов.

Диаграмма приведена по [Aoki, Shiba, 1973; He et al., 2013]. Величины Al^{IV} - Al^{VI} даны в формульных коэффициентах. H-P, M-P, L-P – области составов пироксенов из пород образованных в условиях высоких, умеренных и низких давлений, соответственно. В скобках – количество анализов пироксенов. Точки составов: 1 – мегакристаллы пироксенов по данным EDS, 2 – мегакристаллы пироксенов по данным XRF (валовый состав), 3 – пироксены из Spl и Grt перидотитов, 4 – пироксены из Grt-содержащих пироксенитов, 5 – пироксены из базальтоидов вулканов Угуумур и Бодь-уул, 6 – пироксены из зон преобразования мегакристаллов Срх.

Кристаллохимические особенности мегакристаллов Срх (рис. 11), высокие содержания в них Na_2O , Al_2O_3 , а также значительные содержания в мегакристаллах гранатов CaO и предельно низкие Cr_2O_3 (рис. 4) подтверждают, что они кристаллизовались в условиях высоких давлений и указывают на близость их составов к минералам эклогитового парагенезиса.

В результате проведения термобарогеохимических расчетов условий происхождения щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов Тэсийнгольского вулканического ареала сформулировано **2-е защищаемое положение:**

В истории эволюции магматической системы Тэсийнгольского вулканического ареала происходило уменьшение глубин магнообразования с формированием вначале щелочных магм вблизи границы астеносферной и литосферной мантии в интервале давлений ~21-28 кбар и температур ~1360-1430 °C и затем субщелочных расплавов в верхах литосферной мантии при давлениях 10-16 кбар и температурах ~1190-1240 °C. Мегакристаллы гранатов и пироксенов были образованы в гранатовой фации глубинности литосферной мантии при давлениях ~18-24 кбар и температурах ~1190-1330 °C.

Глава 5. Условия и процессы преобразования мегакристаллов в магматической системе

При эксгумации или транспортировке магматическими расплавами высокobarических пород и минералов происходит их преобразование. Эти процессы

реализуются в широком диапазоне давлений и температур. Наиболее часто такие процессы изучаются на примере эксгумированных перидотитовых, пироксенитовых и эклогитовых комплексов пород [Obata, 2011; Godard, Martin, 2000; Liu et al., 2023; Zertani et al., 2024]. При этом значительно реже рассматриваются процессы преобразования высокобарических пород и минералов при их транспортировке магматическими расплавами [Vysotskiy et al., 2007; Aseeva et al., 2014, 2022; Специус и др., 2020; Gornova et al., 2023].

Пироксены. Нами проведены, возможно, первые исследования процессов преобразования мегакристаллов пироксенов в вулканических породах внутриконтинентальных областей. Зоны преобразования мегакристаллов Cpx^M Тэсийнгольского ареала выполнены материалом буровато-серого и буровато-желтого цветов и соотносятся с участками плавления и преобразования в мегакристаллах (рис. 2). Они имеют различные формы (тонкие прожилки, линзы и изометричные выделения), и отмечаются как на поверхности фрагментов кристаллов, так и в виде изолированных «скрытых» участков. Размеры участков плавления мегакристаллов варьируют по ширине от первых десятков микрон до нескольких миллиметров (рис. 12).

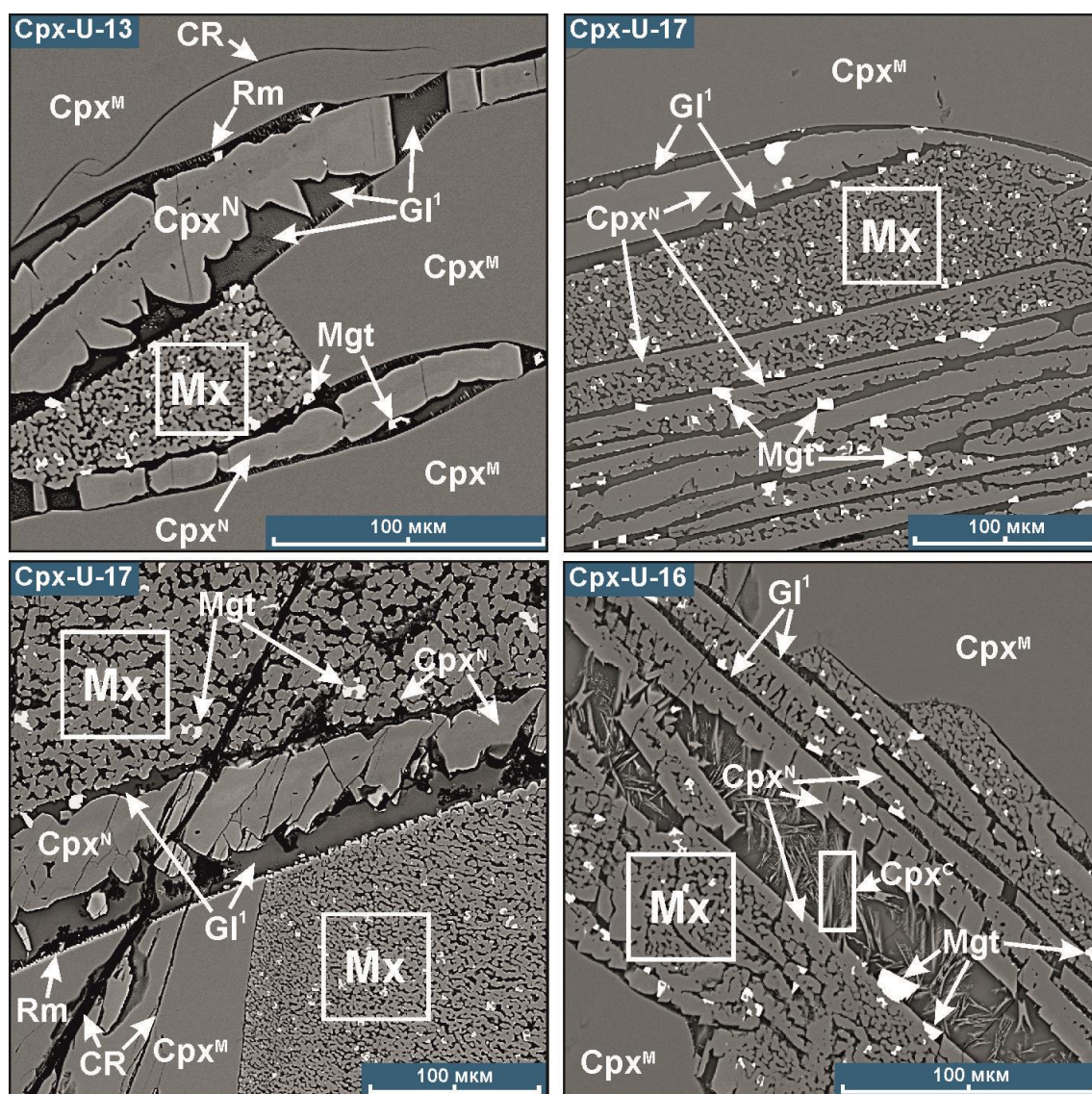


Рис. 12. Текстуры зон преобразования в мегакристаллах пироксенов.

Обозначения: Cpx^M – зоны мегакристаллов пироксена не подвергнутые плавлению, Мх – участки с губчатой текстурой. Другие участки – с ленточной текстурой. Новообразованные кристаллические фазы: Cpx^N – Са-пироксен, Mgt – магнетит. Gl^1 – линзы и прожилки стекла. Cpx^C – кристаллиты в стекле. Rm – реакционные каймы. CR – трещины контракции. Изображения в BSE.

Зоны плавления и преобразования в мегакристаллах (Crx^M) имеют между собой достаточно резкие границы с исключительно тонкими «реакционными» каймами (Rm). Такие зоны различаются по структурам и внутреннему строению (рис. 12). Одни из них представляют собой ленточные сростки (ribbon textures) или «пакеты» кристаллов новообразованного пироксена (Crx^N), окруженные выделениями стекла (Gl). Другие имеют губчатые текстуры (spongy textures) (Mx), представленные агрегатом мельчайших выделений стекла (Gl), пироксенов (Crx^N) и магнетитов (Mgt). Участки с различной текстурой и строением нередко совмещены в пределах отдельных прожилков и выделений или чередуются в них (рис. 12).

Новообразованные Crx из зон плавления и раскристаллизации в мегакристаллах отличаются умеренными содержаниями Na_2O (0.47–1.19 мас. %) и представлены авгитами с переходом к ферро-авгитовым составам ($\text{Wo}_{40-46}\text{En}_{25-32}\text{Fs}_{22-34}$). Они отличаются от пироксенов из базальтоидных лав существенно более высокой железистостью.

Игольчатые кристаллиты из стекол ленточных текстур относятся к Ca-Na типу ($\text{Di}_{72}\text{Jd}_{28}\text{Ae}_0$) и выделяются среди других новообразованных пироксенов своей более высокой железистостью и высокими содержаниями Al_2O_3 и Na_2O . Магнетиты зон раскристаллизации, в сравнении с Mgt из вулканических пород Тэсийнгольского ареала, характеризуются умеренной титанистостью (TiO_2 9.2–14.2, против 17–30 мас. %).

Стекла участков плавления, рассматриваемые как остаточный расплав в зонах раскристаллизации, имеют в сравнении с исходными мегакристаллами более высоконатровые составы с концентрациями Na_2O в диапазоне от 3.8 до 7.6 мас. %. Они отличаются также повышенными содержаниями SiO_2 и Al_2O_3 (до ~57 и ~19 мас. % соответственно).

В отличие от мегакристаллов, P - T параметры кристаллизации Crx из зон преобразования «пироксенового» расплава в мегакристаллах, указывают на их происхождение в малоглубинных условиях. Согласно расчетам P - T условий образования для вулканических систем по формулам 32b и 32d из работы [Putirka, 2008] новообразованные Crx из мегакристаллов формировались при $P=0.5$ -11 кбар и $T=1065$ -1147 °C (рис. 10).

Преобразование мегакристаллов Crx происходило в результате инконгруэнтного плавления при их транспортировке щелочно-базальтовыми магмами и быстром снижении давления. Градиенты давления и температуры завершения процесса кристаллизации мегакристаллов и начала кристаллизации новообразованных пироксенов в зонах плавления составляют ~10 кбар и ~50 °C (рис. 10).

Санидины. Вопрос о происхождении в мегакристаллах санидина пустотелых субпараллельных трубчатых пустот (рис. 13) тесно связан с процессами эволюции магматической системы Тэсийнгольского ареала. В настоящее время для решения вопроса о происхождении таких трубчатых пустот может быть использована модель, предложенная в работе [Gutmann, 1974].

Согласно предложенной модели, пустотелые трубки в кристаллах полевых шпатов могли образоваться в результате зарождения на поверхностях растущих кристаллов капель жидкости. Быстрая кристаллизация полевого шпата сопровождалась миграцией капель с появлением удлиненных каналов. С другой стороны, образование сходных текстур отмечалась и в экспериментальной работе [Леммлейн, 1973]. Автор указывал, что подобные газовой-жидкие включения удлиненной формы могли быть образованы в результате залечивания трещин в кристалле. В нашем исследовании предполагается, что механизм формирования мегакристаллов, в том числе и санидина, и трубчатых пустот связан с реализацией пневматолитового процесса и с участием в быстрой кристаллизации водно-карбонатного флюида или силикатно-карбонатного расплава.

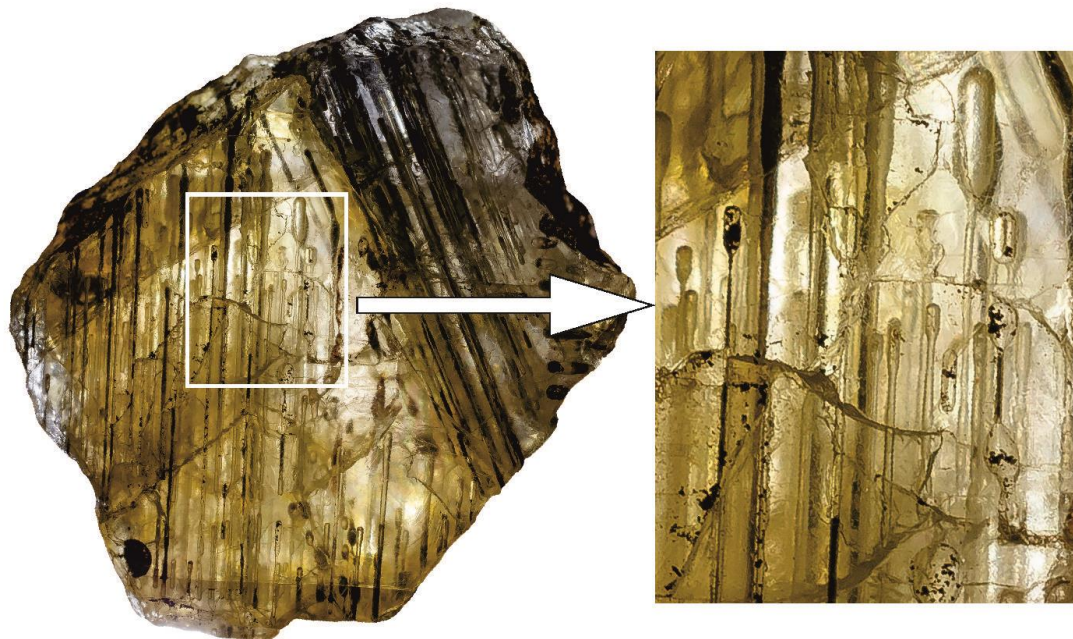


Рис. 13. Мегакристалл санидина с трубчатыми пустотами.
Вне масштаба.

В результате минералогических исследований и расчета РТ условий кристаллизации Са-На пироксенов из зон преобразования мегакристаллов пироксенов Тэсийнгольского вулканического ареала сформулировано **3-е защищаемое положение:**

При транспортировке мегакристаллов темноцветных минералов щелочно-базальтовыми магмами происходит преобразование гранатов, а также инконгруэнтное плавление пироксенов. В отличие от келифитовых и симплектитовых текстур в гранатах, в мегакристаллах Са-На пироксенов при давлениях ~0.5-11 кбар и температурах ~1150-1065 °С образуются ленточные и губчатые текстуры, представленные ассоциацией новообразованных Сrx авгитового и ферроавгитового составов, магнетита и высоко-На стекла.

Глава 6. Источники вещества и модель эволюции магматической системы Тэсийнгольского вулканического ареала

Изотопные источники. Изотопные составы позднекайнозойских вулканических пород Монголии в координатах $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и ϵNd характеризуется очень узкими вариациями величин отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (~0.704-0.705) и большими вариациями значений ϵNd (~ от +3 до -11) (рис. 14). Этому полю значений соответствует изотопный состав пород вулканических центров Угуумур и Бодь-уул. Трахиандезибазальты и трахиандезиты вулкана Угуумур имеют величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, отвечающие области самых низких значений $\epsilon\text{Nd}(\text{i})$ (~ от -7.8 и до -9.9) с незначительными вариациями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{i})$ (~0.7045-0.7049) (рис. 14).

Недосыщенные кремнеземом и фельдшпатоид-содержащие породы вулкана Бодь-уул (базаниты и фонотефриты) в сравнении с породами вулкана Угуумур имеют немногим менее радиогенные изотопные метки $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{i})$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\text{i})$ (~0.7044-0.7047, $\epsilon\text{Nd}(\text{i})$ ~ от -4.8 и до -7.6). Заметно менее радиогенные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, характерные для пород изученных вулканических центров и других вулканических ареалов Северной и Центральной Монголии, не позволяют предполагать сколь-либо значимого участия в их образовании источника ЕМII типа.

Изотопные составы $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ образуют два отчетливо различающихся тренда (рис. 14). Один из них отвечает совокупности точек изотопных составов пород вулканических ареалов Центральной Монголии, другой – Северной Монголии.

Начало тренда изотопных меток $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ позднекайнозойских вулканических пород Центральной и Северной Монголии располагается между значениями резервуаров PREMA и EMI (рис. 14).

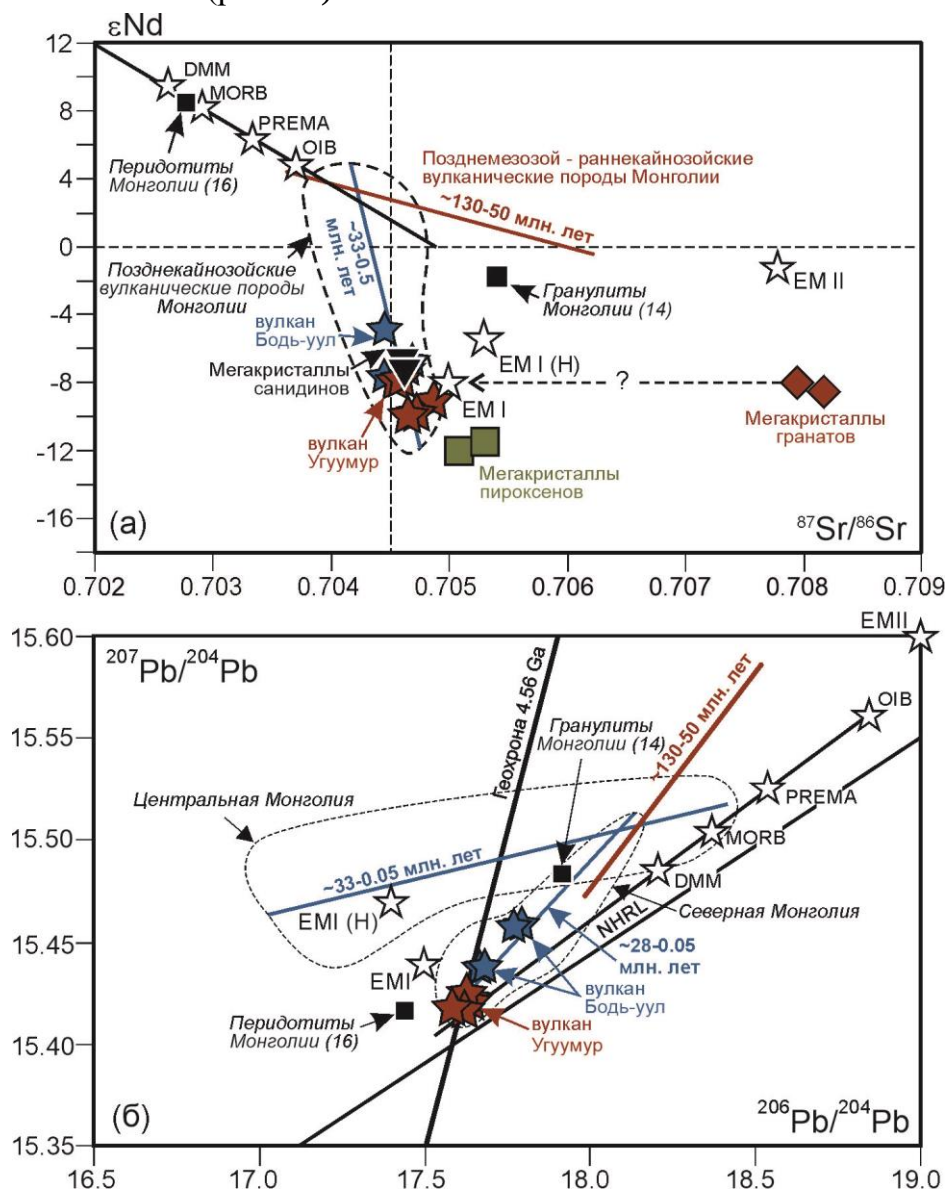


Рис. 14. Изотопный состав пород и мегакристаллов вулканических центров Угуумур и Бодь-уул.

(а) Изотопный состав $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. (б) Изотопный состав $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Тренды, поля изотопных состав позднемезозой-кайнозойских базальтоидов Монголии и изотопные метки DMM, MORB, OIB, PREMA, EMI и EMII см. в работе [Pererelov et al., 2020]. Изотопная метка для EM I (H) приведена по [Hart et al., 1992]. Метки средних изотопных составов мантийных и коровых ксенолитов приведены для перидотитов по [Carlson, Ionov, 2019], для гранулитов по [Barry et al., 2003; Ancuta, 2017].

При этом изотопный состав свинца в породах вулканов Угуумур и Бодь-уул ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) в полной мере соответствует тренду распределения изотопных меток, характерных для позднекайнозойских вулканических пород Северной Монголии, и отвечает области наименее радиогенных значений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Следует

отметить, что при возрастании кремнекислотности пород изученных вулканов от базанитов к трахиандезитам происходит уменьшение величин $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Примечательной особенностью изотопных составов мегакристаллов санидинов, пироксенов и гранатов является их близость по величинам значений $\epsilon\text{Nd(i)}$ ($\sim$ от -7 до -12) к изотопному составу пород вулкана Угуумур ($\sim$ от -8 до -10).

Тренд эволюции изотопных составов пород вулканов Угуумур и Бодь-уул указывает на то, что щелочно-базальтовые магмы и мегакристаллы Тэсийнгольского ареала могли быть сформированы при участии двух главных источников вещества. Одним из них и определяющим был древний низкорadioгенный источник, близкий по составу к ЕМ1, а другой отвечал изотопным характеристикам мантии PREMA. Сделанные выводы соответствуют представлениям о природе источников позднекайнозойских базальтоидных магм Центральной Монголии [Savatenkov et al., 2010].

Микроэлементное моделирование. Редкоэлементные характеристики пород вулканических центров Угуумур и Бодь-уул, а также характерные для них значения индикаторных редкоэлементных отношений ($\text{La/Yb}=21-28$ и $34-41$, $\text{Sm/Yb}=6.1-7.3$ и $7.8-9.0$, $\text{Sr/Y}=40-46$ и $48-54$, соответственно) свидетельствуют о присутствии в источнике магм значительного объема реститовой гранатовой фазы. По результатам проведенного микроэлементного моделирования предполагается, что магмы изученных вулканов могли быть сформированы при частичном плавлении Grt-содержащих пироксенитов. Степень плавления таких пород при образовании трахиандезибазальтовых магм вулкана Угуумур можно определить достаточно условно в диапазоне $\sim 10-12\%$. Образование базанитовых и фонотефритовых магм вулкана Бодь-уул происходило при сравнительно меньших степенях плавления $\sim 7-9\%$.

Карбонаты. Значительная роль карбонатного вещества в эволюции расплавов вулканических центров Угуумур и Бодь-уул и признаки его участия в процессах метасоматического преобразования субконтинентальной литосферной мантии (SCLM) Северной Монголии подтверждается наличием в породах карбонатных минеральных фаз. Присутствие включений карбонатов в субликвидусных минералах и мантийных ксенолитах может свидетельствовать о высокой роли углеродсодержащего флюида в обогащенном источнике вещества и в последующих процессах метасоматоза литосферной мантии. Включения доломит-кальцит-силикатного вещества в оливинах Fo_{82-76} из базанитов вулкана Бодь-уул подтверждают наличие в астеносферной мантии силикатно-карбонатных расплавов в условиях их жидкостной несмешиваемости с щелочно-базальтовыми магмами. Образование таких расплавов могло происходить при плавлении карбонатизированных мантийных Grt-содержащих пироксенитовых жил. Источником силикатно-карбонатного вещества могла быть, вероятно, древняя океаническая литосфера, высокобарически преобразованная в переходной зоне мантии.

Модель формирования щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов. Смена вещественных типов магм в истории развития Тэсийнгольского ареала, наличие в расплавах карбонатного вещества и геохимические признаки участия в магмообразовании гранат-содержащего субстрата приводят к выводу об участии в образовании щелочно-базальтовых магм различных по природе расплавов. Предлагаемая нами модель происхождения мегакристаллов Тэсийнгольского вулканического ареала, содержит элементы смешения расплавов, как было предложено, к примеру [Zeng et al., 2017; Yu et al., 2018]. Один из расплавов может отвечать по составу «пироксенитовому», а второй «силикатно-карбонатному» типу. Предполагается, что причиной возникновения таких расплавов могли быть процессы высокобарического преобразования пород океанической коры, субдуцированной в ходе закрытия Палеоазиатского и Монголо-Охотского океанов, как это было показано для обрамления Сибирского кратона в работах [Van Der Voo et al., 2015] и

Китая [Xu et al., 2012; Li et al., 2016]. Миграция и последующая кристаллизация расплавов, выделяющихся в процессе преобразования океанической литосферы, приводят к образованию в мантии жил гранат-содержащих пироксенитов и к газированию астеносферной мантии (рис. 15).

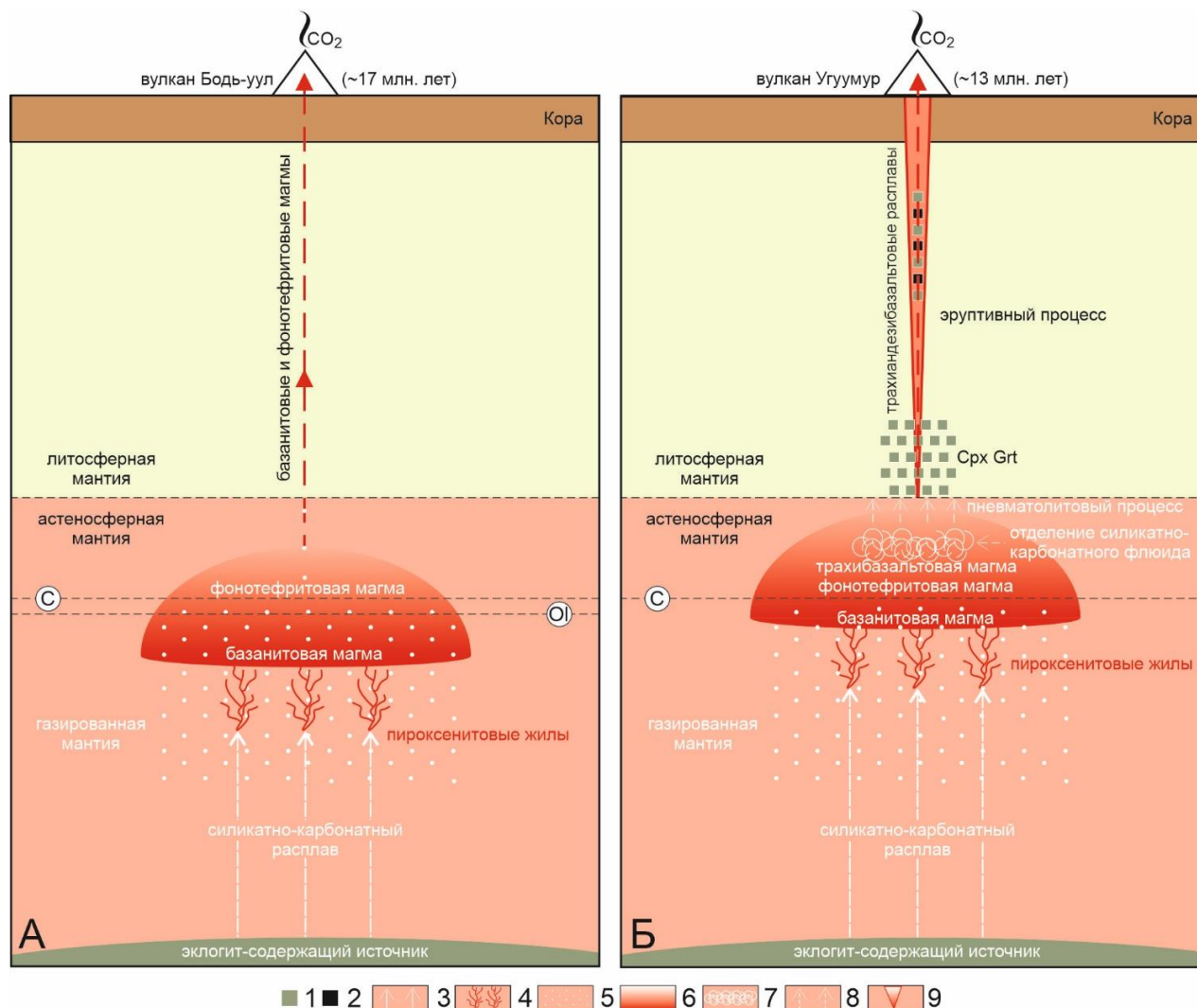


Рис. 15. Модель формирования щелочно-базальтовых магм, мегакристаллов и процесса эволюции магматической системы Тэсийгольского ареала Северной Монголии.

Условные обозначения. 1 – мегакристаллы Cpx и Grt, 2 – фрагменты перидотитов и пироксенитов литосферной мантии, 3 – направление подъема силикатно-карбонатного расплава, 4 – область локализации пироксенитовых жил, 5 – область газированной перидотитовой астеносферной мантии, 6 – магматический очаг, 7 – область отделения от магматического расплава силикатно-карбонатного флюида, 8 – направление подъема силикатно-карбонатного флюида (пневматолитовый процесс), 9 – направление развития эксплозивного процесса. «C» – линия солидуса сухого карбонатизированного перидотита, «Ol» – уровень начала кристаллизации оливина. CO₂ – выделение карбонатной фазы в процессе извержений.

Подъем в позднем кайнозое астеносферной мантии или плюма вызывает плавление и образование вблизи солидуса карбонатизированной перидотитовой мантии очага кремний недосыщенной щелочно-базальтовой магмы, источником которой согласно моделям по [Herzberg, Asimow, 2015; Lambart et al., 2016] служили пироксениты. Этот процесс сопровождался разрушением силикатно-карбонатной фазы и ее растворением в расплаве.

Стационарный поток высвобождающейся силикатно-карбонатной насыщенной флюидом фазы в ходе процесса, сходного с пневматолитовым, формирует над

магматическим очагом мантийные жилы или камеры, выполненные мегакристаллами граната и пироксена (рис. 15). Одним из подтверждений возможности реализации такого процесса является отсутствие зональности мегакристаллов, свидетельствующее о слабой изменчивости состава минералообразующей среды.

В кайнозое главным геодинамическим событием на окраине Азиатского континента было Индо-Азиатское столкновение. Оно началось 45 ± 5 млн. лет назад после этапа трансформного режима и на заключительном этапе 30 ± 5 млн. лет назад привело к жесткому столкновению между Индией и палеоконтинентом [Wang, 2017]. Именно на рубеже ~ 38 -33 млн. лет в Центральной Азии произошла активизация вулканической деятельности. В интервале поздний эоцен – поздний плейстоцен – голоцен здесь образовались многочисленные вулканические ареалы [Yarmolyuk et al., 2014]. Деформации от жесткого столкновения распространялись в направлении к Сибирскому кратону и около 5 млн. лет назад достигли упора [Буслов, 2012]. Процессы столкновения привели к формированию горных систем, а вращение Амурской плиты относительно Евразийской вызвали образование рифтовых структур [Зоненшайн, Савостин, 1979]. Таким образом, причиной развития позднекайнозойского вулканизма в Центральной и Северной Монголии могли быть возникшие напряжения и нарушение изостатического равновесия в мантии, вплоть до ее переходного слоя, в результате процессов Индо-Азиатского столкновения. На связь этих геодинамических событий с активизацией внутриплитного вулканизма в Центральной Азии указывалось ранее, к примеру [Togtokh et al., 2019].

В результате проведенных минералогических и изотопно-геохимических исследований пород и мегакристаллов Тэсийнгольского вулканического ареала сформулировано **4-е защищаемое положение:**

В образовании щелочно-базальтовых магм и мегакристаллов Тэсийнгольского ареала принимали участие гранат- и карбонат-содержащие мантийные источники вещества, отвечающие в целом характеристикам обогащенной мантии ЕМІ типа с незначительным участием мантии типа PREMA. Происхождение таких источников связывается с процессами метасоматоза и газирования пород верхней мантии при участии вещества океанической литосферы, субдуцированной в геологическом прошлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных минералого-геохимических исследований пород и ксеногенного материала Тэсийнгольского позднекайнозойского вулканического ареала Северной Монголии, в том числе вулканических центров Угуумур и Бодь-уул получены сведения об условиях образования и источниках вещества щелочно-базальтовых магм, а также сделаны предположения о причинах активизации в регионе вулканической деятельности. Показано, что эволюция вулканизма в ареале проявлялась, начиная с раннемиоценового возраста и длилась порядка 8 млн лет. При этом направленность эволюции магмообразования выразилась в смене щелочных базанитовых и фонотефритовых магм субщелочными преимущественно трахиандезибазальтовыми.

Установлено, что эруптивные отложения, а также лавы трахиандезибазальтов и трахиандезитов вулкана Угуумур содержат ксенолиты шпинелевых и гранатовых перидотитов, гранат-содержащих пироксенитов, а также мегакристаллы К-Na- и К-санидинов, Са-Na пироксенов, ильменитов и альмандин-гроссуляр-пироповых гранатов. В полимиктовых брекчиях вулкана впервые установлены мегакристаллы апатита. Как в лавах, так и в эруптивных отложениях Тэсийнгольского ареала установлено значительное распространение карбонатного вещества. Наличие карбонатных фаз в субликвидусных

минералах и мантийных породах свидетельствует о высокой роли углеродсодержащего флюида или силикатно-карбонатных расплавов в процессах магмообразования. Такой состав флюида во многом определил высокую эксплозивную активность ареала.

Показано, что породы вулканических центров обогащены LILE и HFSE и имеют высокую степень фракционирования REE. Общей для них особенностью является их относительное обеднение U и Th. Низкие содержания U и Th в породах позднекайнозойских вулканических ареалов Северной и Центральной Монголии могут отражать особенности состава одного из источников вещества, участвующего в формировании исходных щелочно-базальтовых магм. Предположено, что таким источником может быть вещество древней литосферы с низкими величинами U/Pb отношений. Особенности составов мегакристаллов, указывающие на их сходство с эклогитовым парагенезисом, а также геохимические особенности пород показывают на то, что щелочно-базальтовые магмы Тэсийнгольского ареала могли быть сформированы при частичном плавлении Grt-содержащих пироксенитов при участии силикатно-карбонатных расплавов. Изотопные составы мегакристаллов близки к изотопному составу пород вулканов Угуумур и Бодь-уул, что указывает на общий для них источник вещества.

Установлено, что в истории эволюции магматической системы Тэсийнгольского вулканического ареала происходило уменьшение глубин магмообразования во времени с формированием щелочных магм и мегакристаллов темноцветных минералов вблизи границы астеносферной и литосферной мантии и затем субщелочных расплавов вблизи раздела коры и верхней мантии. Мегакристаллы формировали мантийные жилы над областью магматического очага.

Впервые исследованы процессы преобразования мегакристаллов Сrx. Установлено, что преобразование происходит в результате инконгруэнтного плавления мегакристаллов при их транспортировке щелочно-базальтовыми магмами.

Итоги проведенных автором исследований Тэсийнгольского вулканического ареала позволяют поставить целый ряд важных вопросов для уточнения условий магмообразования, направленности и порядка кристаллизации щелочно-базальтовых расплавов. Остаются актуальными установление состава и природы источников вещества и геодинамической обстановки развития позднекайнозойского вулканизма Монголии в целом.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Perepelov A., Kuzmin M., Tsypukova S., Shcherbakov Y., Dril S., Didenko A., Dalai-Erdene E., Puzankov M., **Zhgilev A.** Late Cenozoic Uguumur and Bod-Uul Volcanic Centers in Northern Mongolia: Mineralogy, Geochemistry, and Magma Sources // Minerals. – 2020. - V. 10. - № 7. – P. 612.

2. **Жгилев А.П.**, Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., Каримов А.А. Мегакристаллы пироксенов и гранатов в магматической системе и мантии Тэсийнгольского вулканического ареала Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. – 2025. - В. 16. - № 3. - 0828.

Тезисы докладов:

1. Перепелов А.Б., **Жгилев А.П.**, Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., Бат-Ульзий Д., Дриль С.И. Мегакристаллы Тэсийнгольского вулканического ареала Северной Монголии – парагенезис и условия происхождения. Материалы научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». г. Иркутск. 20–23 октября 2020 г. В.18. С. 270–272.

2. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Щербаков Ю.Д., Одгэрэл Д., Энхбат Д.-Э., **Жгилев А.П.**, Пузанков М.Ю. Новые данные о составе пород и возрасте Тэсийнгольского позднекайнозойского вулканического ареала Северной Монголии. Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых). г. Иркутск. 06–13 сентября 2021 г. Т. 3. С. 201-203

3. **Жгилев А.П.**, Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д. Мегакристаллы Тэсийнгольского вулканического ареала Северной Монголии – научное и геммологическое значение. Материалы научного семинара «Минералогия и музеи: синергия науки и искусства». г. Иркутск. 31 марта 2022 г. С. 45-51.

4. **Жгилев А.П.**, Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д. Условия происхождения мегакристаллов пироксенов и процессы их преобразования под воздействием базальтовых магм (Тэсийнгольский вулканический ареал Северной Монголии). Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых) «Современные направления развития геохимии». г. Иркутск. 21-25 ноября 2022 г. Т. 1. С. 192-196.

5. Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Палесский С.В., Щербаков Ю.Д., **Жгилев А.П.** Индикаторная роль элементов платиновой группы в установлении источников щелочно-базальтовых магм кайнозойских вулканических ареалов Южного Прибайкалья и Северной Монголии. Геодинамика и минерагения Северной Евразии: Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Дوبرцова СО РАН. г. Улан-Удэ. 13 - 17 марта 2023 г. С. 409-411.

6. **Жгилев А. П.**, Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., Каримов А.А. Мегакристаллы пироксенов и гранатов Тэсийнгольского вулканического ареала Северной Монголии: условия происхождения и процессы преобразования под воздействием базальтовых магм. Материалы V Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы», посвященной памяти академика Н.А. Логачева в связи с 95-летием со дня рождения. г. Иркутск. 16-19 апреля 2024 г. С. 47-51.

7. Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., **Жгилев А.П.** Позднекайнозойский вулканизм Северной Монголии – типизация и минералогическо-геохимические особенности пород, источники и условия образования щелочно-базальтовых магм во внутриконтинентальной геодинамической обстановке. Материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». г. Владивосток. 15-18 сентября 2025 г. С. 27-30.

8. Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., **Жгилев А.П.**, Корытов А.С. Актуальные вопросы в изучении позднекайнозойского вулканизма Северной Монголии. Материалы XXIII научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». г. Иркутск. 14–18 октября 2025 г. В. 23. С. 201–202.