

На правах рукописи



**КХЛИФ Незар**

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ СРЕДНЕКЕМБРИЙСКИХ  
ДИОПСИД-СОДЕРЖАЩИХ ЭФФУЗИВОВ УСТЬ-СЕМИНСКОЙ СВИТЫ И  
ИНТРУЗИЙ БАРАНГОЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

1.6.3 – петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель:

**Вишневский Андрей Владиславович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

**Пушкарев Евгений Владимирович**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии магматических формаций Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

**Горнова Марина Аркадьевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

### **Ведущая организация**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Защита состоится 28 марта 2022 года в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3.

Факс: +7 (383) 333-2130;

e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН.

Автореферат разослан «24» февраля 2022 года.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.1.050.01

доктор геолого-минералогических наук



О.М. Туркина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Происхождение и геодинамические условия формирования раннепалеозойских вулканогенных толщ и интрузивных комплексов в Горном Алтае является предметом активной дискуссии [Buslov et al., 1993; Buslov et al., 2001; Гибшер и др., 1997; Добрецов и др., 2004; Зыбин, 2006; Симонов и др., 2010; Сафонова и др., 2011; Крук и др., 2017]. В особенности это касается среднекембрийских эффузивов усть-семинской свиты и интрузий барангольского комплекса. Эффузивы усть-семинской свиты имеют необычный минеральный состав: они обогащены вкрапленниками клинопироксена и обладают повышенными концентрациями кремния при высоком содержании магния. По этой причине они были отнесены к бонинитам [Добрецов и др., 2004], хотя ранее рассматривались как диопсид-порфировые базальты [Гибшер и др., 1997]. Однако в этих работах не было принято во внимание повышенное содержание кальция и, соответственно, высокое  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  отношение, типичное для вулканических пород, обогащённых вкрапленниками клинопироксена – анкармитов [Della-Pasqua, Varne, 1997; Le Maitre, 2002].

Реконструкции геодинамической обстановки формирования этих вулканитов разнятся: исходя из анализа геологической позиции и ассоциации с вендраннекембрийскими базальтами рассматривается обстановка задугового палеобассейна [Гибшер и др., 1997], а на основании синтеза геохимических и геологических данных предполагается сложный процесс при погружении океанической литосферы в зону субдукции с последующим плавлением в надсубдукционной обстановке на границе коры и верхней мантии [Симонов и др., 2010; Сафонова и др., 2011]. Остаётся дискуссионным и вопрос о генезисе ультрамафит-мафитовых интрузий барангольского комплекса, ассоциирующих с эффузивами усть-семинской свиты до сих пор не решён.

На основании проведения детальных минералого-петрографических, петрохимических и геохимических исследований пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса становится возможной оценка их взаимоотношений, генезиса и геодинамической обстановки формирования.

**Объектами исследования** являются среднекембрийские эффузивы усть-семинской свиты и интрузивные породы барангольского комплекса Горного Алтая.

**Целью исследования** является обоснование модели формирования эффузивов усть-семинской свиты и интрузий барангольского комплекса.

**Задачи исследования:** **1** – изучение литературы и составление обзора по анкармитовому магматизму; **2** – формирование эталонной коллекции образцов пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса; **3** – петрографическое исследование пород и определение состава породообразующих минералов; **4** – изучение редкоэлементного состава клинопироксена; **5** – проведение валового анализа пород (в том числе редких элементов) и их интерпретация; **6** – обобщение и анализ результатов проведённых исследований.

**Фактический материал и методы исследования.** Первичные материалы – породы усть-семинской свиты и барангольского комплекса были отобраны в ходе полевых работ сотрудниками лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций (лаборатория 211) Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН) А.В. Вишневым и Е.И. Михеевым в 2015-2017 гг. Дополнительные

образцы получены автором при полевых работах в 2018 г. Коллекция состоит из 71 образца (42 из эффузивов усть-семинской свиты и 29 из интрузий барангольского комплекса).

Для минералого-петрографических исследований были изготовлены шлифы (37 шт.) и аншлифы (60 шт.). Отдельные зерна клинопироксена были смонтированы в пашки из эпоксидной смолы (16 шт.). Породообразующие минералы и состав основной массы в полированных пластинах и пашках были проанализированы с помощью ЭДС (Oxford X-Max 80) на сканирующем электронном микроскопе (Tescan Mira 3) в ЦКП МИИ СО РАН на базе ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Детальное изучение строения фенокристаллов клинопироксена и измерение концентраций основных компонентов в пашках (45 зёрен) и в полированных пластинках (56 зёрен) были проведены по профилям от центра к краю зёрен. Проводилось также картирование распределения элементов в зональных вкрапленниках.

Измерение концентраций редкоземельных и редких элементов для зёрен клинопироксена в полированных пластинах и пашках (54 зерна) проводилось на ИСП-МС NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для лазерной абляции NWR213 (ESI) в ЦКП «Геоаналитик» ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург. Помимо измерений микроэлементного состава клинопироксена в точке, проводился прожиг профилей (21 профиль) в крест зональности зёрен, либо через весь кристалл, либо от центральных частей ядра до внешней зоны.

Анализ валового состава пород (64 пробы) проводился методом РФА (ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd)) в ЦКП МИИ СО РАН на базе ИГМ СО РАН. Анализ редких элементов пород (26 проб) проводился методом ИСП-МС (Delta+Advantage Finigan MAT 252), в Южно-Уральском ЦКП по исследованию минерального сырья (ИМ УрО РАН), г. Миасс.

**Научная новизна:** **1** – определён микроэлементный состав зёрен клинопироксена в точке и профилями из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса; **2** – впервые среди пород усть-семинской свиты выделены анкармиты и показана общая высококальциевая специфика минералов и пород; **3** – определён микроэлементный состав пород барангольского комплекса методом ИСП-МС; **4** – обоснована субдукционно-связанная геодинамическая обстановка формирования интрузивов барангольского комплекса; **5** – обоснована возможность отнесения интрузивов барангольского комплекса к Урало-Аляскинскому формационному типу.

**Практическая значимость исследований.** Доказанное проявление анкармитового магматизма среди пород усть-семинской свиты и наличие ультрабазит-базитовых массивов барангольского комплекса, комагматичных этим вулканитам, указывают на возможность выделения интрузий, подобных массивам Уральско-Аляскинского типа в Алтае-Саянской складчатой области, что позволяет предполагать возможность обнаружения платинометалловой, в т.ч. россыпной минерализации.

#### **Основные защищаемые положения:**

**1.** По совокупности минералого-петрографических особенностей и петрохимических характеристик, среди эффузивов усть-семинской свиты выделяются две группы пород. Первая группа с отношением  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$ , характеризующаяся обилием вкрапленников клинопироксена, классифицируется как анкармиты, а породы второй группы с  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$  и значительной долей плагиоклаза во вкрапленниках являются диопсид-порфировыми базальтами.

2. Клинопироксен из пород усть-семиной свиты и барангольского комплекса по составу основных компонентов и микроэлементов относится к одной популяции и не является ксеногенным как предполагалось ранее.

3. Минерало-петрографические особенности, петрохимический и редкоэлементный состав интрузивных пород барангольского комплекса показывают их родственность вулканитам усть-семиной свиты, и свидетельствуют о субдукционно-связанной обстановке их формирования.

**Апробация работы и публикации.** По теме диссертации были опубликованы пять работ, включая две статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Результаты озвучены в докладах трёх конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Объем диссертации составляет 135 страниц, в том числе 30 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 132 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.г.-м.н. А.В. Вишневному и д.г.-м.н. профессору А.Э. Изоху за руководство и консультации, благодаря которым успешно удалось выполнить научную работу и опубликовать научные статьи и тезисы. Также выражается благодарность А.И. Ильину, Е.В. Михееву и Д.В. Элькиной, принимавшим участие в экспедиционных работах, М.В. Червяковской и И.А. Вишневской, способствовавших проведению анализа микроэлементного состава минералов методом ИСП-МС. Огромная благодарность моей семье за постоянную поддержку.

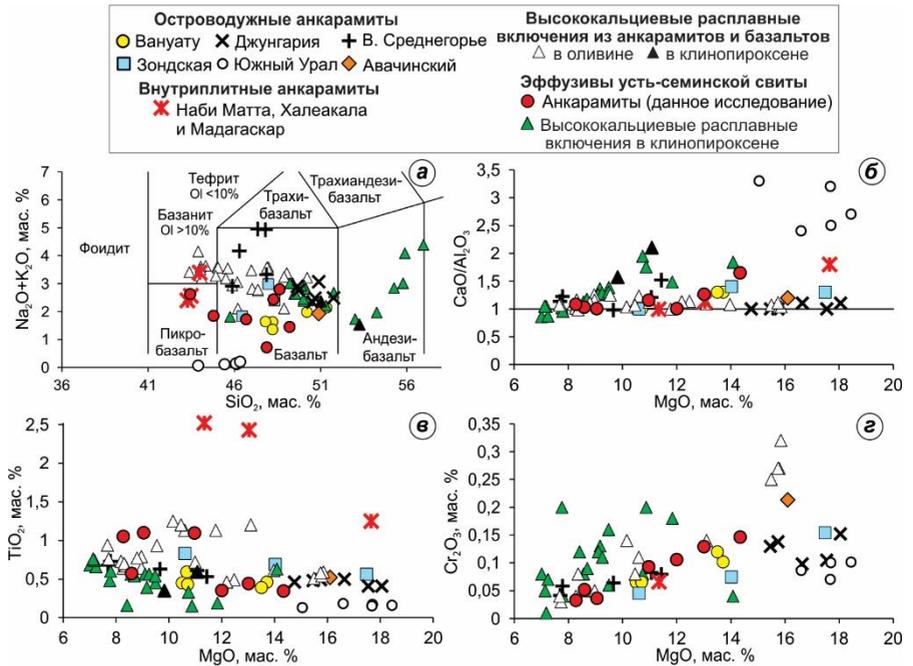
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведён литературный обзор по высококальциевому анкараритовому магматизму. Анкараритовые расплавы фиксируются как в виде непосредственно вулканических пород, так и в виде высококальциевых расплавных включений во вкрапленниках оливина и клинопироксена из анкараритов или базальтов. Анкарариты (как особый тип пород) – это оливин-клинопироксеновые высокомагнезиальные базальты с  $CaO/Al_2O_3 > 1$  (Рис. 1а) [Della-Pasqua, Varne, 1997; Кхлиф и др., 2020]. Они характеризуются порфировой структурой с обилием вкрапленников высокомагнезиального клинопироксена (>25 об. %), представленного диопсидом и авгитом с магнезиальностью  $Mg\#$  63–94, где  $Mg\# = 100 * Mg / (Mg + Fe)$ , располагающихся в клинопироксен-плагиоклазовой микролитовой основной массе. Клинопироксены из анкараритов внутриплитных обстановок в отличие от клинопироксенов из анкараритов островных дуг характеризуются значительно более высокими содержаниями  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $Na_2O$ .

Помимо клинопироксена в анкараритах наблюдаются вкрапленники магнезиального оливина ( $Fo_{75-92}$ ; содержание CaO в нём достаточно высоко, до 0,53 мас. %; однако в большинстве случаев он отсутствует или полностью замещён вторичными продуктами), редкие вкрапленники основного плагиоклаза ( $An_{49-93}$ ; в наиболее магнезиальных анкараритах он отсутствует вовсе). Хромшпинель чаще всего присутствует в виде включений во вкрапленниках оливина или клинопироксена и характеризуется высокой хромистостью  $Cr\#$  до 90 (где  $Cr\# = 100 * Cr / (Cr + Al)$ ).

Общими петрохимическими чертами анкараритов из разных проявлений являются высокие содержания (в мас. %)  $MgO$  7,69–18,44,  $CaO$  8,82–21,12,  $Cr_2O_3$  до 0,3,

и высокое отношение  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$  (1,0–3,3) (Рис. 1). Содержание  $\text{TiO}_2$  позволяет достаточно уверенно отличать анкармиты островных дуг (низкие значения) от анкармитов внутриплитных обстановок (Рис. 1б).

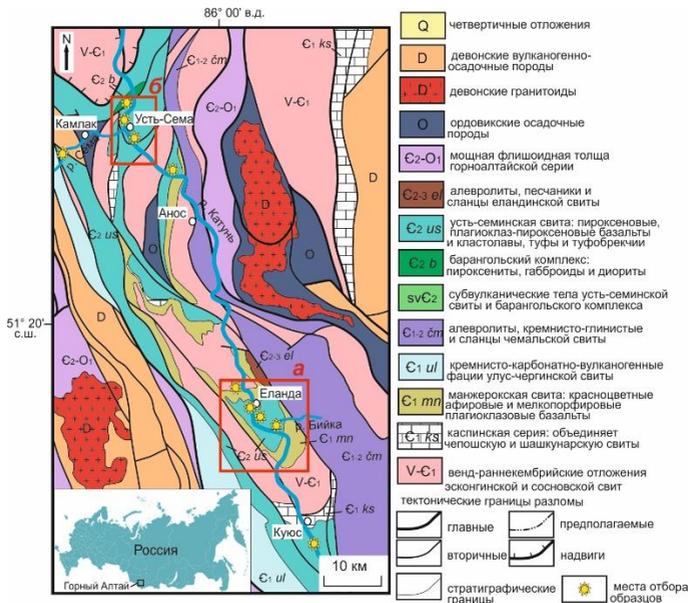


**Рисунок 1.** а – классификационная диаграмма TAS по [Le Maitre, 2002] и б–г – вариации состава  $\text{MgO}$  с  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  для анкармитов и гомогенизированных высококальциевых расплавных включений. Островодужные анкармиты: Вануату [Bardsell, 1988; Bardsell, Berry, 1990; Della-Pasqua, Varne, 1997], Зондская дуга [Della-Pasqua, Varne, 1997], Джунгария [Zhang et al., 2008], Южный Урал [Пушкарев и др., 2017], Восточное Среднегорье [Marchev et al., 2009], Авачинский вулкан (средний состав) [Portnyagin et al., 2005]; внутриплитные анкармиты: Мадагаскар [Lacroix, 1916], Наби Матта [George et al., 2011] и Халеакала [Hammer et al., 2016]; гомогенизированные высококальциевые расплавные включения: в оливине из анкармитов и базальтов [Schiano et al., 2000; Portnyagin et al., 2005] и в клинопироксене из анкармитов [Della-Pasqua, Varne, 1997]; анкармиты усть-семиной свиты (данное исследование); гомогенизированные высококальциевые расплавные включения в клинопироксене из вулканитов усть-семиной свиты [Buslov et al., 1993; Симонов и др., 2010]. На диаграмме (г) отсутствие некоторых точек составов связано с тем, что данные по содержаниям хрома для них отсутствуют.

Проведённый обзор моделей генезиса анкармитов показывает, что получить высококальциевый анкармитовый расплав (с отношением  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$ ) непосредственно из обычных мантийных лерцолитов невозможно. Его можно получить либо за счёт плавления верлитов или оливиновых клинопироксенитов, присутствующих в мантии или в нижней коре, либо за счёт верлитизации литосферной мантии карбонатитовым расплавом или водно-углекислыми флюидами.

**Вторая глава** посвящена геологии и истории изучения объектов исследования (пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса), её краткое содержание изложено ниже.

Породы усть-семинской свиты и барангольского комплекса входят в состав Катунского аккреционного комплекса северной части Горного Алтая (Рис. 2), сформировавшегося в результате, венд-среднекембрийской субдукции океанической коры Палеоазиатского океана и аккреции палеоокеанических островов к Кузнецко-Алтайской островной дуге [Добрецов и др., 2004]. В состав Катунского комплекса входят различные тектонические пластины, среди которых диагностируются осадочные отложения и фрагменты океанической коры (венд-раннекембрийские базальты типа MORB эсконгинской и улус-чергинской свит), палеосимаунты (раннекембрийские базальты типа-OIB манжерокской свиты), образования их склоновых фаций и карбонатных шапок (раннекембрийские известняки чеповшской и шашкунарской свит) [Добрецов и др., 2004; Сафонова и др., 2011].



**Рисунок 2.** Геологическая схема северной части Горного Алтая [Государственная..., 2011] с упрощениями, а, б – геологические схемы Бийской и Усть-Семиной вулканических построек (Приложение 1).

Среднекембрийские вулканические и вулканогенно-осадочные породы усть-семинской свиты в виде лавовых потоков пироксен-порфировых и пироксен-плагиоклаз-порфировых базальтов, кластолавы и туфов, а также даек, широко распространены по право- и левобережью реки Катунь, в бассейне её притоков – рек Сема и Бийка (Рис. 2, Приложение 1). Вулканы усть-семинской свиты образуют несколько вулканических построек. Основной объём усть-семинской свиты

сконцентрирован в двух палеовулканах центрального типа – Усть-Семинском в северо-западной части Катунского комплекса и Бийском – в юго-восточной. Вулканиды слагают также Анос-Емурлинскую линейную вулканическую постройку между этими двумя палеовулканами. Кроме того, вулканиды усть-семинской свиты выходят в районах п. Камлак и п. Куюс. Образцы вулканидов были отобраны из Усть-Семинской постройки (13 образцов), из Анос-Емурлинской постройки (2 образца) и из Бийской постройки (20 образцов), а также из участка Камлак (5 образцов) и из участка Куюс (2 образца) (**Рис. 2, Приложение 1**).

Среднекембрийские гипабиссальные интрузии барангольского комплекса пространственно ассоциируют с вулканидами усть-семинской свиты (**Рис. 2, Приложение 1**). В составе этого комплекса были выделены массивы трех типов: дунит-верлит-клинопироксенитовый Апшухтинский, габбро-монцогаббро-монциодоритовый Еландинский и диорит-пироксенит-габбровый Барангольский [Шокальский и др., 2000; Государственная..., 2011]. Кроме того, наблюдаются небольшие субвулканические интрузии, прорывающие вулканиды Бийской постройки, например, в районе р. Чобурак. Они представлены в основном габбро и монцогаббро. Образцы из интрузий барангольского комплекса были отобраны из Апшухтинского (14 образцов), Еландинского (3 образца) и Барангольского (9 образцов) массивов, а также из тел в районе р. Чобурак (3 образца) (**Рис. 2, Приложение 1**).

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

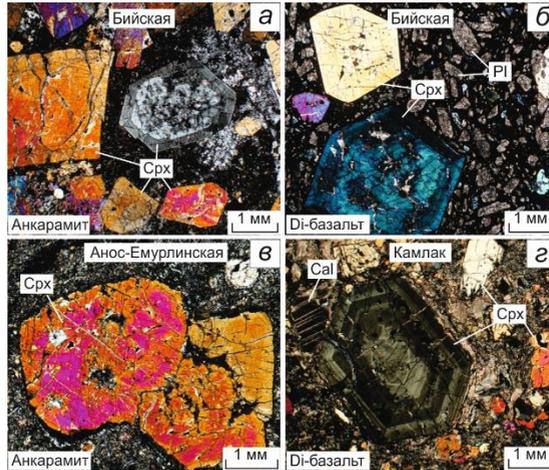
**Первое защищаемое положение.** *По совокупности минералогическо-петрографических особенностей и петрохимических характеристик, среди эффузивов усть-семинской свиты выделяются две группы пород. Первая группа с отношением  $CaO/Al_2O_3 > 1$ , характеризующаяся обилием вкрапленников клинопироксена, классифицируется как анкармиты, а породы второй группы с  $CaO/Al_2O_3 < 1$  и значительной долей плагиоклаза во вкрапленниках являются диопсид-порфиrowыми базальтами.*

Вулканиды усть-семинской свиты характеризуются серым до тёмно-серого цвета с зелёным оттенком, массивной и реже миндалекаменной текстурами. Для них характерна порфировая структура с вкрапленниками клинопироксена, изменённого плагиоклаза, редко амфибола, гораздо реже полностью изменённого оливина и хромшпинели, располагающимися в микролитовой основной массе (**Рис. 3**).

Особенностью вулканидов усть-семинской свиты является большое количество вкрапленников клинопироксена (их объёмная доля составляет до 50 %). Вследствие этого, они были классифицированы ранее как диопсид-порфиrowые базальты (Гибшер и др., 1997), пироксеновые и пироксен-плагиоклазовые базальты (Зыбин, 2006).

В зависимости от объёмного содержания вкрапленников (в основном вкрапленники клинопироксена и плагиоклаза), нами были выделены две группы пород (**Рис. 3**). **Первая группа** (анкармиты) характеризуется обилием вкрапленников высокомагнезиального клинопироксена (25–50 об. %) располагающихся в основной массе, состоящей из микролитов клинопироксена и плагиоклаза (**Рис. 3а, в**). Хромшпинель в породах этой группы присутствует в виде мелких включений с высокой хромистостью  $Cr\# 76–88$  во вкрапленниках клинопироксена (**Приложение 2**).

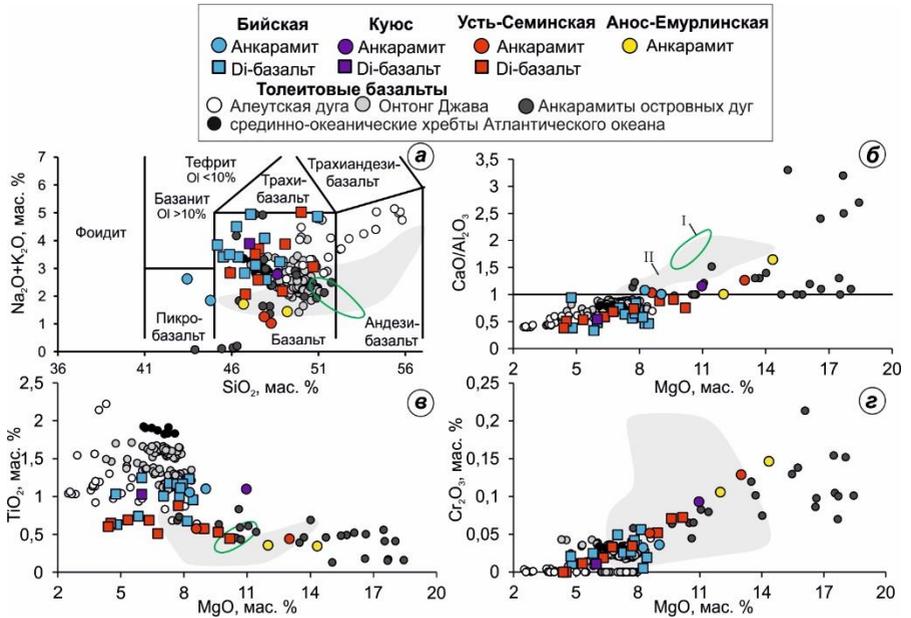
По составу она представлена хромитом и магнезиохромитом. Породы этой группы встречаются в Усть-Семинской, Бийской и Анос-Емурлинской постройках, а также на участке Куюс.



**Рисунок 3.** Микрофотографии шлифов из первой (анкарамит, (а,в)) и второй (Ди-базальт: диоксид-порфиновый базальт (б,з)) групп пород усть-семинской свиты (николи скрещены). Индексы минералов: Cal – кальцит, Crx – клинопироксен, Pl – плагиоклаз.

Для пород **второй группы** (диоксид-порфиновые базальты: Ди-базальты) характерно обилие вкрапленников сосюритизированого плагиоклаза (в редких сохранившихся вкрапленниках и реликтах он представлен лабрадором и битовнитом  $Ap_{49-68}$ ) и высокомагнезиального клинопироксена (**Рис. 3б,з**), амфибола (магнезиогастингсит и реже чермакит), полностью изменённые вкрапленники оливина (?) и очень редкие зерна хромшпинели. Хромшпинель в породах этой группы также присутствует в виде мелких включений с высокой хромистостью (80,0–83,8) во вкрапленниках клинопироксена (**Приложение 2**). Основная масса в них состоит преимущественно из микролитов клинопироксена и изменённого плагиоклаза ( $An_{59-77}$ ), а также ксеноморфных выделений кали-натриевого полевого шпата, апатита, титанита и кальцита. Породы этой группы встречаются в Усть-Семинской и Бийской постройках, и также на участках Куюс и Камлак.

Точки составов пород усть-семинской свиты на классификационной диаграмме попадают в основном в поле базальтов, реже пикробазальтов (**Рис. 4а**). Породы усть-семинской свиты преимущественно относятся к толеитовой серии, с небольшим смещением в сторону известково-щелочной и характеризуются широкими вариациями по всем петрогенным компонентам (**Рис. 4**).



**Рисунок 4.** Классификационная диаграмма TAS (а) по [Le Maitre, 2002] и вариации отношений MgO с CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (б), с TiO<sub>2</sub> (в), с Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (г) для пород усть-семиинской свиты. Анкармиты островных дуг (см. рис. 1); толеитовые базальты Алеутской дуги [Kau, 1977; Singer et al., 1992; George et al., 2004; Singer et al., 2007]; толеитовые базальты плато Онтонг Джава [Mahoney et al., 1993]; толеитовые базальты срединно-океанических хребтов Атлантического океана [Dietrich et al., 1984]. I–II – поля состава гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене: I – из анкармитов [Della-Pasqua, Varne, 1997], II – из вулканитов усть-семиинской свиты [Buslov et al., 1993; Симонов и др., 2010]. На диаграмме (г) отсутствует поле состава гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене из островных дуг Вануату и Зондской, так как данные по содержаниям хрома для них отсутствуют.

На вариационных диаграммах они показывают отрицательные корреляции содержания MgO с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O, и положительные корреляции с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. По отношению CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и другим параметрам эти породы в целом образуют единый тренд, но, как уже упоминалось, среди них можно выделить две группы [Кхлиф и др., 2020; Khlif et al., 2022]: **первая группа** (анкармиты) с высоким отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >1 (1,0–1,6) и высокими содержаниями MgO 8,27–14,34 мас. %, CaO 11,34–14,48 мас. %, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,03–0,15 мас. % и **вторая** (Di-базальты) с отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <1 (0,3–0,9), и относительно низкими содержаниями CaO 5,85–11,86 мас. %, MgO 4,41–10,18 мас. %, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01–0,07 мас. % (**Рис. 4б, Таблица 1**). Несколько образцов из Бийской и Усть-Семиинской построек, и участка Камлак имеют высокие потери при прокаливании (5,65–12,89 мас. %), что частично связано с присутствием новообразованного кальцита в основной массе. Несмотря на высокое CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, их следует относить ко второй группе (Di-базальты) пород.

Таблица. 1

Средний состав (в мас. %) двух групп эффузивов усть-семиинской свиты

Тип пород	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Анкармиты (N=7)	46,98	0,71	11,2	10,89	12,72	1,16	0,77	0,08	1,2
Диоксид-порфиновые базальты (N=23)	47,63	0,86	16,08	7,03	9,76	2,32	1,35	0,03	0,6

Примечание: N – число анализов.

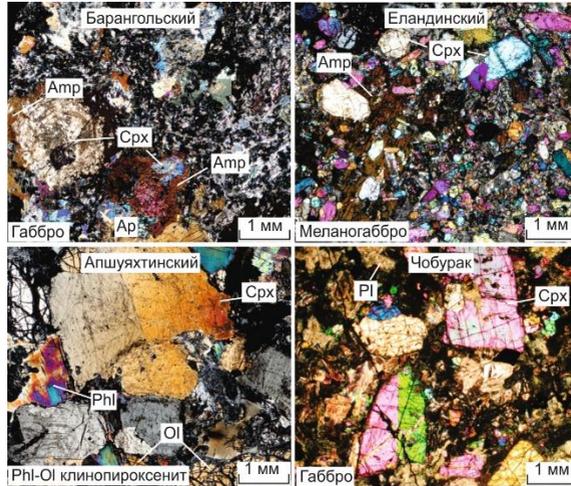
Породы с отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >1 в целом соответствуют первой группе, выделенной по минералого-петрографическим особенностям, характеризующейся обилием вкрапленников клинопироксена. Эти породы по вариациям всех петрогенных элементов и отношения CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отличаются от типичных толеитовых базальтов островных дуг, океанических плато и СОХ, и близки к анкармитам островных дуг (Рис. 4). В первую очередь, это высокие содержания MgO, CaO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и низкие Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>. Состав гомогенизированных расплавных включений, обнаруженных во вкрапленниках клинопироксена (Mg# >82) в породах усть-семиинской свиты по [Buslov et al., 1993; Симонов и др., 2010] с отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >1 (1,0–1,9) близок к составу гомогенизированных расплавных включений, обнаруженных в клинопироксене из островных дуг Вануату и Зондской, а также типичен для валового состава анкармитов островных дуг (Рис. 4).

Аналогичным образом, породы второй группы с отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <1 соответствуют второй петрографической группе, характеризующейся обилием вкрапленников плагиоклаза и клинопироксена, и их нужно относить к базальтам, обогащённым вкрапленниками диоксида – диоксид-порфировым базальтам. Они близки к типичным толеитовым базальтам островных дуг, океанических плато и СОХ с небольшим отличием по содержаниям TiO<sub>2</sub> и CaO (Рис. 4).

**Второе защищаемое положение.** *Клинопироксен из пород усть-семиинской свиты и барангольского комплекса по составу основных компонентов и микроэлементов относится к одной популяции и не является ксеногенным как предполагалось ранее.*

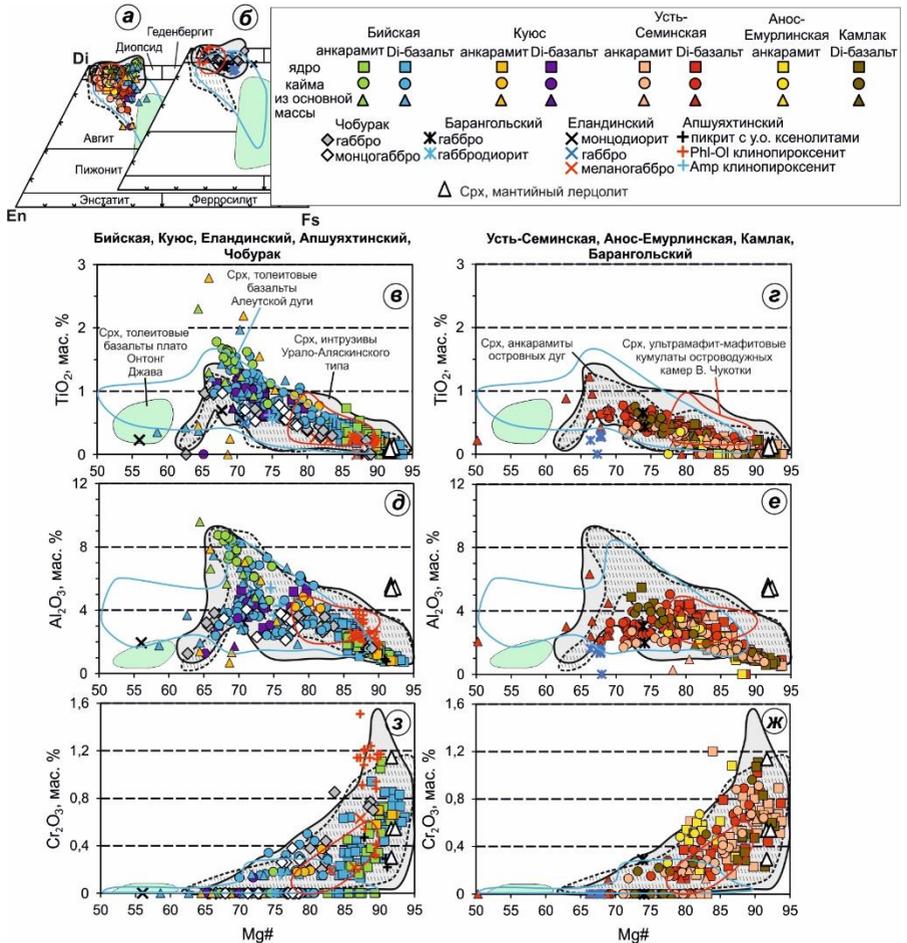
Клинопироксен, как уже было отмечено, является главным породообразующим минералом для эффузивов усть-семиинской свиты. Кроме того, он широко распространён и сохрэн в интрузивах барангольского комплекса, которые представлены в основном клинопироксенитами и габброидами (Рис. 5).

Клинопироксен из эффузивов усть-семиинской свиты представлен крупными зональными идиоморфными вкрапленниками (2–20 мм, чаще 3–9 мм), мелкими кристаллами (0,5–1 мм) и микролитами основной массы. В интрузивах барангольского комплекса, он образует либо идиоморфные кристаллы, либо ксеноморфные выделения и в общем случае не обладает зональностью.

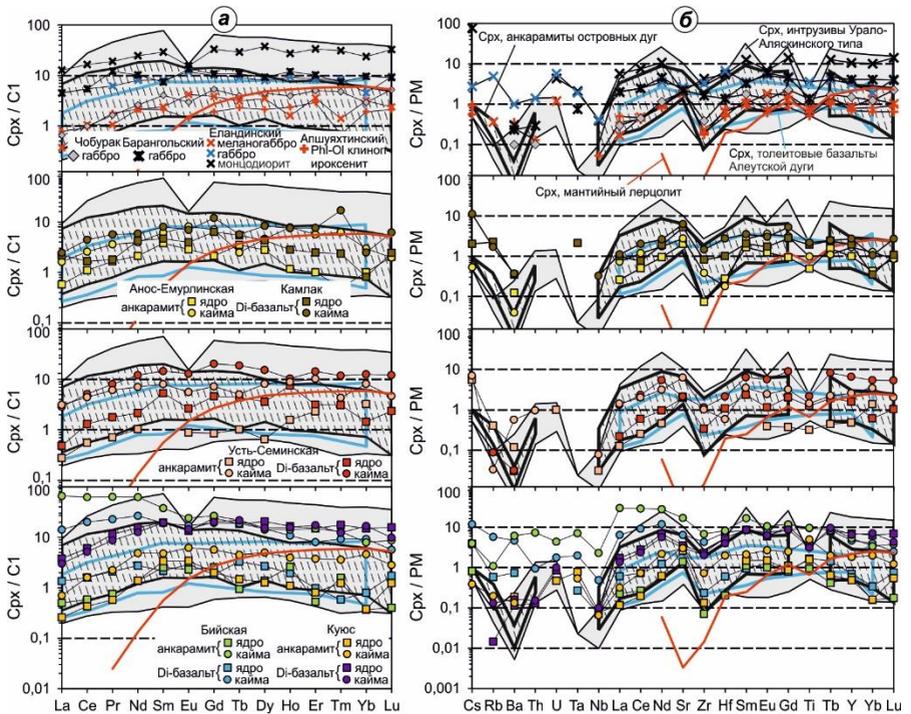


**Рисунок 5.** Микрофотографии шлифов пород барангольского комплекса (николи скрещены). Индексы минералов: Amp – амфибол, Ар – апатит, Срх – клинопироксен, Ol – оливин, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз.

Клинопироксены в вулканитах двух групп усть-семиинской свиты и интрузивах барангольского комплекса по особенностям примесного и основного состава принципиально не различаются и могут быть отнесены к одной и той же популяции (**Рис. 6,7**). Их сходные черты включают: **1** – высокую магнезиальность – от  $Mg\# 93,8-78,4$  (где  $Mg\# = 100 * Mg / (Mg + Fe)$  в атомных %) в ядрах вкрапленников из эффузивов усть-семиинской свиты, флогопит-оливиновых клинопироксенитов и ксенолитов в пикритах Апшуйахтинского, меланогаббро Еландинского массивов и габбро (ядра кристаллов) Чобурака, до  $Mg\# 83,0-50,3$  в краевых частях фенокристаллов и микролитах основной массы из эффузивов усть-семиинской свиты, амфиболовых клинопироксенитов Апшуйахтинского массива, габбро и монцодиоритов Еландинского массива, габбро и габбродиоритов Барангольского массива и габбро (край кристаллов) и монцогаббро Чобурака, **2** – преобладание диопсидового минала ( $En_{32-51}Wo_{28-52}Fs_{3-25}$ , **Рис. 6**); **3** – отрицательную корреляцию  $Mg\#$  с содержаниями  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  и положительную с содержанием  $Cr_2O_3$ ; **4** – сходные спектры распределения редкоземельных элементов, нормированные на валовый состав хондрита, показывающие положительный наклон для лёгких редкоземельных элементов с небольшим обеднением, прогиб для промежуточных и слабо отрицательный наклон или плоский спектр для тяжёлых редкоземельных элементов (**Рис. 6а**); **5** – выраженную отрицательную корреляцию  $Mg\#$  с концентрациями редкоземельных элементов во вкрапленниках; **6** – отрицательные аномалии по высокозарядным (Zr, Hf, Nb, Ti) и крупноионным литофильным элементам (Ba, Rb) (**Рис. 6б**).



**Рисунок 6.** Состав клинопироксенов из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса. Поля состава клинопироксенов из: интрузивов Урало-Аляскинского типа [Himmelberg, Loney, 1995; Пушкарев, 2000; Krause et al., 2007; Готтман, 2014; Khedr, Arai, 2016]; анкармитов островных дуг [Barsdell, Berry 1990; Della-Pasqua, 1997; Portnyagin et al., 2005; Zhang et al., 2008; Marchev et al., 2009; Пушкарев и др., 2017]; толеитовых базальтов Алеутской дуги [Kay, Kay, 1982, 1985; Borsuk et al., 1985; Romick et al., 1990; Singer et al., 1992; Myers et al., 2002; Wade et al., 2008; Lloyd et al., 2016], толеитовых базальтов плато Онтонг Джава [Frey et al., 1977; Frey et al., 1991]; ультрамафит-мафитовых кумулатов островодужных магматических камер Восточной Чукотки по [Леднева и др., 2020]; состав клинопироксена из мантийного перцолита комплекса горы Солдатская офиолитов Камчатского Мыса [Батанова и др., 2014].



**Рисунок 7.** а – спектры распределения редкоземельных элементов в клинопироксене, нормированные на состав хондрита (C1) по [Boynnton et al., 1984] и б – мультиэлементные диаграммы, со значениями, нормированными по примитивной мантии (PM) по [Sun, McDonough, 1989] для клинопироксенов из вулканитов усть-семинской свиты и интрузивов барангольского комплекса. Поле состава клинопироксенов из интрузивов Урало-Аляскинского типа [Krause et al., 2007; Khedr, Arai, 2016]; поле состава клинопироксенов из анкармитов островных дуг [Marchev et al., 2009; Portnyagin et al., 2005]; поле состава клинопироксенов из базальтов Алеутской дуги [Yogodzinsk, Kelemen, 1998]; состав клинопироксена из мантйного перцолита комплекса горы Солдатская офиолитов Камчатского Мыса [Батанова и др., 2014].

Сопоставление состава клинопироксенов из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса с составом клинопироксена из анкармитов островных дуг и толеитовых базальтов Алеутской дуги, а также с составами клинопироксена из перцолитов комплекса горы Солдатская офиолитов Камчатского Мыса [Батанова и др., 2014] показывает, что исследованные зерна кристаллизовались из базальтового расплава, и не являются захваченными базальтовым расплавом фрагментами мантйных верлитов или перцолитов, как предполагалось некоторыми исследователями ранее [Гибшер и др., 1997] (Рис. 6,7). Основное отличие заключается в том, что клинопироксен мантйных перцолитов имеет более высокое содержание  $Al_2O_3$  при высокой магнезиальности, сильно обеднён лёгкими редкоземельными элементами и характеризуется ярко проявленными отрицательными аномалиями по Sr. Напротив, однотипные спектры распределения редкоземельных элементов,

отрицательные аномалии по высокозарядным (Zr, Hf, Nb, Ti) и крупноионным литофильным элементам (Ba, Rb), а также сходные вариации Mg# с содержаниями TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, типичные и для клинопироксенов усть-семинской свиты и барангольского комплекса характерны для клинопироксена из базальтов и анкармитов многих островных дуг.

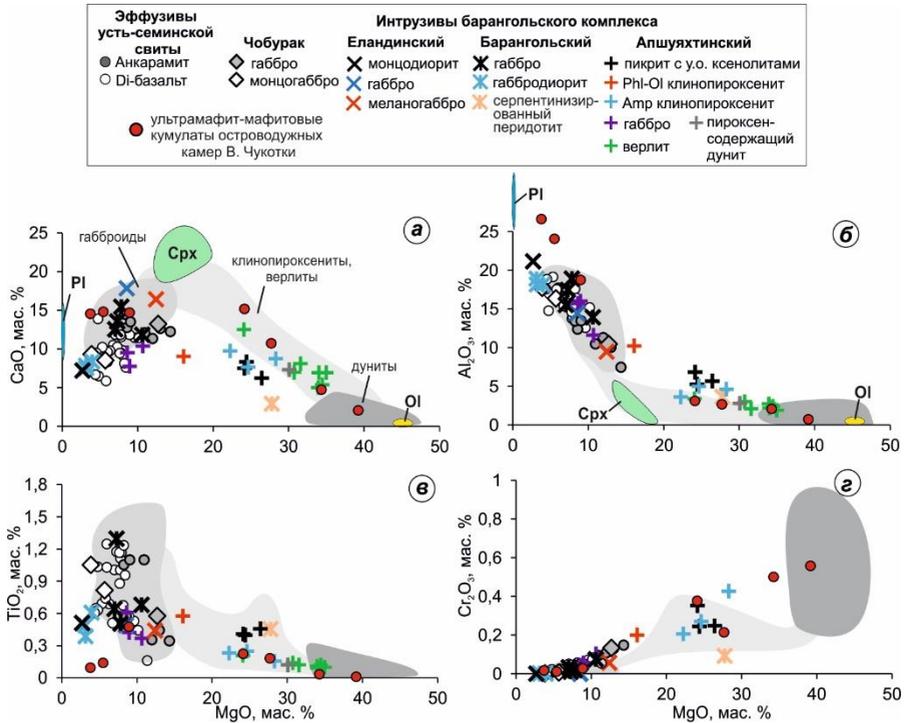
**Третье защищаемое положение.** *Минералого-петрографические особенности, петрохимический и редкоэлементный состав интрузивных пород барангольского комплекса показывают их родственность вулканитам усть-семинской свиты, и свидетельствуют о субдукционно-связанной обстановке их формирования.*

В предыдущем разделе была показана близость состава клинопироксенов из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса. Состав плагиоклаза (An до 70) в габброидах также близок к составам плагиоклаза из пород усть-семинской свиты (An<sub>49-68</sub>). Хромшпинель в виде включений в оливине и клинопироксене по составу соответствует хромитам, магнезиохромитам и герцинитам с широким диапазоном хромистости Cr# 42,1–87,4. Большая часть этих составов близка к составам хромшпинели (Cr# 75,6–88,1) из пород усть-семинской свиты (**Приложение 2**). Амфибол представлен в основном магнезиогастингситом и магнезиальной роговой обманкой и в общем близок к амфиболу по магнезиальности и содержаниям TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из пород усть-семинской свиты.

Интрузивные породы барангольского комплекса по петрохимическим особенностям показывают широкие вариации по всем петрогенным компонентам, и для них характерны отрицательные корреляции содержания MgO с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O, и положительные корреляции с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 8**).

Породы Апшухтинского массива по нашим и литературным данным наиболее магнезиальны среди пород барангольского комплекса. С уменьшением содержания MgO в породах барангольского комплекса возрастают содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO, что обусловлено фракционированием оливина и клинопироксена. Таким образом, диопсид-порфиновые базальты усть-семинской свиты близки по составу к габброидам барангольского комплекса, а анкармиты занимают промежуточное положение между ними и наиболее примитивными разностями интрузивных пород - оливиновыми клинопироксенитами Апшухтинского массива (**Рис. 8**).

Спектры распределения редкоземельных элементов, нормированные на валовый состав хондрита для эффузивов усть-семинской свиты и интрузивов барангольского комплекса показывают общие особенности (**Рис. 9а,б**). Для них характерны слабоотрицательный наклон или плоский спектр для лёгких редкоземельных элементов и слабоотрицательный наклон с уменьшением содержаний тяжёлых редкоземельных элементов. Они также характеризуются небольшим обогащением лёгкими редкоземельными элементами  $(La/Yb)_N = 0,9-3,3$ .



**Рисунок 8.** Вариации содержания MgO и других петrogenных компонентов в породах барангольского комплекса при сравнении с составом пород первой (анкарамиты) и второй (Ди-базальты) групп усть-семиной свиты. Состав верлитов и пироксенсодержащих дунитов из Апшуйхтинского массива по [Гибшер и др., 1997]. Состав ультрамафит-мафитовых кумулатов островодужных магматических камер Восточной Чукотки по [Леднева и др., 2020]. Поля составов дунитов, верлитов, клинопироксенитов и габброидов из интрузивов Урало-Аляскинского типа по [Himmelberg, Loney, 1995; Пушкарев, 2000; Khedr, Arai, 2016]. Cpx, Ol, Pl – состав клинопироксена, оливины и плагиоклаза (соответственно) из пород усть-семиной свиты и барангольского комплекса.

На мультиэлементных диаграммах, с значениями, нормированными по примитивной мантии, отчётливо выделяются общие особенности для всех пород усть-семиной свиты и интрузивов барангольского комплекса (Рис. 9б,г). Наблюдаются отрицательные аномалии по высокозарядным элементам (Zr, Hf, Nb, Th) и положительные аномалии по крупноионным литофильным элементам (Ba, Sr), Pb и U. Эти особенности отличают исследованные породы от толетитовых базальтов океанических плато и СОХ и отвечают субдукционно-связанной обстановке их формирования, типичной для островодужных толетитовых базальтов (например, Алеутской дуги) и анкарамитов. Особенности состава гомогенизированных расплавных включений из клинопироксена пород усть-семиной свиты [Buslov et al.,



элементами (**Рис. 7**), а также высокое содержание  $TiO_2$  в породах (**Рис. 466**) и обогащение лёгкими редкоземельными элементами (**Рис. 8a**), вероятно, связано с взаимодействием с породами или расплавами, имеющими соответствующие характеристики, например такими как базальты океанических островов манжерокской свиты [Khlif et al., 2022].

Проявление анкарамитового магматизма усть-семиной свиты в ассоциации с ультрабазит-базитовыми массивами барангольского комплекса позволят задать следующий вопрос: возможно ли выделение интрузий подобных массивам Урало-Аляскинского типа в пределах Алтае-Саянской складчатой области? Оценить такую возможность можно при сопоставлении минерального состава, петрохимии и геохимии барангольского комплекса с составом эталонных объектов.

Сопоставление состава клинопироксенов из интрузивов барангольского комплекса с типичными для интрузивов Урало-Аляскинского типа, показывает общие особенности, включающие: высокую магнезиальность клинопироксена, отрицательную корреляцию  $Mg\#$  с содержаниями  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $Na_2O$ , положительную корреляцию с содержанием  $Cr_2O_3$ , однотипные спектры распределения редкоземельных элементов и спайдер-диаграммы с отрицательными аномалиями по высокочargedным (Zr, Hf, Nb, Ti) и крупноионным литофильным элементам (Ba) (**Рис. 6,7**), а также совпадение с трендом островодужных кумулатов [Khlif et al., 2022]. Состав оливина из интрузивов барангольского комплекса типичен для оливина из интрузивов Урало-Аляскинского типа по вариациям форстеритового компонента (Fo) и его соотношениям с содержаниями NiO и CaO. Состав хромшпинелидов из интрузивов барангольского комплекса в целом типичен для интрузивов Урало-Аляскинского типа с небольшим отклонением, заключавшемся в том, что часть хромшпинелидов из пород барангольского комплекса имеет более высокие  $Cr\#$  и  $Mg\#$  и низкие содержания  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  (**Приложение 2**) [Khlif et al., 2022].

С точки зрения валового химического состава для пород барангольского комплекса при сравнении с составом интрузивов Урало-Аляскинского типа, наблюдается множество общих моментов. Так, для высокомагнезиальных пород характерно повышение содержания CaO при практически не увеличивающемся  $Al_2O_3$  – следствие «клинопироксеновой» специфики пород и накопления алюминия в остаточном расплаве (**Рис. 8**). Схожи и спектры распределения редкоземельных элементов и спайдер-диаграммы с отрицательными аномалиями по высокочargedным (Zr, Hf, Nb, Ti) и положительными аномалиями по крупноионным литофильным элементам (Ba, Sr) и Pb (**Рис. 9**).

Таким образом породы барангольского комплекса по совокупности минералогических, петрохимических и геохимических критериев, можно считать родственными интрузивам Урало-Аляскинского типа, хотя они не обладают (по крайней мере, вскрытым эрозией) зональным строением, типичным для подобных массивов. Кроме того, интрузивы барангольского комплекса по минеральному, петрохимическому и редкоэлементному составу имеют общность с ультрамафит-мафитовыми кумулатами островодужных магматических камер Восточной Чукотки (Чукотская складчатая система). Для них характерен более узкий диапазон вариаций  $Mg\#$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Na_2O$ , относительно низкие содержания  $Cr_2O_3$  в клинопироксене, низкие содержания форстеритового компонента, NiO и CaO в оливине, повышенные концентрации  $Al_2O_3$  в хромшпинелидах (**Рис. 6,8; Приложение 2**).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фракционирование оливина и клинопироксена играло важную роль при образовании пород усть-семиной свиты и барангольского комплекса. Вариации содержания  $Al_2O_3$  с изменением  $Mg\#$  в клинопироксенах из пород усть-семиной свиты подтверждают то, что анкармиты являются наиболее примитивными, а диопсид-порфиновые базальты, вероятно, образовались в результате эволюции (фракционирования) анкармитового расплава в промежуточных камерах.

Можно предположить следующую модель формирования пород усть-семиной свиты и барангольского комплекса: исходный расплав для пород усть-семиной свиты и барангольского комплекса обладал высокими содержаниями (мас. %)  $MgO >14$  и  $CaO >12$ , и высоким отношением  $CaO/Al_2O_3 >1$ , то есть имел анкармитовый состав ( $Ol+Crx+Ct-Spl$ ). Этому составу, с некоторыми допущениями (оливин установлен в породах усть-семиной свиты по данным [Гибшер и др., 1997; Зыбин, 2006]), соответствуют вулканиты первой группы (анкармиты) усть-семиной свиты. Анкармитовый расплав образовался за счёт верлитизации надсубдукционной литосферной мантии

При подъёме вверх, в промежуточных камерах, при кристаллизации оливина, клинопироксена и хромита из этой магмы образуются породы интрузий Апшухтинского типа. Оценка температуры кристаллизации клинопироксена (по однопироксеновым термометру и барометру [Wang et al., 2021]) показывает диапазон температур 1090–1254 °C и давления не более 6 кбар для зёрен из пород Апшухтинского массива и ядер вкрапленников из вулканитов.

Формирование внешних зон кристаллов клинопироксена происходило из более фракционированного расплава при температурах 1026–1224 °C и давлениях не более 4,3 кбар в промежуточных камерах, либо при продвижении магмы к поверхности. Фракционная кристаллизация клинопироксена приводила к формированию магм, образовавших породы второй группы (диопсид-порфиновые базальты) усть-семиной свиты и габброиды барангольского комплекса, обогащённые плагиоклазом. На этом этапе температура снизилась до 755–946 °C, давление составляло в среднем 2–4 кбар (по амфиболовому термометру и барометру [Ridolfi, 2021]).

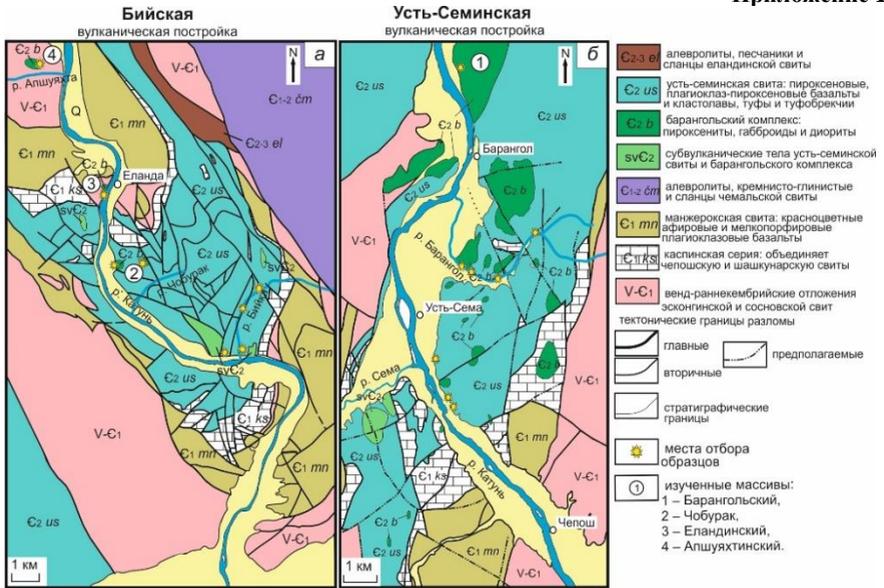
**Список публикаций автора по теме диссертации**Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Кхлиф Н.**, Вишнеvский А.В., Изох А.Э. Анкарамиты Горного Алтая: Минералого-петрографические и петрохимические особенности диопсид-порфировых базальтов усть-семиной свиты // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 3, с. 312 - 333.
2. **Khlif N.**, Vishnevskiy A.V., Chervyakovskaya M.V., Izokh A.E. Mineral Chemistry and Trace Element Composition of Clinopyroxenes from the Middle Cambrian Ust'-Sema Formation Ankaramites and Diopside Porphyry Basalts and the Related Barangol Complex Intrusions, Gorny Altai, Russia // Minerals, 2022, v. 12, 113.

Тезисы докладов

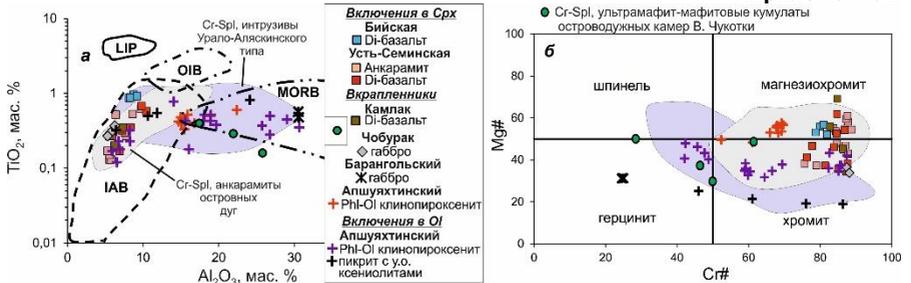
3. **Кхлиф Н.**, Вишнеvский А.В., Изох А.Э. Минералого-петрографические и петрохимические характеристики диопсидовых базальтов усть-семиной свиты Горного Алтая // IX Сибирская конференция молодых учёных по наукам о Земле: материалы конференции. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018, С. 290-292.
4. **Кхлиф Н.**, Вишнеvский А.В., Изох А.Э. Диопсидовые базальты усть-семиной свиты Горного Алтая: сопоставление состроводужными анкарамитами // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Выпуск 10. Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2018, С. 225-229.
5. Вишнеvский А.В., **Кхлиф Н.**, Зайцева М.В., Изох А.Э. Особенности состава вкрапленников диопсида из высококальциевых базальтов и анкарамитов Бийской вулканической постройки усть-семиной свиты: средний кембрий Горного Алтая // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Выпуск 10. Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2018, С. 60-62.

## Приложение 1



а – геологическая схема Бийской вулканической постройки усть-семинской свиты [Зыбин, 2006] с упрощениями, б – геологическая схема Усть-Семинской вулканической постройки усть-семинской свиты [Зыбин, 2006] с упрощениями.

## Приложение 2



Состав хромшпинели из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса.

а – вариации  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  в связи с геодинамической обстановкой [Kamenetsky et al., 2001] и б – классификация шпинелидов по [Schulze, 2001] для хромшпинели из пород усть-семинской свиты и барангольского комплекса. Поле состава хромшпинели из: анкармитов островных дуг [Della-Pasqua, 1997; Portnyagin et al., 2005; Zhang et al., 2008; Пушкарев и др., 2017] и интрузивов Урало-Аляскинского типа [Himmelberg, Loney 1995; Пушкарев, 2000; Khedr, Arai, 2016]. Состав хромшпинели из ультрамафит-мафитовых кумулатов островодужных магматических камер Восточной Чукотки по [Леднева и др., 2020]. IAB – базальты островных дуг; OIB – базальты океанических островов; MORB – базальты срединно-океанических хребтов; LIP – крупные магматические провинции.