

На правах рукописи



ШАПОВАЛОВА Мария Олеговна

**ПЕТРОЛОГИЯ И РУДОНОСНОСТЬ ГАББРОИДНЫХ ИНТРУЗИЙ  
ХАНГАЙСКОГО НАГОРЬЯ (ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ)**

1.6.3 – петрология, вулканология; 1.6.10 – геология, поиски и разведка  
твердых полезных ископаемых, минерагения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2021

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

Научные руководители:

**Толстых Надежда Дмитриевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск;

**Шелепаев Роман Аркадиевич**, 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:

**Медведев Александр Яковлевич**, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск);

**Орсоев Дмитрий Анатольевич**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (г. Москва).

Защита состоится 28 декабря 2021 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект 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» ноября 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.050.01,  
доктор геолого-минералогических наук

О.М. Туркина

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность исследования

Вопрос о мантийном магматизме, связанном с крупными изверженными провинциями (LIP) в складчатых областях является дискуссионным в современной геологической науке. Поэтому в качестве объектов исследований часто выбираются дифференцированные и расслоенные ультрамафит-мафитовые интрузии, с которыми связаны крупнейшие месторождения сульфидных медно-никелевых, хромитовых, титаномагнетитовых и платинометаллических руд [Naldrett, 2004; Maier, Ariskin, 2016; Latypov et al., 2017]. Большинство промышленных ЭПГ-Cu-Ni месторождений приурочено к ультрамафит-мафитам крупных изверженных провинций (LIP) [Abbott, Isley, 2002; Maier, 2005; Добрецов и др., 2010].

Район исследований находится на территории Хангайского нагорья в Центрально-Азиатском складчатом поясе (ЦАСП), где обнаружены ультрамафит-мафитовые расслоенные интрузии, которые находятся в пределах Хангайского батолита и обрамляющего его Селенго-Витимского вулканоплутонического пояса (СВВП) или в Северо-Монгольской рифтовой зоне [Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. Во всех габброидных интрузиях (Орцог-Ула, Дулан-Ула, Манхан-Ула, Ямат-Ула и Номгон), описанных в работе, выявлена сульфидная минерализация. В шлиховых ореолах массивов (Орцог-Ула и Номгон) обнаружены минералы платиновой группы (МПГ): сперилит, изоферроплатина и др., присутствие которых является индикатором потенциальной платиноносности их коренных источников [Толстых, Подлипский, 2010].

Предшествующие исследования [Кузьмин, Ярмолюк, 2014; Ярмолюк и др., 2016а] показали, что гранитный батолит, вмещающий исследуемые массивы, относится к Хангайской крупной изверженной провинции, образованной в результате действия плюма, с которым также может быть связано формирование родоначальных магм для исследуемых массивов.

Для установления закономерностей эволюции мантийного магматизма необходимо проводить комплексное исследование: установление геологической позиции и внутреннего строения ультрамафит-мафитовых массивов в ЦАСП, определение их возрастов, выявление составов мантийных источников и условий формирования этих массивов. В литературе предложено несколько типов геодинамических моделей, связанных как с тектоническими движениями литосферы, так и с активностью мантийных плюмов. До сих пор нет единого мнения о причинах и закономерностях проявления базитового магматизма в пределах регионов Центральной Азии. В связи с этим настоящее исследование является безусловно актуальным и вносит существенный вклад в решение научной проблемы эволюции мантийного магматизма в исследуемом регионе.

Объектами исследования являются перидотит-троктолит-габбровый массив Орцог-Ула, перидотит-габбровый массив Дулан-Ула, габброидный массив Манхан-Ула, габбро-монцогаббровый массив Ямат-Ула, и троктолит-анортозит-габбровый массив Номгон. Все они относятся к одной перидотит-пироксенит-

анортозит-габброноритовой формации, охарактеризованной А. Изохом и др., (1990).

**Цель исследования** – установить возраст, происхождение и металлогению габброидных массивов Хангайского нагорья на основе петрохимических, геохимических, минералогических и изотопно-геохронологических характеристик.

**Задачи исследования**

- определить или уточнить геологическую позицию габброидный массивов, установить характер их взаимоотношений с вмещающими породами, выделить фазы внедрения массивов;

- провести исследование вещественного составов, петрографии и минералогии пород и выявить петрохимические особенности массивов в целом и отдельных фаз внедрения, в частности;

- на основе редкоэлементного и изотопного состава пород определить характеристики мантийных источников магм и оценить генетические модели образования массивов;

- установить возраст массивов и отдельных фаз с помощью различных методов (U-Pb и Ar-Ar) датирования;

- на основе анализа геохимических, геологических, петрологических, геохронологических данных оценить геодинамическую природу габброидных пород Хангайского нагорья;

- выявить особенности сульфидной минерализации, оценить перспективность массивов на ЭПГ-Cu-Ni оруденение.

**Фактический материал**

Фактический материал получен автором во время экспедиционных работ 2014-2018 гг. в Западной Монголии. Для достижения поставленной цели использовались результаты геологического, геофизического, петрографического, минералогического, геохимического, изотопного и геохронологического исследования ультраосновных и основных пород, а также минералогические и геохимические анализы ЭПГ-Cu-Ni минерализации. В процессе работы автором была собрана коллекция из более чем 100 образцов, изучено 45 петрографических шлифов, 38 аншлифов и более 60 полированных прозрачных шлифов. Выполнено около 700 анализов состава минералов (породообразующих и рудных), 96 рентгено-флуоресцентных анализов (XRF) на содержание главных компонентов, 39 масс-спектрометрических анализов с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на содержание редких элементов и 27 на содержание рудных элементов (Cu, Ni, Co, Zn и S) и ЭПГ (Os, Ir, Ru, Rh, Pt и Pd). Для изотопно-геохимической характеристики использовано 5 определений изотопного состава Sm и Nd, выполнено 5 U-Pb (SHRIMP-II) определений возраста по цирконам и 3  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования по биотиту и роговой обманке. Дополнительно построена карта аномальных значений вектора магнитной индукции для одного из массивов.

**Защищаемые положения**

1. По данным U-Pb (циркон) и Ar-Ar (амфибол, биотит) датирования формирование габброидных массивов Хангайского нагорья произошло в пермское время (278-255 млн. лет).

2. Ранние и поздние фазы пермских полифазных ультрамафит-мафитовых массивов Хангайского нагорья (Орцог-Ула и Ямаг-Ула) отличаются по уровню содержания К, Ti, P и некогерентных элементов (HFSE и LILE), что обусловлено сменой мантийного источника с деплетированного на обогащенный.

3. Пермская потенциальная ЭПГ-Cu-Ni металлогеническая область в Хангайском нагорье представлена разновозрастными габброидными массивами с ЭПГ-Cu-Ni минерализацией. Формирование двух типов ассоциаций: халькопирит-пентландит-пирротиновой с преобладанием Pt-МПГ (Орцог-Ула) и борнит-кубанит-халькопиритовой с преобладанием Pd-МПГ (Номгон), обусловлено разной степенью фракционирования сульфидного расплава.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

Комплексное исследование пермских габброидных пород Хангайского нагорья в Западной Монголии выполнено впервые с применением современных геологических, петрологических, изотопно-геохимических методов. На основе совокупности полученных лично автором минералого-петрографических и геохимических методов проведена типизация пяти габброидных массивов. Выявлено многофазное строение отдельных массивов, и показаны различия между фазами, связанные с источниками их образования. Получены новые данные о возрасте массивов, обоснован пермский этап их становления в отличие от раннепалеозойского возраста, принятого в предшествующих работах [Хосбаяр и др., 1987; Изох и др., 1990]. Оценена продолжительность базитового магматизма на территории Хангайского нагорья в диапазоне ~278 – 255 млн. лет. Впервые описана ЭПГ-Cu-Ni минерализация исследованных габброидных массивов, определен их рудный потенциал, что позволило выделить пермскую металлогеническую область.

Полученные результаты могут быть использованы при корректировке схем магматизма Западной Монголии и реконструкции геологической истории формирования этого региона. Практическая значимость диссертационной работы также заключается в возможности использования полученных результатов для прогноза и поисков ЭПГ-Cu-Ni месторождений.

### **Апробация работы и публикации**

По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них 4 статьи в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Основные положения работы представлены в ходе очного участия на российских и международных конференциях.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения общим объемом 195 страниц. В ней содержится 60 рисунков, 36 таблиц (15 в тексте, 21 в приложении). Список литературы включает 200 наименований.

### **Благодарности**

Автор прежде всего выражает благодарность научным руководителям, д.г.-м.н. Н.Д. Толстых и к.г.-м.н. Р.А. Шелепаеву за руководство и постоянную поддержку при написании диссертации, а также сотрудникам лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций ИГМ им. В.С. Соболева СО

РАН: д.г.-м.н. А.Э. Изоху, к.г.-м.н. В.В. Егоровой, к.г.-м.н. В.М. Калугину, к.г.-м.н. М.Ю. Подлипскому, к.г.-м.н. Т.В. Светлицкой, М.В. Черданцевой, Я.Ю. Шелепову и Н.Б. Белкиной за ценные советы и практическую помощь в работе над фактическим материалом. Автор признателен всем аналитикам: А.Н. Ларионову (ГИИ ВСЕГЕИ), к.г.-м.н. П.А. Серову (ГИ КНЦ РАН), к.г.-м.н. Д.С. Юдину, к.х.н. И.В. Николаевой, О.С. Хмельниковой, М.В. Хлестову (ИГМ СО РАН), а также В.Н. Власовой, В.И. Ложкину, В.И. Меньшикову, Т.В. Ожогойной (ИГХ СО РАН).

Данная работа выполнена при финансовой поддержке базового проекта ИГМ СО РАН, грантов РФФИ (16-05-00980, 16-35-00100 и 19-35-90033), а также интеграционного проекта СО РАН «Карбон-пермо-триасовые гранитоидные батолиты и базит-ультрабазитовые комплексы южного обрамления Северо-Азиатского кратона: возрастные рубежи, численные модели формирования, металлогения». Глава 4 по ЭПГ-Cu-Ni минерализации габброидных массивов Хангайского нагорья выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 "Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России".

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели, задачи, объекты исследования и фактический материал, выносимые на защиту положения диссертационной работы, отражена научная новизна, практическая значимость, апробация результатов и личный вклад соискателя. В **главе 1** систематизированы литературные данные об истории изучения территории Хангайского нагорья, описана геотектоническая позиция габброидных массивов Хангайского нагорья в ЦАСП (**Приложение 1**). В этой главе рассмотрены критерии выбора объектов исследования. В **главе 2** приведен обзор аналитических методов, использованных в работе. В **главе 3** подробно описаны характеристики каждого массива: геологическое строение (**Приложение 2**), петраграфический, минералогический, петро- и геохимический состав пород (**Приложение 3, 4**), изотопные и геохронологические характеристики (**Приложение 5**). В **главе 4** описана сульфидная минерализация каждого массива (**Приложение 6, 7**) и дана оценка на перспективность ЭПГ-Cu-Ni орудинения Хангайского нагорья. В **главе 5** описаны обоснования защищаемых положений и продискутированы возможные модели образования батолитов, формированию которых предшествуют исследуемые габброиды.

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

**Первое защищаемое положение:** По данным U-Pb (циркон) и Ar-Ar (амфибол, биотит) датирования формирование габброидных массивов Хангайского нагорья произошло в пермское время (278-255 млн. лет).

На геологических картах Хангайского нагорья в более ранних исследованиях все ультрамафит-мафитовые интрузии отмечены раннепалеозойским возрастом [Хосбаяр и др., 1987; Изох и др., 1990]. Наши данные на основе согласованных датировок U-Pb и Ar-Ar методами опровергли предыдущие результаты, установив пермский возраст становления всех исследуемых массивов (Таблица 1, **Приложение 5**). Массив Орцог-Ула имеет возраст  $278.7 \pm 2.5$  млн лет (1 фаза,  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$ ) и  $272 \pm 2$  млн лет (2 фаза, U-Pb, SHRIMP-II), массив Ямат-Ула –  $255.8 \pm 2.9$  млн лет (1 фаза, U-Pb),  $262.6 \pm 3.1$  млн лет (2 фаза, U-Pb), массив Номгон –  $255 \pm 3$  млн лет (U-Pb),  $251.8 \pm 6.3$  млн лет ( $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$ ). Наши датировки массива Номгон совпадают с Sm-Nd изохронным возрастом ( $256 \pm 21$  млн лет) [Изохом и др., 1998] и соответствует перми, аналогично возрасту остальных исследуемых массивов.

Полученные датировки габброидных массивов попадают в следующий интервал времени: 278-255 млн. лет, что свидетельствует о синхронности образования габброидных массивов и Хангайского батолита (~270–240 млн лет) [Ярмолюк и др., 2019], и рассматривается в качестве его ранних фаз [Изох и др., 2010].

**Таблица 1.**

Возраст габброидов из массивов Хангайского нагорья

| № | Проба     | Массив    | Фаза | Метод        | Возраст            |
|---|-----------|-----------|------|--------------|--------------------|
| 1 | Ш20-15    | Орцог-Ула | 1    | Ar-Ar, Hbl   | $278 \pm 2.5$ Ma   |
| 2 | B13057    |           | 2    | U-Pb, циркон | $272 \pm 2$ Ma     |
| 3 |           |           |      | Ar-Ar, Bt    | $257 \pm 6.5$ Ma   |
| 4 | Ш220-14/2 | Ямат-Ула  | 1    | U-Pb, циркон | $255.8 \pm 2.9$ Ma |
| 5 | Ш105-14   |           | 2    | U-Pb, циркон | $262.6 \pm 3.1$ Ma |
| 6 | I4640*    | Номгон    |      | Sm-Nd        | $256 \pm 21$ Ma    |
| 7 | B13088    |           |      | U-Pb, циркон | $255 \pm 3$ Ma     |
| 8 |           |           |      | Ar-Ar, Bt    | $251.8 \pm 6.3$ Ma |

*Примечание:* \* - [Изох и др., 1998]. Ш20-15 - O1 мезогаббро; B13057 - O1 мезогаббро; Ш220-14/2 - анортозит; Ш105-14 - Bt-Hbl мезогаббро; I4640 - габбронорит; B13088 – Bt-содержащее O1 габбро.

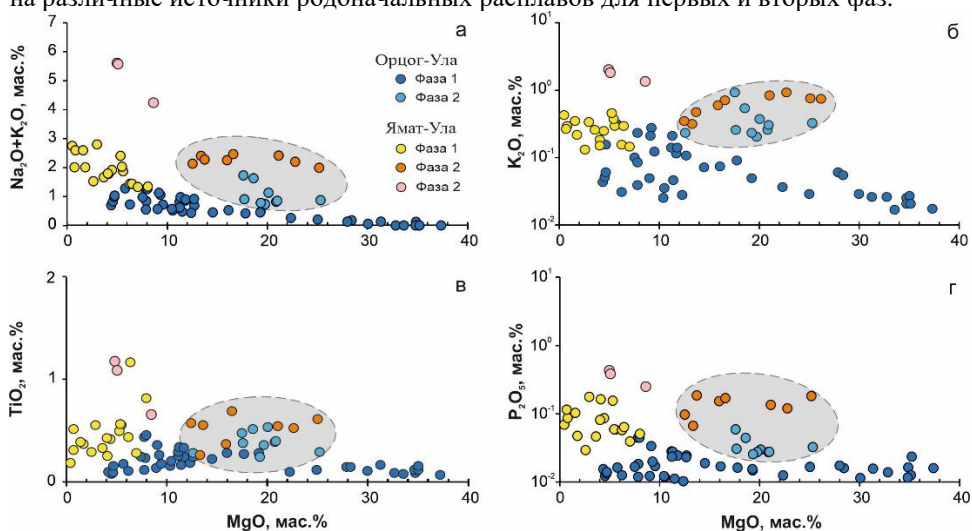
**Второе защищаемое положение:** *Ранние и поздние фазы пермских полифазных ультрамафит-мафитовых массивов Хангайского нагорья (Орцог-Ула и Ямат-Ула) отличаются по уровню содержания K, Ti, P и некогерентных элементов (HFSE и LILE), что обусловлено сменой мантийного источника с деплетированного на обогащенный.*

Среди всех изученных массивов Дулан-Ула, Манхан-Ула и Номгон являются монофазными, представленными расслоенной серией пород, тогда как

массивы Орцог-Ула и Ямат-Ула являются полифазными. Для массива Орцог-Ула установлено две фазы внедрения: 1) ритмично-расслоенная перидотит-троктолит-габброноритовая серия пород (без биотита); 2) биотит-содержащие амфибол-оливиновые габброиды со слабыми вариациями меланократовости. Массив Ямат-Ула состоит из трех фаз: 1) ранние ритмично-расслоенные лейкогаббро и анортозиты без биотита, 2) более поздние массивные амфибол- и биотитсодержащие оливиновые мезогаббронориты, 3) оливиновые монцогаббро.

В поздних фазах массивов присутствует первичный магматический биотит (Vt) с высокими содержаниями  $TiO_2$  (3,1-3,6 мас.%), который отсутствует в ранних фазах. Фазы отличаются трендами фракционирования: для пород ранних фаз массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула характерен OI-P1 тренд фракционирования, тогда как для пород поздних фаз – Орх-P1 тренд (**Приложение 3**).

В первых фазах массивов (**Рис. 1**) содержания  $MgO$  варьируют в широких пределах: от 4 до 38 мас. % для массива Орцог-Ула, и от 0,5 до 8 мас. % для массива Ямат-Ула (в лейкократовой части) при низких содержаниях  $K_2O$  (0,03-0,14 и 0,12-0,42 мас.%, соответственно). Тогда как, породы поздних фаз при имеющихся высоких значениях  $MgO$ : 12,59-25,27 мас.% (Орцог-Ула) и 12,54-25,17 мас.% (Ямат-Ула) обогащены  $K_2O$  (0,20-0,87 и 0,30-0,85 мас.%, соответственно). Такая же закономерность наблюдается по  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$  и сумме щелочей ( $Na_2O+K_2O$ ). Таким образом, породы вторых фаз массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула содержат повышенные концентрации некогерентных элементов, особенно щелочей, при высоких содержаниях магния. Это свидетельствует о том, что породы разных фаз не могут являться продуктами фракционирования единого расплава, что указывает на различные источники родоначальных расплавов для первых и вторых фаз.



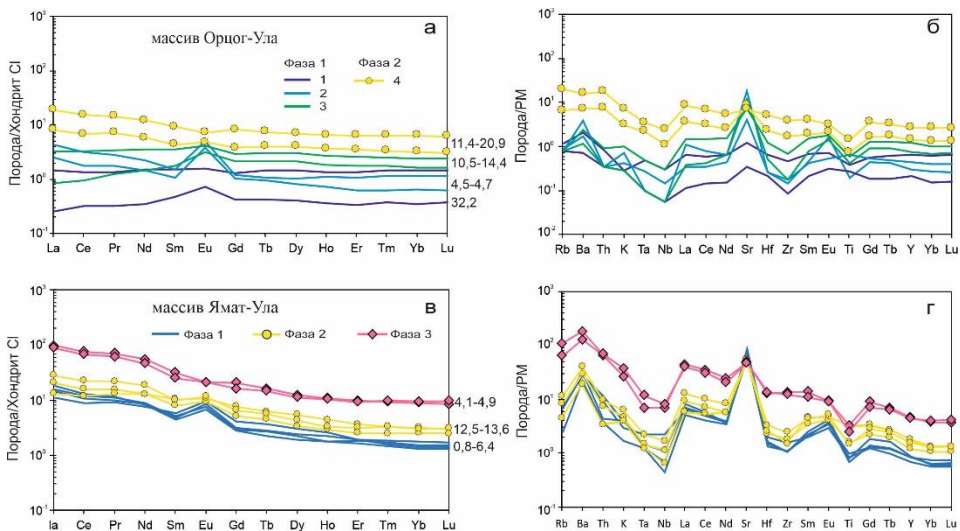
**Рисунок 1.** Содержание ( $Na_2O + K_2O$ ) (а),  $K_2O$  (б),  $TiO_2$  (в),  $P_2O_5$  (г) относительно  $MgO$  в первой и второй фазах полифазных массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула.



Если предположить, что образование разных фаз происходило за счет последовательного внедрения порций все более фракционированного расплава из одной камеры, то следовало бы ожидать обратную корреляцию MgO и щелочей [Богатиков и др., 1987], т.е. при увеличении  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  должно было бы происходить уменьшение содержания MgO для поздних фаз массивов, что не согласуется с полученными результатами (**Рис. 1**). Следовательно, родоначальные расплавы генерированы из различных мантийных источников.

Породы первых фаз массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула характеризуются Eu максимумом на спектрах РЗЭ (**Рис. 2 а,в**), деплетированностью HFSE (Ta, Nb, Zr, Hf) и обогащенностью LILE (Ba, K) (**Рис. 2 б,г**), в связи с чем обладают типоморфными признаками, характерными для базитовых магм надсубдукционного происхождения [Изох и др., 2005].

На графиках распределения REE (**Рис. 2 а,в**) породы второй фазы массивов отличаются от первой: они имеют высокую магнезиальность (концентрация MgO соответствует интервалам 11,4-20,9 и 12,5-13,6 для пород массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула, соответственно), тогда как породы первой фазы массивов имеют более низкую, либо сопоставимую магнезиальность (концентрация MgO – 4,5-14,4 и 0,8-6,4, соответственно). Эти данные также свидетельствуют о невозможности образования пород разных фаз в результате внедрения в разной степени фракционированных расплавов из одной камеры.



**Рисунок 2.** Спектры распределения REE (а, в) нормированные на хондрит CI [Boynnton, 1984] и мультиэлементные спектры (б, г), нормированные на состав примитивной мантии [McDonough et al., 1992] для разных фаз массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула.

1 – перидотиты; 2 – габбронориты; 3 – ОI габбро; 4 – Вт-содержащее ОI мезогаббро. Числами на графиках (а, в) показаны содержания MgO в породах.

На мультиэлементных спектрах массива Орцог-Ула (**Рис. 2 б**) наблюдается обогащенность пород второй фазы редкими элементами относительно пород первой фазы, за исключением Sr. Высокие значения Sr в первой фазе связаны со значительным количеством плагиоклаза, который также обуславливает высокий уровень Eu. В массиве Орцог-Ула при близких значениях магнезиальности в обеих фазах, в породах второй из них отмечаются повышенные содержания REE по сравнению с породами первой фазы; для массива Ямат-Ула (учитывая, что первая фаза состоит только из лейкократовых пород) увеличиваются содержания REE во второй и третьей фазах.

Породы поздних фаз массивов Орцог-Ула (вторая) и Ямат-Ула (вторая и третья) заметно обогащены всеми редкими элементами, в том числе REE, а также высокотитанистыми разновидностями амфибола и биотита, из чего можно предположить более обогащенный мантийный источник для этих пород, связанный, возможно, с действием мантийного плюма [Hofmann, 1997; Sun, McDonough, 1989].

Анализ изотопно-геохимических Sm-Nd данных по полифазным массивам показал, что расслоенные габброиды и перидотиты, относящиеся к первой фазе, имеют высокие положительные значения  $\epsilon Nd$  (260 Ma) +13.5 для массива Орцог-Ула, и +11.4 для массива Ямат-Ула. Тогда как биотит-содержащие габброиды второй фазы имеют отрицательные или невысокие положительные значения (- 3,6 и +1,8, соответственно для массивов Орцог-Ула и Ямат-Ула).

Данные по изотопии также подтверждают невозможность последовательной кристаллизации пород обеих фаз путем их фракционирования из одного расплава, т.к. по данным [Vrevsky et al., 1996; Polat et al., 1999] породы с таким отличием в значениях  $\epsilon Nd$  образуются из различных (возможно, разноглубинных) мантийных источников. Поскольку поздние фазы характеризуется более высокими концентрациями  $TiO_2$ , щелочей, и имеют отрицательное или наиболее низкое значение  $\epsilon Nd$ , то она является производной обогащенного мантийного источника в противоположность ранним фазам, которые имели деплетированный источник.

Если предположить, что обогащение пород второй фазы некогерентными элементами было вызвано коровой контаминацией расплава, то при увеличении  $K_2O$ ,  $TiO_2$  и  $P_2O_5$  происходило бы уменьшение концентрации  $MgO$ , чего не наблюдается. Отсутствие контаминации также подтверждается тем, что все цирконы, выбранные из оливинового мезогаббро второй фазы массива Орцог-Ула (B13057) и Вт-НЫ1-мезогаббро второй фазы массива Ямат-Ула (Ш105-14) оказались пермского возраста (**Приложение 5**), среди них не выявлено древних, что подтверждает отсутствие захвата пород коры расплавом. Все это свидетельствует о существовании двух мантийных источников: из деплетированного источника поступил расплав для образования пород первой фазы, тогда как из обогащенного источника поступал расплав для образования пород второй фазы.

**Третье защищаемое положение:** *Пермская потенциальная ЭПГ-Cu-Ni металлогеническая область в Хангайском нагорье представлена одновозрастными габброидными массивами с ЭПГ-Cu-Ni минерализацией. Формирование двух типов ассоциаций: халькопирит-пентландит-пирротиновой с преобладанием Pt-МПГ (Орцог-Ула) и борнит-кубанит-халькопиритовой с преобладанием Pd-МПГ (Номгон), обусловлено разной степенью фракционирования сульфидного расплава.*

Во всех массивах обнаружена сульфидная минерализация, представленная двумя ассоциациями (**Приложение 6**): халькопирит-пентландит-пирротиновая (Орцог-Ула, Дулан-Ула, Ямат-Ула) и кубанит-борнит-халькопиритовая (Номгон). Для массива Манхан-Ула характерна промежуточная ассоциация. Сульфиды массивов Дулан-Ула и Манхан-Ула представлены редкой рассеянной интерстиционной вкрапленностью, тогда как в массивах Орцог-Ула, Ямат-Ула и Номгон распространена вкрапленная сульфидная минерализация, включая сульфидные капли (глобулы). Степень фракционирования силикатных расплавов согласуется со степенью фракционирования сульфидных расплавов. Вероятно, что общая эволюция расплавов происходила в промежуточной магматической камере, поскольку к месту внедрения они (силикатный расплав с каплями сульфидной жидкости) поступали уже с определенной геохимической специализацией.

Для каждой ассоциации были изучены составы сульфидов [Shapovalova et al., 2020]. Выявлено, что в ходе кристаллизации пород происходило фракционирование сульфидного расплава, которое выражается в последовательном изменении минеральных парагенезисов с увеличением доли халькопиритовой составляющей и изменении составов основных сульфидов в сторону увеличения S в пирротине и Ni и Co в пентландите. Этот тренд обусловлен увеличением фугитивности серы ( $lgf_{S_2}$ ) и обогащением сульфидных расплавов медью в ходе развития рудоформирующей системы [Mirsa, Fleet, 1973; Дистлер и др., 1977; Колонин и др., 2000; Makovicky, 2002].

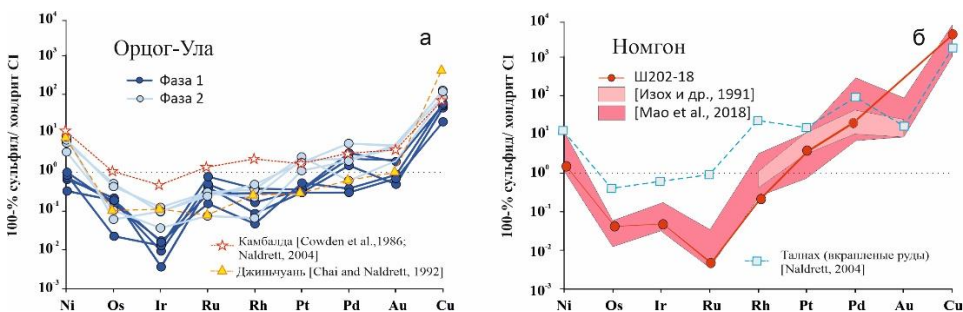
В исследованных образцах массива Орцог-Ула (фаза 2) среди минералов элементов платиновой группы выявлены сперрилит  $PtAs_2$ , брэггит  $(Pt,Pd,Ni)S$ , изоферроплатина  $Pt_3Fe$ , тогда как МПГ в массиве Номгон представлены сперрилитом и палладиевыми соединениями: мертиитом  $Pd_8(Sb,As)_3$ , маякитом  $PdNiAs$ , котульскитом  $Pd(Bi,Te)$ , кейтконнитом  $Pd_3Te$ , меренскитом  $Pd(Bi,Te)_2$  и майченеритом  $PdBiTe$  [Изох и др., 1991; Shapovalova et al., 2020] (**Приложение 7**). Таким образом, минералы Pt характерны для вкрапленной халькопирит-пентландит-пирротиновой ассоциации массива Орцог-Ула, тогда как минералы Pd преобладают над минералами Pd в кубанит-борнит-халькопиритовой ассоциации массива Номгон. Эта закономерность согласуется с положительной корреляцией отношений Cu/Ni к Pd/Pt обусловленной фракционированием сульфидного расплава [Naldrett, 2004, Лихачев, 2006].

Пермские массивы Хангайского нагорья имеют одинаковую по типоморфным особенностям сульфидную минерализацию, однотипно проявленные тренды фракционирования, одновозрастные датировки и находятся на единой территории (Хангайское нагорье). По сопоставимости этих типоморфных

признаков была обоснована пермская потенциально-рудноносная металлогеническая область, по аналогии с принципами обоснования Восточно-Сибирской металлогенической провинции [Поляков и др., 2013].

Отношения суммы легкоплавких платиноидов к тугоплавким  $(Pt+Pd)/(Ru+Ir+Os)$  (K) и Ni/Cu отношения в рудах определяются степенью фракционирования сульфидного расплава. Для ультрамафитовых интрузий характерны, как правило, низкие значения K и отношения Ni/Cu более 7: в рудах Камбалды (Западная Австралия)  $K=2.1$ , а  $Ni/Cu = 13.8$  [Cowden et al., 1986; Naldrett, 2004], в рудах Томпсон (Канада) ( $K = 4.4$ ,  $Ni/Cu=21.6$  [Naldrett, 2004]). Тогда как в мафитовых интрузиях отмечаются более высокие значения K и отношения Ni/Cu менее 2: на Талнахе  $K=59$ ,  $Ni/Cu=0.7$  во вкрапленных рудах такситовых габбро-долеритов [Naldrett, 2004], на Джинчуань  $K = 7.7-14.8$ ,  $Ni/Cu=1.4$  [Chai and Naldrett, 1992].

Полученные данные показывают, что породы первой фазы массива Орцог-Ула по индексу K сопоставимы с ультрамафитовым месторождением Камбалда, а породы второй фазы близки к характеристикам руд в мафитовом месторождении Джинчуань, западный Китай (Рис. 3а). Рисунок 3 б демонстрирует близкую степень фракционирования сульфидного расплава массива Номгон и вкрапленных руд месторождения Талнах, но с более крутым наклоном кривой, который обусловлен более низкими содержаниями IPGE в породах массива Номгон. Таким образом, сульфидная минерализация массива Орцог-Ула формировались из слабо фракционированного расплава ( $K = 0.9-4.6$  – первая фаза внедрения, и  $K = 5.2-16.3$  – вторая фаза) по сравнению с массивом Номгон, степень фракционирования которого гораздо выше ( $K = 7.9- 69. 3$ ) и соответствует эталонным мафитовым интрузиям. Можно отметить, что сульфидный расплав, сосуществующий с силикатным, поступающим из обогащенного источника, является более фракционированным (K до 16, 3).



**Рисунок 3.** Графики распределения рудных элементов в 100% сульфидной фазе относительно хондрита C1 в породах массивов Хангайского нагорья (Орцог-Ула и Номгон) в сравнении с рудами других известных ультрамафитовых (Камбалда) и мафитовых (Талнах, Джиньчуань) месторождений (а, б).

В связи с высокой степенью фракционирования сульфидного расплава Номгон имеет больший потенциал для образования ЭПГ-содержащих руд, поскольку платиноиды накапливаются в остаточных, обогащенных медью расплавах [Naldrett, 2010]. Это согласуется с тем, что содержания ЭПГ в массиве Номгон преобладают над их содержаниями в других массивах.

По отношениям Ni/Cu (1.30-3.96) руды массива Орцог-Ула сопоставимы с характеристиками месторождения Джинчуань [Chai and Naldrett, 1992], и с другими месторождениями северо-западного Китая [Qin et al., 2012; Mao et al., 2018]. Тогда как руды массива Номгон по отношениям Ni/Cu (0.03-0.08) близки к вкрапленным рудам из такситовых габбро-долеритов месторождения Норильск-1 [Naldrett, 2004; Tolstykh et al., 2020].

Различная степень фракционирования сульфидного расплава наглядно представлена на графике (Рис. 4) и обусловлена положительной корреляцией или совместным обогащением расплава медью и PPGЕ. Сульфидный расплав фракционирует с обогащением платиноидов в массивах Орцог-Ула и Номгон, достигая высоких значений, обуславливающих формирование ЭПГ минерализации, которая и была обнаружена в этих массивах. Тогда как в остальных массивах такая корреляция не обнаруживается: с увеличением меди платиноиды не накапливаются. В связи с чем, например в массиве Ямат-Ула появляется борнит-кубанит-халькопиритовая ассоциация сульфидов, но не выявлены МПП, как в массиве Номгон. Диаграмма также показывает более высокую степень фракционирования у массива Номгон, чем у массива Орцог-Ула.

Можно предположить, что в незэродированных частях массивов Орцог-Ула и Номгон имеются скопления сегрегированных сульфидов, обогащенных ЭПГ. В таком случае, эти массивы можно рассматривать как перспективные на высокое содержание платиноидов. Подтверждением этому являются непосредственные находки МПП в коренных рудах и шлиховых ореолах.

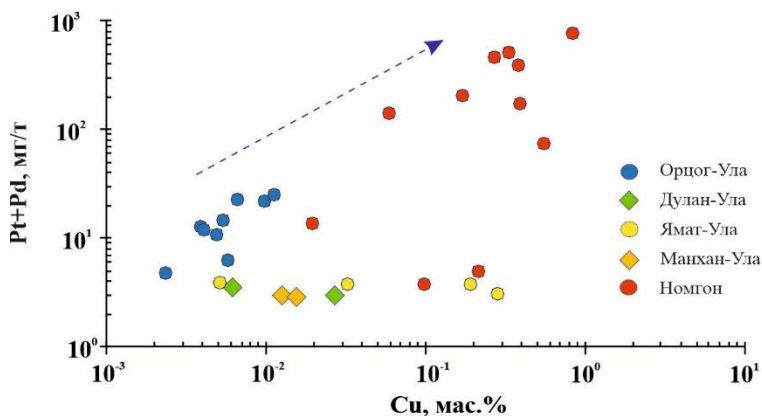


Рисунок. 4. Диаграмма Pt+Pd относительно Cu в сульфидсодержащих породах массивов Хангайского нагорья.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Новые изотопно-геохронологические данные свидетельствуют о пермском (255-278 млн лет) возрасте габброидных массивов Хангайского нагорья: Орцог-Ула (272-278 млн лет), Ямат-Ула (256-262 млн лет 2), Номгон (255 млн лет). Эти датировки опровергают ранее установленный раннепалеозойский возраст базитовых интрузий Хангайского региона, которые синхронны с формированием ранних фаз Хангайского батолита.

2. Выявлено, что ранние и поздние фазы пермских полифазных массивов отличаются по породообразующим минералам (в поздних фазах присутствуют магматические высокотитанистые амфибол и биотит), по уровню обогащения некогерентными элементами (K, Ti, P, LREE), по редкоэлементному составу (степени деплетированности HFSE и LILE), что обусловлено сменой мантийного источника с деплетированного на обогащенный при формировании полифазных массивов. Для пород разных фаз получены резко отличающиеся значения  $\epsilon Nd$ , отвечающие деплетированному и обогащенному мантийным источникам.

3. Установлено, что все изученные пермские массивы имеют Cu-Ni вкрапленную минерализацию с разной геохимической специализацией. Выявлены и описаны халькопирит-пентландит-пирротиновая и борнит-кубанит-халькопиритовая ассоциации, специализация которых зависит от степени фракционирования сульфидного расплава. В каждой из магматических камер происходило фракционирование сульфидного расплава, которое обусловило последовательное изменение минеральных парагенезисов, связанное с увеличением доли халькопиритовой составляющей и изменении составов основных сульфидов в рудоформирующей системе (с увеличением концентраций S в пирротине и Ni и Co в пентландите).

4. Пермские габброидные массивы Хангайского нагорья отличаются степенью фракционирования сульфидного расплава, изначально обогащенного Cu, Ni и платиноидами, и относятся к Хангайской LIP. Массивы Орцог-Ула и Номгон являются рудоносными, поэтому в рамках проведенной работы на территории Хангайского нагорья можно выделить новую потенциальную металогеническую область.

5. В сфере тектоники и геодинамики исследуемого района существует много дискуссионных вопросов. На основе петролого-геохимических особенностей пород можно обоснованно принять модель взаимодействия пермского мантийного плюма и раннепалеозойской надсубдукционной литосферы, в результате которого были образованы исходные расплавы для формирования исследованных массивов Хангайского нагорья, имеющих двойственные геохимические метки. Однозначно принята гипотеза, что базитовые магмы, ответственные за формирование пермских габброидных массивов, являлись источником тепла для образования Хангайского батолита.

## Список научных трудов по теме диссертации

### Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Шаповалова М.О.**, Толстых Н.Д., Шелепаев Р.А., Цибизов Л.В. Петрология и геохронология перидотит-троктолит-габбрового массива Орцог-Ула, Западная Монголия // Геология и геофизика, 2019, т. 60, № 8, с. 1069-1090.
2. **Shapovalova M.**, Tolstykh N., Shelepaev R., Kalugin V. PGE-Cu-Ni Mineralization of Mafic-Ultramafic Massifs of the Khangai Upland, Western Mongolia // Minerals, 2020, v. 10, p. 942.
3. Tolstykh N.D., Zhitova L.M., **Shapovalova M.O.**, Chayka I.F. The evolution of the ore-forming system in the low sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia // Mineralogical Magazine, 2019, pp. 1–22.
4. Tolstykh N.D., Krivolutskaya N.A., Safonova I.Yu., **Shapovalova M.O.**, Zhitova L.M., Abersteiner A. Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // Ore Geology Reviews, 2020, pp. 1-23.

### Избранные тезисы докладов:

1. **Shapovalova M.**, Shelepaev R., Tolstykh N., Kalugin V., Safonova I. Petrology of the Ortsog-Uul Gabbro-Petidotite PGE-Bearing complex, Western Mongolia // 13th SGA Biennial Meeting Nancy-France, 2015, v. 3, pp. 983–985.
2. **Шаповалова М.О.**, Шелепаев Р.А., Толстых Н.Д. Калугин В.М. Вещественный состав перидотит-габбрового массива Орцог-Ула и связанного с ним Cu-Ni-ЭПГ оруденения (Западная Монголия) // Материалы XXVII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова: Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северо-Запада России, 2016, с. 42–45.
3. **Шаповалова М.О.**, Шелепаев Р.А., Толстых Н.Д. Минералого-геохимические особенности перидотит-габбрового массива Орцог-Ула (Западная Монголия) // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017, с. 833–836.
4. **Shapovalova M.**, Tolstykh N., Shelepaev R. Concentration of PGE, Ni, Cu and Au in the Ortsog-Uul intrusion (Western Mongolia) // Goldschmidt Conference, Paris, France, 2017.
5. **Шаповалова М.О.**, Толстых Н.Д., Шелепаев Р.А. Петрология перидотит-габбрового массива Орцог-Ула, Западная Монголия // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Выпуск 9. Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием: Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017, с. 455–460.
6. **Shapovalova M.**, Tolstykh N., Shelepaev R., Cherdantseva M. Petrology of Ortsog-Uul peridotite-gabbro massif in Western Mongolia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ, 2018.
7. **Шаповалова М.О.**, Толстых Н.Д., Подлипский М.Ю., Шелепаев Р.А., Калугин В.М. Рудоносность перидотит-габбрового массива Орцог-Ула (Западная Монголия)

// Корреляция алтаид и уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения. Материалы Четвертой международной научной конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018, с. 166-167.

8. **Шаповалова М.О.,** Шелепаев Р.А., Толстых Н.Д. Габброидные массивы как тепловой источник Хангайского батолита // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018, с. 694-696.

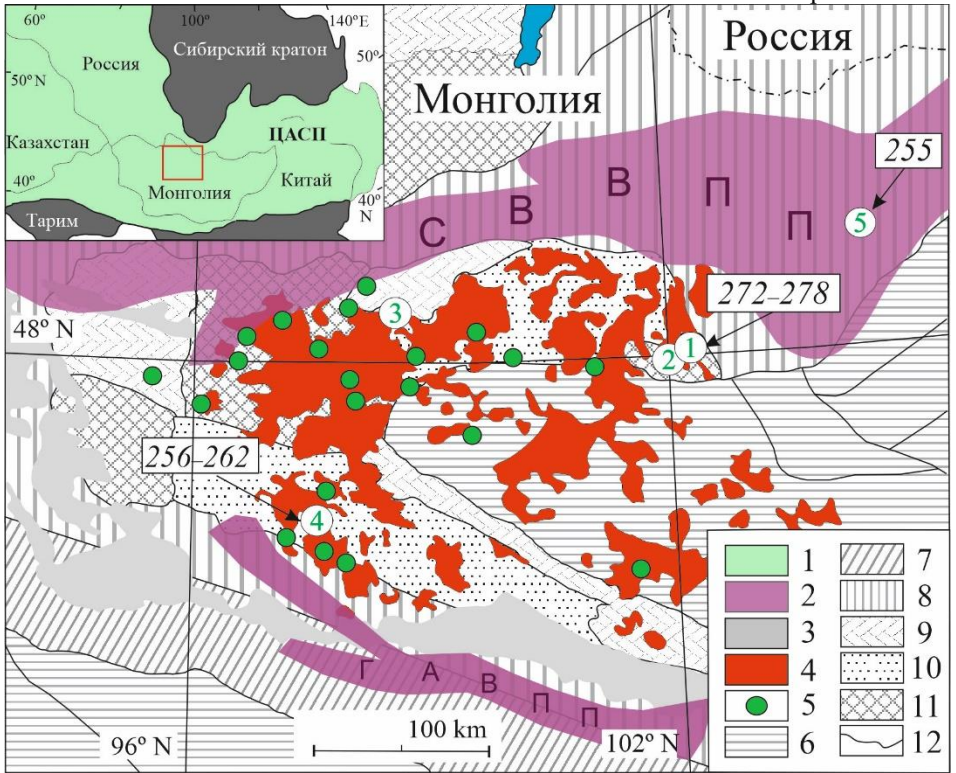
9. **Шаповалова М.О.,** Шелепаев Р.А., Толстых Н.Д., Изох А.Э. Габброидные интрузии Хангайского нагорья, как результат взаимодействия мантийного плюма с литосферной мантией // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Выпуск 10. Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2018, с. 428-432.

10. **Шаповалова М.О.,** Толстых Н.Д., Шелепаев Р.А. Cu-Ni-ЭПГ минерализация перидотит-габбрового массива Орцог-Ула, Западная Монголия // Рудно-магматические системы. Магматизм, металлогения и тектоника Северной Азии. Сборник научных трудов по фундаментальным исследованиям Института геологии и минералогии СО РАН. Выпуск 1. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2018, с. 44-55.

11. **Shapovalova M.,** Shelepaev R., Tolstykh N. Petrological characteristics of mafic-ultramafic intrusions of the Khangay upland (Mongolia) // Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting, Glasgow, Scotland, 2019, v. 2, pp. 561-564.

12. **Shapovalova M.,** Tolstykh N., Shelepaev R. Cu-Ni-PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusions of the Khangay upland (Mongolia) // Large Igneous Provinces through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues. Abstract volume of the 7 International Conference. Tomsk: CSTI publishing house, 2019, pp. 124-126.

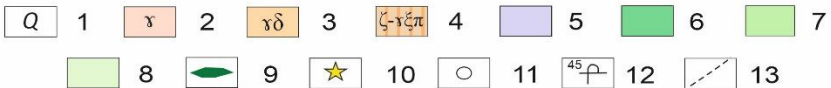
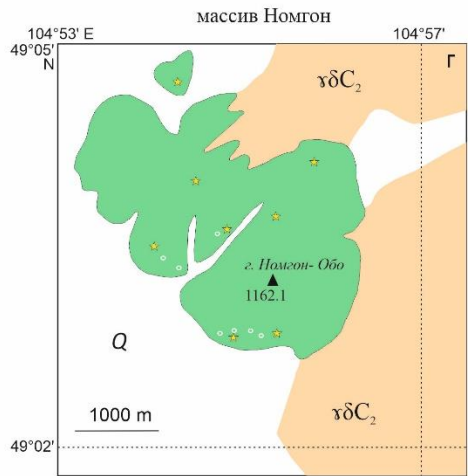
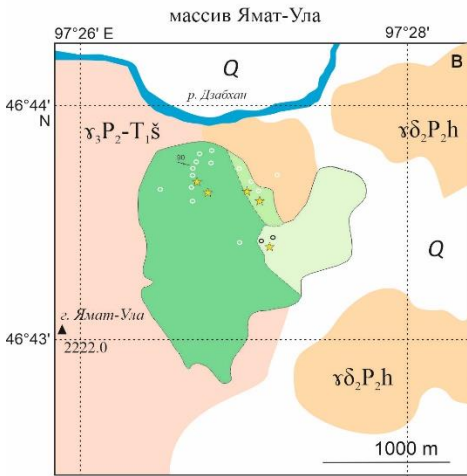
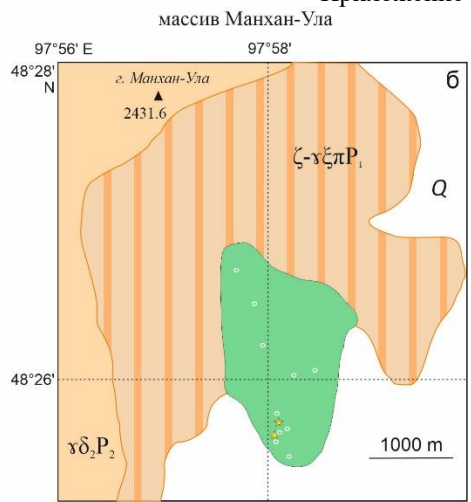
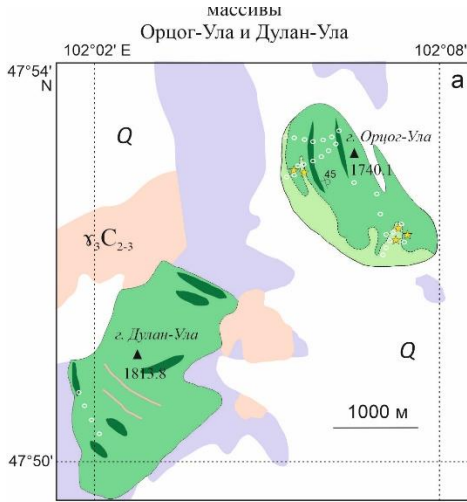




Положение изученных габброидных массивов в структурах Хангайского региона. Структуры ЦАСП по [Сальникова и др., 2014], гранитоиды Хангайского батолита и вулканоплутонические пояса по [Ярмлюк и др., 20136].

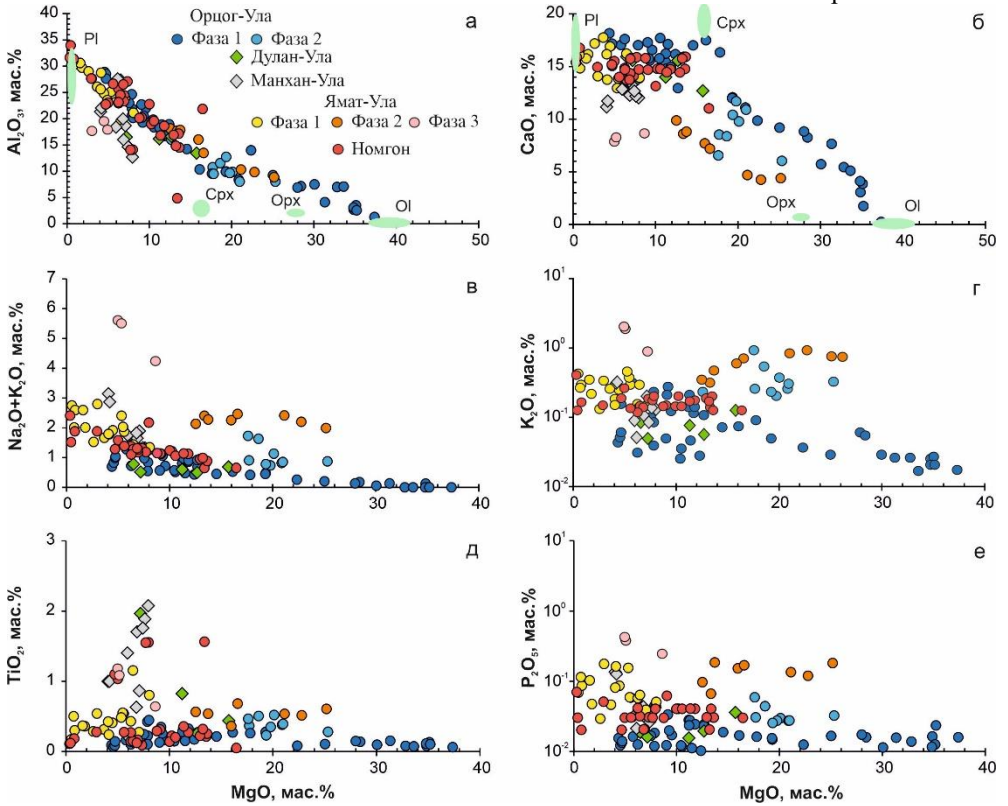
Условные обозначения: 1 – Центрально-Азиатский складчатый пояс (ЦАСП); 2 – вулканоплутонический пояс; 3 – мезозойские–кайнозойские впадины; 4 – позднепалеозойские гранитоиды нормальной щелочности Хангайского батолита; 5 – пермские габброиды Хангайского нагорья; 6–9 – складчатые области: 6 – средне позднепалеозойские (герциниды), 7 – ранне- среднепалеозойские (поздние каледониды), 8 – венд раннепалеозойские (ранние каледониды), 9 – неопротерозойские; 10 – тектонические блоки с раннедокембрийским фундаментом; 11 – тектонические блоки с довендским складчатым фундаментом (нерасчлененным); 12 – разломы.

Цифрами указаны изученные габброидные массивы перми: 1 – Орцог-Ула; 2 – Дулан-Ула; 3 – Манхан-Ула; 4 – Ямат-Ула; 5 – Номгон. СВВП – Селенгино-Витимский вулканоплутонический пояс, ГАВП – Гоби-Алтайский вулканоплутонический пояс.

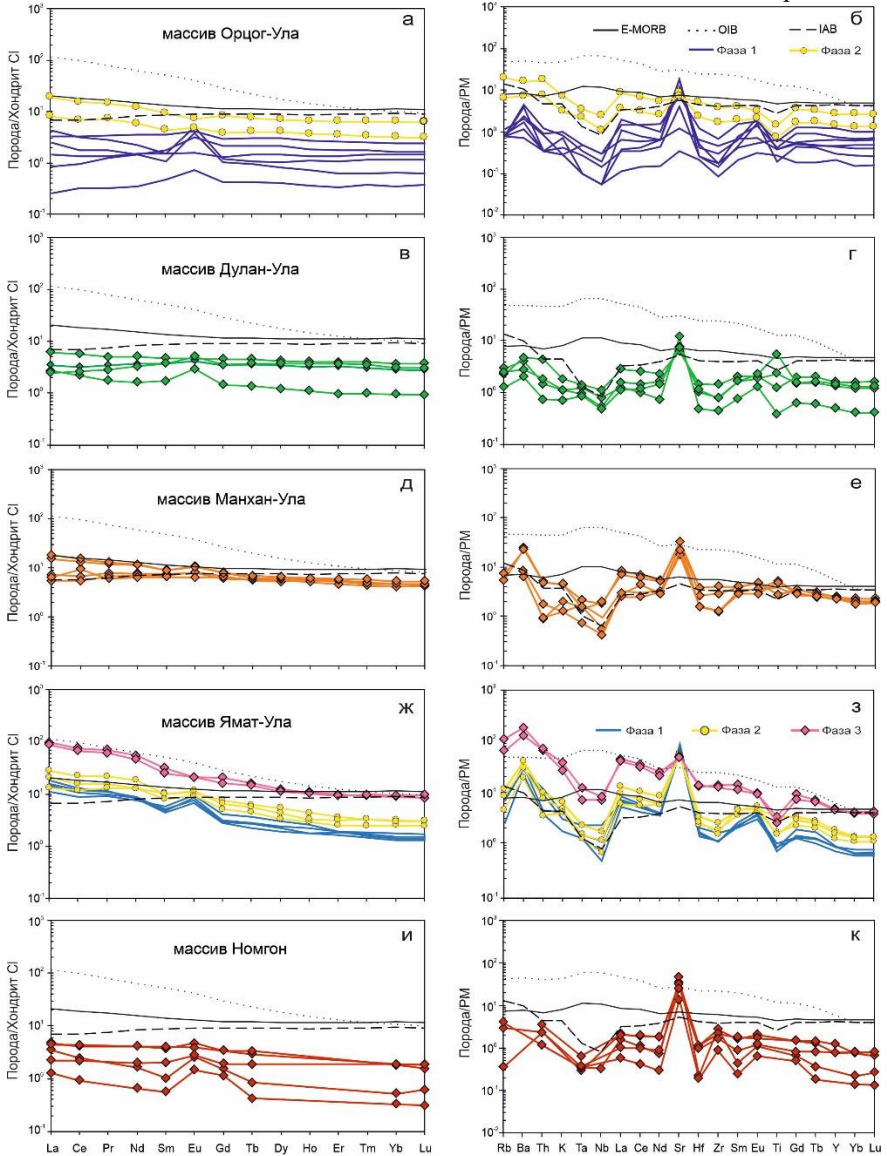


Геологические схемы строения габброидных массивов Хангайского нагорья: а) Орцог-Ула и Дулан-Ула; б) Манхан-Ула; в) Ямат-Ула; г) Номгон.

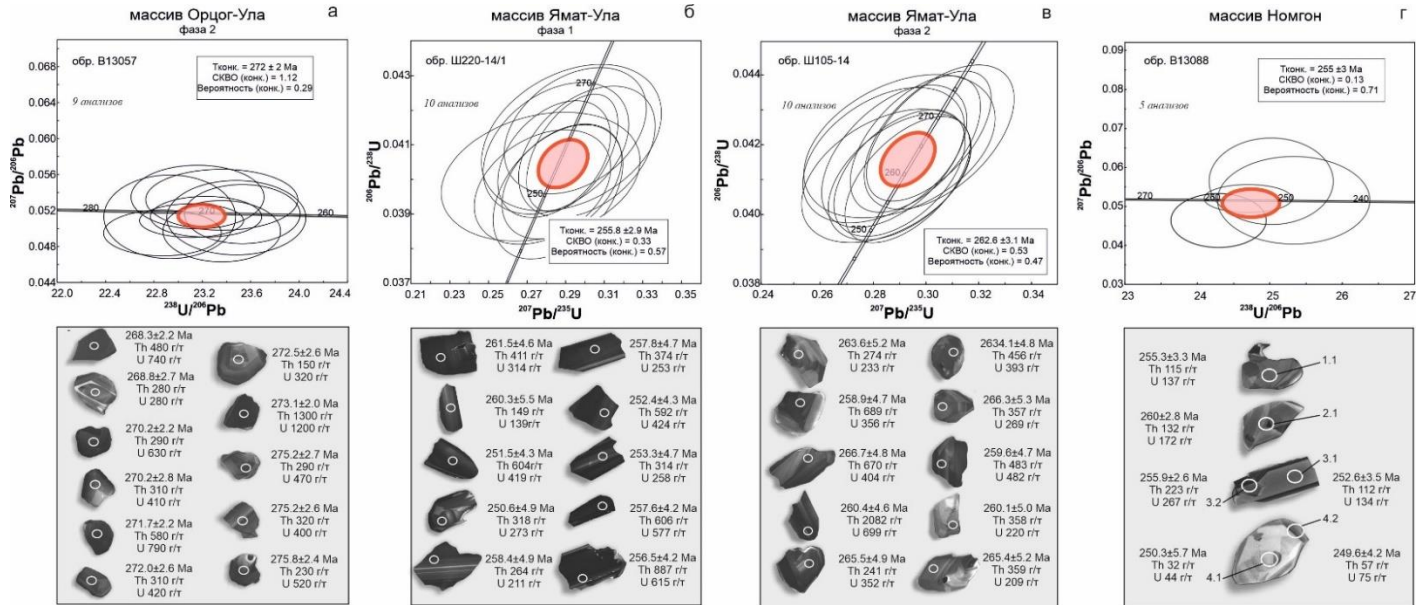
Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – граниты, гранитный дайки и граносиениты; 3 – гранодиориты и монцодиориты; 4 – субвулканические образования: дациты и граносиенит-порфиры; 5 – кристаллические гнейсы и сланцы; 6 – габброиды первых фаз; 7 – габброиды вторых фаз; 8 – монцогаббро третьей фазы массива Ямат-Ула; 9 – ультраосновные породы; 10 – пробы с сульфидной минерализацией; 11 – точки отбора проб; 12 – элементы залегания пород; 13 – граница между фазами.



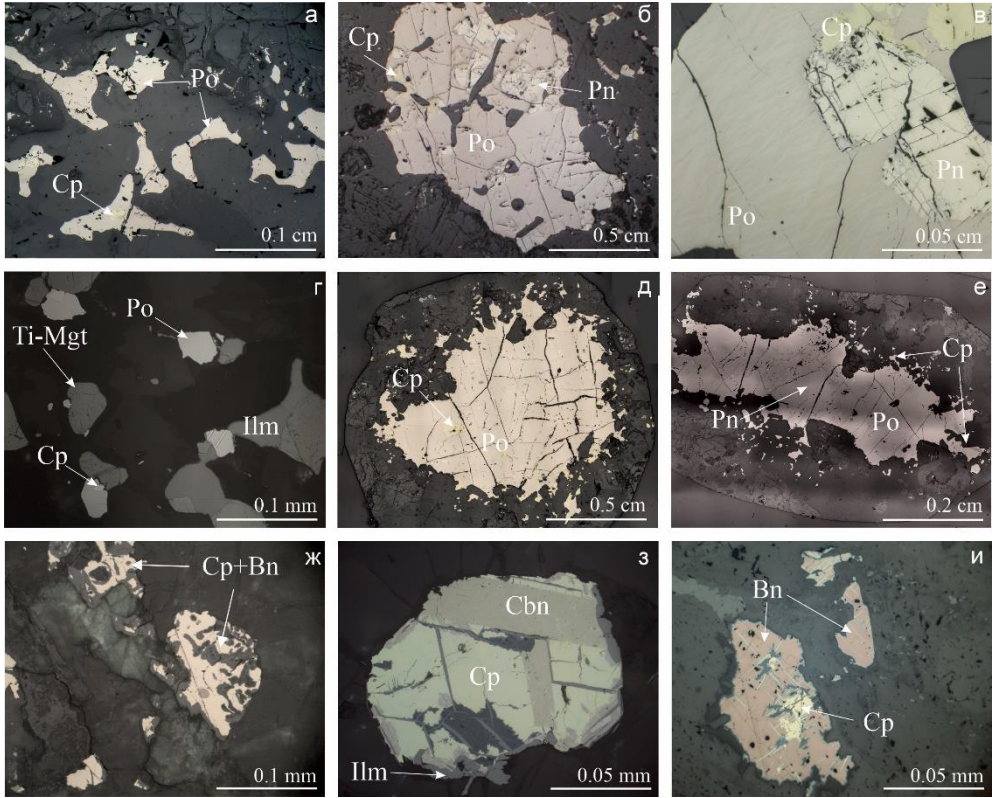
Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а), CaO (б), (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) (в), K<sub>2</sub>O (г), TiO<sub>2</sub> (д), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (е) относительно MgO в породах массивов Хангайского нагорья. Вещественный состав пород массива Номгон взят из [Изох и др., 1998]. На диаграммах вынесены составы Ol, Pl, Орх и Сpx в виде областей, поскольку минералы варьируют по составу.



Спектры распределения РЗЭ (слева), нормированные на состав хондрита  $C_i$  [Boynnton, 1984] и мультиэлементные спектры (справа), нормированные на состав примитивной мантии [McDonough et al., 1992] для пород массивов: Орцог-Ула (а-б), Дулан-Ула (в-г), Манхан-Ула (д-е), Ямат-Ула (ж-з) и Номгон (и-к). E-MORB – базальты срединно-океанических хребтов [Sun, McDonough, 1989]; IAB – базальты островных дуг [Pearce et al., 1995]; OIB – базальты океанических островов [Sun, McDonough, 1989].

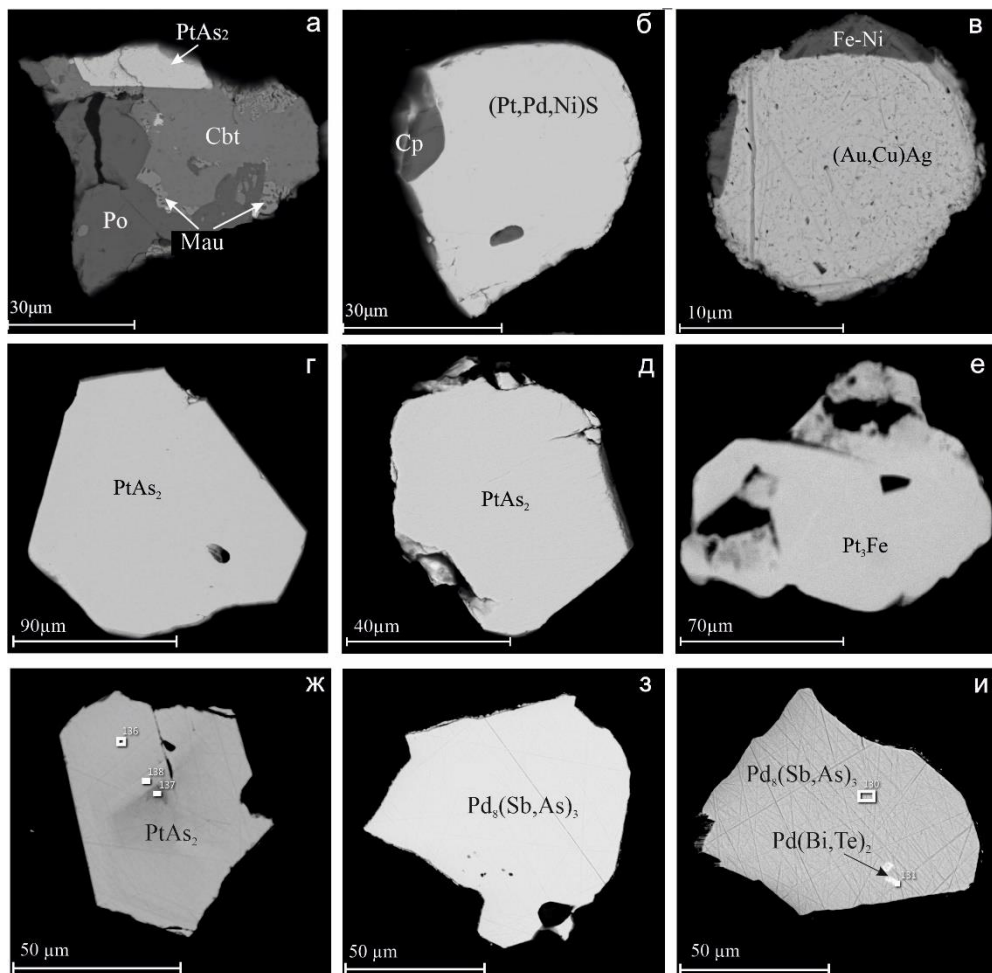


U-Pb (SHRIMP-II) диаграммы с конкордией для цирконов из габброидов массивов Хангайского нагорья и катодолуминесцентные изображения цирконов: а - вторая фаза массива Орцог-Ула; б - первая фаза массива Ямат-Ула; в - вторая фаза массива Ямат-Ула; г - массив Номгон. б-в - диаграммы с конкордией Тера-Вассербурга [Tera, Wasserburg, 1972]. Эллипсы ошибок соответствуют 1σ. На катодолуминесцентных изображениях приведен возраст, полученный по изотопному отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ .



Сульфидная минерализация в габброидных массивах Хангайского нагорья. а-в – массив Орцог-Ула: а - интерстициальная вкрапленность сульфидов; б – сульфидная капля халькопирит-пентландит-пирротинового состава; в – структура распада троилита в гексагональном пирротине; г - редкая сульфидная вкрапленность в породах массива Манхан-Ула; д-е – крупные сульфидные капли в массиве Ямат-Ула; ж-и – сульфидная вкрапленность в массиве Номгон кубанит-борнит-халькопиритового срстава.

Условные обозначения: Po - пирротин, Pn - пентландит, Cp – халькопирит, Bn – борнит, Cbn – кубанит, Ti-Mgt – титаномagnetит, Ilm – ильменит.



Минералы ЭПГ и Au массивов Орцог-Ула (а-в) и Номгон (ж-и) и из шлиховых проб массива Орцог-Ула (г-е): а – срастание сперрилита ( $PtAs_2$ ) с кобальтином (Cbt), пирротиниом (Po) и маухеритом (Mau), б – бреггит ( $(Pt,Pd,Ni)S$ ) с халькопиритом (Cp), в – Au-Ag сплав, г, д, ж – кристаллы сперрилита ( $PtAs_2$ ), е – кристаллы изоферроплатины ( $Pt_3Fe$ ), з – зерна мертиита-II ( $Pd_8(Sb,As)_3$ ), и – включения фрудита  $Pd(Bi,Te)_2$  в мертиите-II ( $Pd_8(Sb,As)_3$ ). Прямоугольники на рисунках ж-и – области анализов SEM.