

## ПЕТРОЛОГИЯ МАЛЫХ ТЕЛ НИКЕЛЕНОСНЫХ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВ ЮГО-ВОСТОКА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА

**В.С. Приходько<sup>1</sup>, Л.Л. Петухова<sup>1</sup>, В.А. Гурьянов<sup>1</sup>, В.М. Чубаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000; e-mail: [guryanov\\_v@mail.ru](mailto:guryanov_v@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бул. Пийна 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 21 августа 2017 г.

Рассмотрена природа мафит-ультрамафитовых тел юго-востока Алдано-Станового щита на примере Кун-Маньенского рудного поля. Они играли важную роль при формировании сульфидного медно-никелевого месторождения Кун-Манье, где выступали в качестве проводников сульфидоносных магматических расплавов. По керну двух скважин 21 и 25 из интрузивных тел Треугольник и Икэн, соответственно, проведено детальное минералого-геохимическое изучение с поинтервальным опробованием. Полученные данные свидетельствуют об их происхождении из единой исходной магмы. Показано, что формирование малых интрузий Треугольник и Икэн происходило в разноглубинных магматических камерах в процессе котектической кристаллизации темноцветных минералов из исходного пикритового (тело Треугольник) и промежуточного пикробазальтового (тело Икэн) расплавов. Сравнительный анализ результатов петрогеохимических и минералогических исследований позволяет утверждать, что интрузив Треугольник формировался как закрытая система: магма внедрялась в виде единого относительно быстрого акта и кристаллизовалась без потери какой-либо части; а образование силла Икэн осуществлялось путем открытой системы в результате последовательных разновременных инъекций отдельных порций расплава. После своей кристаллизации магматические тела вместе с вмещающими метаморфическими породами были вовлечены в процессы тектонических деформаций.

**Ключевые слова:** интрузия, мафиты-ультрамафиты, сульфиды, вебстериты, кристаллизация, Кун-Манье рудное поле, Алдано-Становой щит, Дальний Восток России.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение малых тел основного и ультраосновного состава служит источником информации о составе глубинных магм и процессах их дифференциации в верхней мантии [1, 10, 14, 17, 19, 20]; учитывая большое количество силлов и даек в юго-восточном обрамлении Алдано-Станового щита (АСЩ), понятен повышенный интерес исследователей к изучению таких тел в связи с их потенциальной рудоносностью [3–6, 13, 15, 16, 18].

В результате структурно-геологических и геохимических исследований на юго-востоке АСЩ нами в 2003–2009 гг. были закартированы и описаны протяженные пластообразные, силлоподобные (силлы) и линзовидные в разрезе тела и крутопадающие дайки мафит-ультрамафитов палеопротерозойского возраста [3, 4, 6]. Полученные геологические и геохронологи-

ческие данные позволили выделить в истории геологического развития восточной части Пристанового коллизионного орогена этап проявления позднепалеопротерозойского мафит-ультрамафитового магматизма (1.76–1.69 млрд лет), представленного многочисленными и протяженными роями силлов, даек, реже небольшими штокообразными интрузиями [5, 6, 15]. Они следятся в виде ареалов в субширотном направлении, слагая протяженный Джугджуро-Становой пояс малых интрузий [6, 15, 16, 18]. Исходя из широкого их распространения и близкого вещественного состава, эти тела были выделены в ранге самостоятельного петрографического подразделения – кун-маньенского комплекса, представленного габброноритами, вебстеритами, лерцолитами, кортландитами, иногда превращенными в различные сланцы [3, 4]. Эти породы, характеризующиеся отчетливой геохимической (Cr, Ni, Co, Cu, Pt, Pd) специализацией, играли важнейшую

роль в формировании сульфидных медно-никелевых рудопроявлений (месторождения Кун-Манье [27], Елан, Кэндэке, Богидэ, Няндоми и др.) Восточного Становика и хр. Джугджур. Как известно, малые тела мафит-ультрамафитов играют существенную роль в магматическом рудогенезе при формировании сульфидных медно-никелевых с платиноидами месторождений Войсис Бей, Рэлан, Печенга и др. [2, 10, 14]. Они часто являются не только важнейшим структурно-вещественным, но и рудонесущим компонентом, подводющим каналом-проводником магматических сульфидоносных расплавов в магматическую камеру. ЭПГ-Cu-Ni сульфидные месторождения связаны, как правило, с продуктами мантийного магматизма [1, 14, 20, 23]. Первичные мантийные выплавки еще в верхней мантии нередко претерпевают значительную дифференциацию, причем отдельные порции расплавов при дальнейшем подъеме часто кристаллизуются непосредственно в верхней мантии и низах земной коры, формируя дайки и силлообразные тела.

В настоящей статье обсуждаются новые результаты минералогических, геохимических и петрологических исследований палеопротерозойских мафит-ультрамафитов силлообразных тел Икэн и Треугольник, расположенных в центральной части Кун-Маньенского рудного поля (рис. 1) на восточном фланге одной из крупнейших орогенных структур – Пристановой зоны коллизии [6, 15], что определяет актуальность исследований и важнейшую роль при расшифровке ранних этапов эволюции земной коры юго-востока АСЦ в раннем докембрии. Эти тела играли определяющую роль при формировании сульфидного медно-никелевого месторождения Кун-Манье, где выступали в качестве проводников сульфидоносных магматических расплавов [3, 27]. По керну двух скважин № 21 и 25 из интрузивных тел Треугольник и Икэн, соответственно, проведено детальное минералогическое картирование с поинтервальным отбором сколков для изготовления шлифов, аншлифов, проб на силикатный и геохимический анализы [16]. Целью проведенных исследований являлось изучение и сравнительный анализ минералогических, химических особенностей и условий кристаллизации пород интрузива Треугольник и силла Икэн, определение состава исходного расплава и температурных параметров их формирования.

#### МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение исходного состава мафит-ультрамафитов в работе основано на материалах полевых структурно-геологических наблюдений, анализе петрохимических данных и закономерностей распределения элементов-примесей в породах. Данные о химическом составе пород базируются на результатах

анализа 82 проб, отобранных авторами из керна скважин в процессе их документации.

#### Пробоподготовка

Из керна скважин 21 и 25 детально из каждого интервала в 1–1.5 м отбиралось (в зависимости от однородности пород) по несколько образцов, из которых вырезались фрагменты для химических и геохимических исследований, микрозондового анализа минералов, изготовления шлифов и аншлифов.

#### Аналитические методы

Состав минералов определяли на микроанализаторе «Самебах» в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), аналитик Чубаров В.М. Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе около 50 нА. В качестве эталонов использовались химически однородные природные и синтетические минералы.

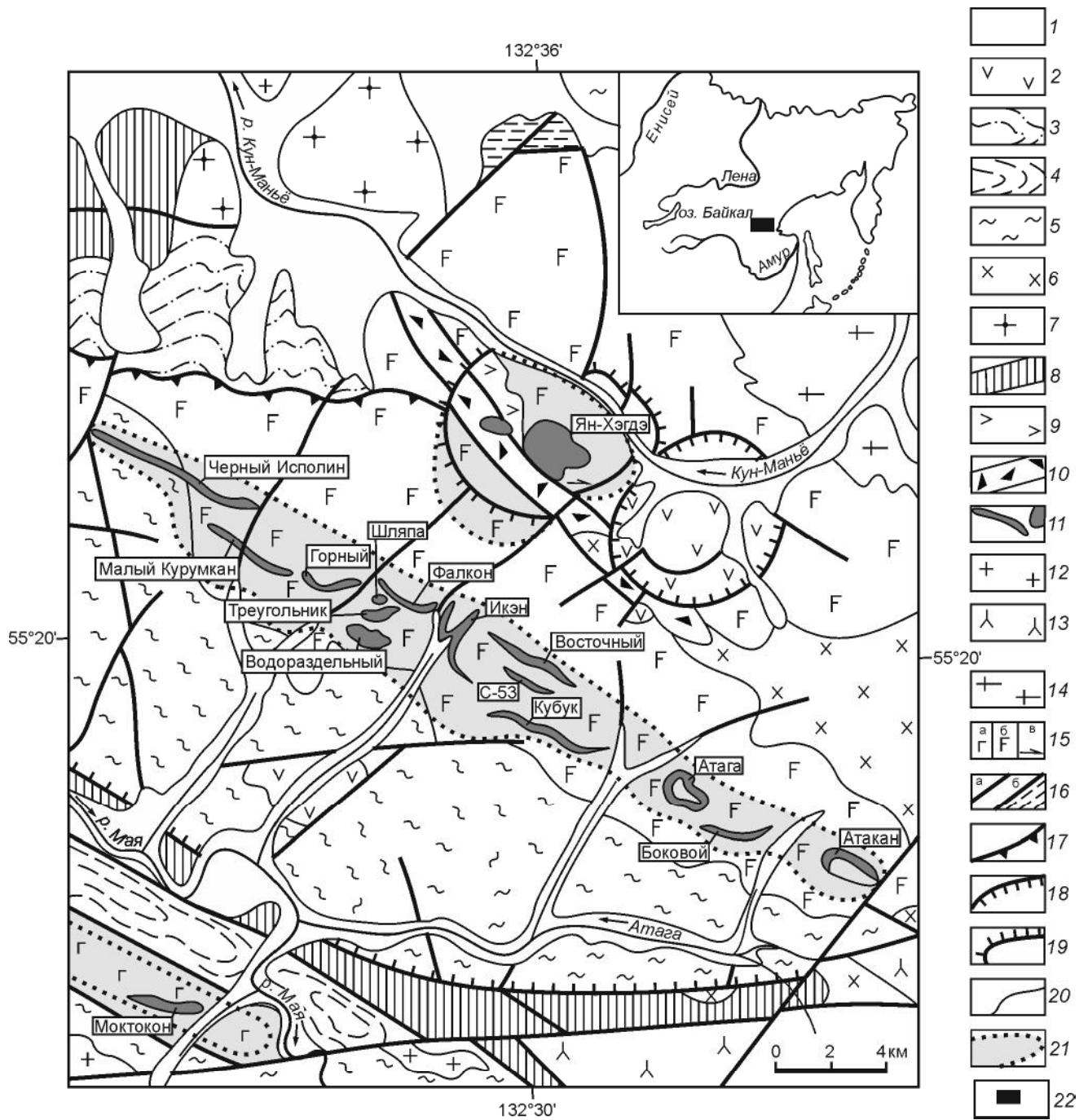
Петрогенные компоненты в породах определялись в лаборатории рентгеноспектрального анализа Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН (г. Магадан) рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре СРМ-25 (аналитик Бордохоева Т.Д.).

Элементы-примеси определены методом ICP-MS в Хабаровском инновационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. Методика анализа – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (аналитики Авдеев Д.В., Лушникова А.Ю.). Прибор: ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (USA). Вскрытие образцов проводилось путем кислотного разложения в микроволновом поле.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

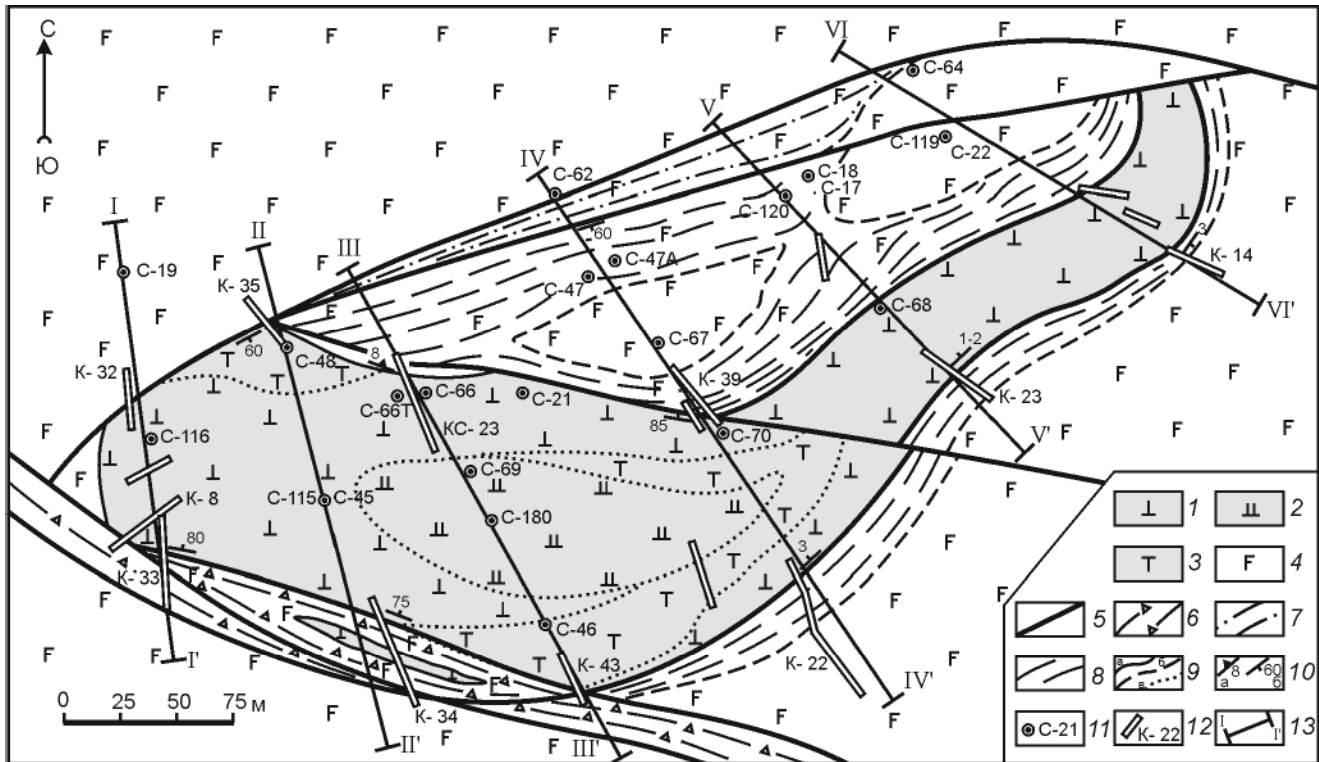
Область распространения позднепалеопротерозойских (1.76–1.69 млрд лет) малых интрузий кунманьенского комплекса охватывает бассейн верхних течений рек и ручьев Кубук, Бол. и Мал. Курумкан – левых притоков верхнего течения р. Мая-Удская [3, 4]. Пространственно ареал приурочен к юго-западному флангу Кун-Маньенского массива архейских метагэбброидов майско-джанинского комплекса, на отдельных участках к вмещающим его гранулитам джанинской серии. Тела мафит-ультрамафитов следуют в виде роя в полосе шириной 1–2 км, протягивающегося в северо-западном направлении на 31 км (рис. 1). Основные особенности геологического строения района рассмотрены в [3–6, 15].

В Кун-Маньенском рудном поле выявлено около 30 крупных и десятки мелких силлообразных тел (силлов) мафит-ультрамафитов одноименного комплекса, расположенных часто в несколько ярусов (по



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Кун-Маньенского рудного узла (В.А. Гурьянов, 2012 г., по материалам ЗАО «Кун-Манье»).

1 – четвертичные рыхлые отложения; 2 – меловые эффузивы; 3 – верхнеюрские туфоогенно-терригенные отложения; 4 – палеопротерозойская толща зеленых сланцев с прослоями известняков и метабазальтов; 5 – архейские гнейсы и кристаллосланцы джанинской серии; 6 – меловые гранитоиды; 7–11 – палеопротерозойские образования: 7 – гранитоиды, 8 – диафориты и динамометаморфиты зон разломов, 9 – лейконориты, 10 – приразломные бластокатаклизиты, 11 – мафит-ультрамафиты кун-маньенского комплекса с сульфидной минерализацией (рудные тела и залежи); 12–13 – позднеархейские граниты (12) и плагιοграниты (13); 14–15 – архейские гранитогнейсы (14), габбро (15 а), метагаббро (15 б) и метанортозиты (15 в); 16 – разрывные нарушения (а) и зоны расланцевания (б); 17 – надвиги; 18 – сбросы; 19 – взбросы; 20 – геологические границы; 21 – контуры ареалов малых тел мафит-ультрамафитов кун-маньенского комплекса; 22 – на врезке положение района исследований.



**Рис. 2.** Схема геологического строения интрузивного тела «Треугольник» (составлена с использованием данных геологоразведочного бурения ЗАО «Кун-Манье», с упрощениями).

1–3 – сульфидоносные (рудные) породы: 1–2 – серпентинизированные вебстериты оливиновые (1) и плагиоклазсодержащие амфибол-оливиновые (2), лерцолиты и серпентиниты по лерцолитам (3); 4 – метагаббро; 5 – разрывные нарушения; 6 – милониты и катаклазиты нерасчлененные; 7 – бластомилониты приконтактных зон тел мафит-ультрамафитов; 8 – геологические границы: а – установленные, б – предполагаемые, в – фациальные; 10 – замеры структурных элементов: а – контактов геологических тел, б – направление падения плоскости сместителя (сланцеватости); 11–12 – скважины (11), каналы (12) и их номера; 13 – линии геологических разрезов и их номера (I–VI).

вертикали). Породы комплекса представлены габбро-норитами, различными вебстеритами, лерцолитами. Они слагают полого падающие на северо-восток и север (выклинивающиеся по падению) силлообразные и линзовидные тела мощностью от 0.1–1 м до 70–80 м и протяженностью от 50–250 м до 1–8 км, в редких случаях – дайки протяженностью до 6 км [15]. Пространственно эти тела трассируют зону полого падающих (от 1–3 до 25°, реже до 30–35°) на северо-восток и север древних разрывных нарушений типа чешуйчато-надвиговых структур [5, 6]. Простирание тел мафит-ультрамафитов – северо-западное (азимут простирания – 330°). Тела имеют тектонические контакты по отношению к гнейсовидности вмещающих их метагабброидов и полосчатости кристаллосланцев и плагиогнейсов, претерпевших метаморфизм в условиях гранулитовой фации [5, 6]. Для исследований были выбраны представительные разрезы по скважинам 21 и 25 с сульфидной вкрапленностью в керне практически по всему разрезу двух интрузивных тел Треугольник и Икэн.

**Интрузивное тело Треугольник** (рис. 2) расположено на водоразделе истоков ручьев Сокол и Левый Малый Курумкан [4]. На местности обнажена только восточная часть интрузива. Вмещающие породы представлены диафорированными гнейсовидными метагабброидами. По данным буровых работ интрузив представляет собой погружающийся через тектонический контакт под метагаббро в северо-восточном направлении под углом 10–15° бескорневое клиновидное тело трапецевидной формы площадью 0.0715 км<sup>2</sup>. В его центральной части пробурена вертикальная скв. 21, глубиной 101 м. На юго-западном фланге мощность тела составляет всего 17.2 м, а в центральной части интрузива достигает 63.5 м. В северо-западном висячем боку интрузива – пологое (12–15°) падение плоскости тектонического контакта на север.

Интрузив Треугольник сложен амфиболсодержащими лерцолитами, плагиоклаз-роговообманковосодержащими оливиновыми, плагиоклазсодержащими роговообманково-оливиновыми вебстеритами. Гра-

ницы между ними как постепенные, так и нечеткие расплывчатые, затушеванные процессами вторичных преобразований.

Лерцолиты, слагающие центральную в разрезе часть тела, интенсивно серпентинизированы; сохранились лишь реликты первичных минералов и фрагменты структур. Визуально – это темно-серые и коричневатые-серые плотные, с массивной текстурой породы, среднезернистого, порфириовидного тонко- и мелкозернистого строения. Структура лерцолитов реликтовая панидиоморфнозернистая, аллотриоморфнозернистая с элементами пойкилитовой, с выраженным идиоморфизмом оливина. Минеральный состав серпентинизированных лерцолитов и серпентинитов (в %): оливин (5–45), бронзит (3–35), авгит (5–30), роговая обманка (0–7), плагиоклаз (0–2), шпинель (до 3), редкие чешуйки флогопита; сульфиды (3–15 – пентландит, пирротин, халькопирит), серпентин (30–85 – хризотил и антигорит, как правило, по оливину), тальк (до 15) и хлорит.

Вебстериты оливиновые – темно-серые, до коричневатых-черных тонко- и мелкозернистые породы с массивной и неясно ориентированной текстурой. Микроструктура пород панидиоморфнозернистая, реже гипидиоморфнозернистая. Минеральный состав (в %): оливин (10–25), бронзит (20–50), авгит (15–35), роговая обманка (2–10), плагиоклаз (0–7), шпинель (1–5), флогопит (до 1), сульфиды (от 2 до 20); вторичные минералы (20–35 %) – серпентин (10–25), хлорит (до 15), амфибол (0–5), реже тальк и кальцит. Плагиоклаз встречается редко, полисинтетически сдвойникован, неотчетливо зональный. Роговая обманка – густо окрашенная оранжево-бурая, с сильным плеохроизмом. Шпинель представлена зеленой и полупрозрачной буроватой разновидностями в ассоциации с сульфидами и образующими сростания с ильменитом и магнетитом.

**Интрузив Икэн**, по данным буровых работ, – это полого (3–5°) погружающееся в северо-восточном направлении безкорневое силлобразное тело площадью около 3 км<sup>2</sup> (рис. 3). Протяженность его по простиранию – 2.4 км, по падению на северо-восток – 1.5 км [4]. Мощность силла изменяется от 40 м в центре до полного выклинивания на северо-восточном фланге, на юго-западном при выходе его на дневную поверхность достигает 20 м. Установлено, что тело через тектонический контакт залегает субгоризонтально под мощной (до 130 м) толщиной архейских метагабброидов и гранитогнейсов. На юго-западном окончании оно воздымается под углом 30–40°. По своему строению силл Икэн – расслоенное интрузивное тело, состоящее из субогласных «слоев» вебстеритов, плагио-вебстеритов и габброноритов [15]. Разрез этого силла, по

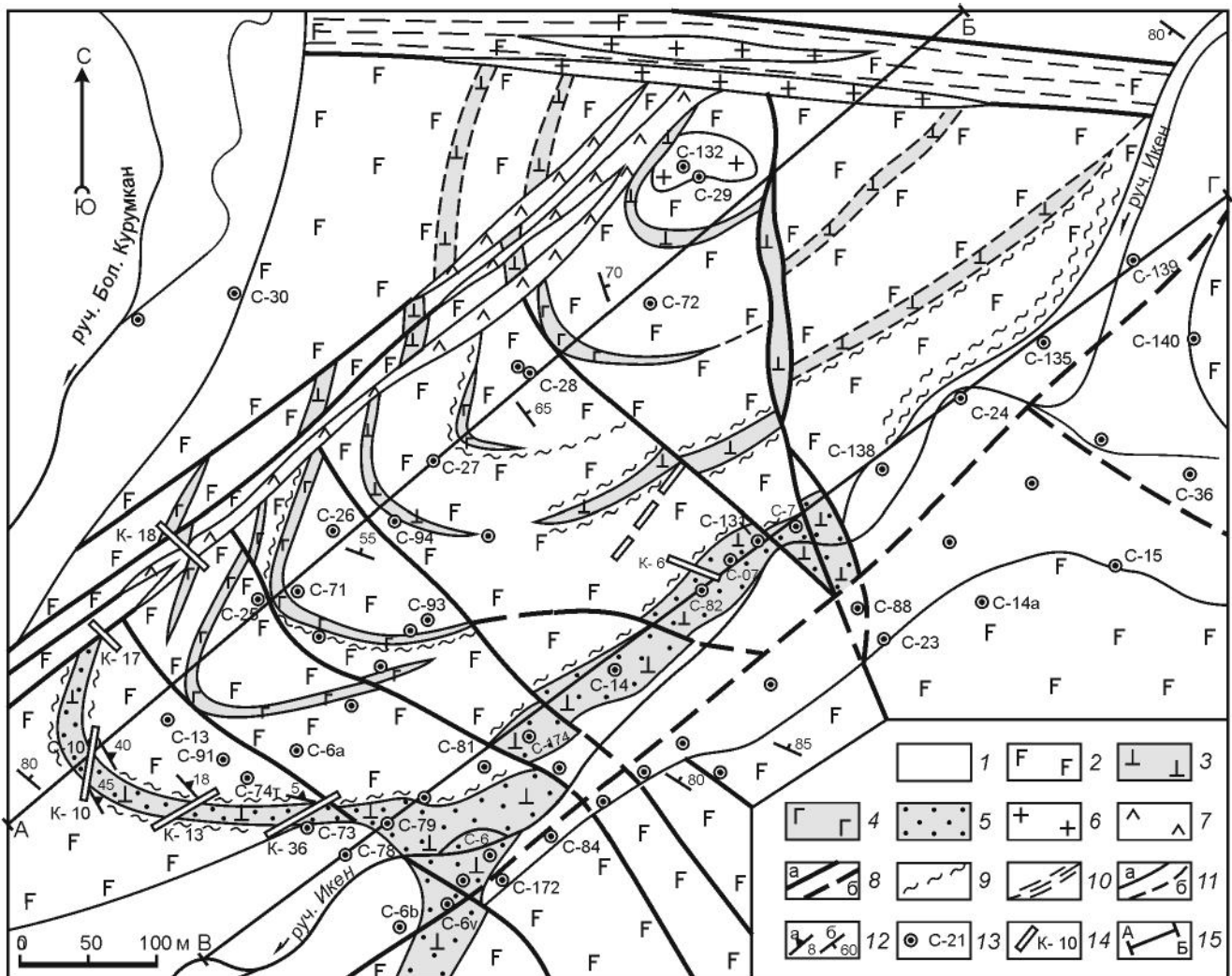
данным изучения керна скважины 25, начинается в подошве с вебстеритов, которые вверх по разрезу сменяются сначала пачкой переслаивания габброноритов и плагиоклазовых вебстеритов; далее – габброноритами с прослоями вебстеритов и плагио-вебстеритов. На контакте с вмещающими метагаббро (в кровле и подошве) породы силла тонко расслоены. В них отчетливо проявлена трахитоидность, переходящая в полосчатость (сланцеватость). Наиболее часто встречаемые в его составе роговообманковые и плагиоклазовые вебстериты представлены тонко- и мелкозернистыми, реже среднезернистыми и порфириовидными породами; для них характерна массивная, иногда такситовая и сланцеватая текстуры.

Минеральный состав вебстеритов (в %): оливин (0–5), бронзит (10–50), авгит (5–40), роговая обманка (5–15), плагиоклаз (0–5), флогопит (0–5), шпинель (0–3), сульфиды (2–10), вторичные минералы (от 5 до 80) – амфиболы (актинолит, 3–65), тальк (5–20), серпентин (0–20) и хлорит. Плагио-вебстериты (в %): гиперстен (25–40), диопсид (25–35), плагиоклаз (7–15), роговая обманка (5–20), флогопит (0.5), шпинель (0–2), сульфиды (1–5), титаномагнетит; вторичные минералы (от 5 до 25 %) – амфиболы, тальк, хлорит, серпентин, карбонаты и биотит. Габбронориты (в %): плагиоклаз (30–60), салит (15–55), гиперстен (15–25), роговая обманка (0–5), рудные (1–10 – сульфиды, титаномагнетит, апатит) и вторичные (10–65) минералы – амфиболы, эпидот, кальцит, хлорит и кварц. Среди них выделяются прослой оруденелых роговообманковых габброноритов с сульфидной (до 20 %) и апатит-титаномагнетитовой (до 30 %) минерализацией. Степень преобразования пород различна: от относительно свежих (1–15 %) в центральной части силла до хлорит-серпентин-амфиболовых или хлорит-тальк-амфиболовых сланцев (до 50–80 %) в его подошве и кровле.

#### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Главными породообразующими минералами мафит-ультрамафитов тел Треугольник и Икэн являются оливины, амфиболы, ромбические и моноклинные пироксены, имеющие текстурообразующее значение и выступающие как минералы кумулуса. Шпинелиды, слюды и плагиоклазы обычно менее распространены в этих породах [16, 18].

**Оливин** встречается практически во всех типах пород, за исключением габброидов. Наиболее магнесьные оливины установлены в лерцолитах тела Треугольник (Fa до 15 %), в породах Икэнского силла оливины более железистые (Fa от 22 до 30 %) (табл. 1, рис. 4, 5). В разрезе (по скв. 21) интрузии Треугольник наблюдаются следующие изменения



**Рис. 3.** Схема геологического строения исследованного участка массива Икэн (составлена с использованием данных геологоразведочного бурения ЗАО «Кун-Мань», с упрощениями).

1 – четвертичные нерасчленённые рыхлые отложения; 2 – метагаббро, 3 – вебстериты и плагио вебстериты; 4 – габбронориты и нориты; 5 – рудные тела мафит-ультрамафитов с сульфидной минерализацией; 6 – гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры; 7 – андезиты, андезидациты; 8 – разрывные нарушения: а – установленные на дневной поверхности, б – перекрытые четвертичными рыхлыми отложениями; 9 – blastsмилониты приконтактных зон тел мафит-ультрамафитов; 10 – тектонические брекчии и милониты; 11 – геологические границы: а – установленные, б – предполагаемые; 12 – замеры структурных элементов: а – контактов геологических тел, б – гнейсовидности; 13–14 – скважины (13) и каналы (14) и их номера; 15 – линии геологических разрезов.

состава оливинов (рис. 5): к подошве и кровле тела, представленных вебстеритами, происходит увеличение железистости, а в центральной его части оливины более магниальные ( $Fo = 85-80\%$ ). Значительное увеличение фаялитового компонента (23–25 %) отмечается в оливинах из небольшого прослоя «безрудных» вебстеритов, что резко нарушает тренд распределения железистости оливинов, имеющий по разрезу форму параболы (рис. 5). Концентрации Ni в оливинах пород тела Треугольник изменяются в пределах 0.04–0.27 мас. % с более низкими значениями в оливинах лерцолитов (0.07–0.18 мас. %). В целом, прослежи-

вается по мере возрастания железистости оливина увеличение в нем концентрации Ni. Вариационный тренд содержаний Mn в оливинах аналогичен тренду железистости, отражая наиболее низкие значения в оливинах лерцолитов (0.14–0.17 мас. %) с постепенным увеличением в оливинах вебстеритов (0.15–0.27 мас. %) по мере продвижения к подошве и кровле интрузивного тела. Таким образом, для тела Треугольник характерна скрытая расслоенность.

В породах Икэнского силла оливины встречаются значительно реже. Характерной их особенностью является присутствие Ca (0.1–0.27 %). Высокие кон-

Таблица 1. Химические составы представительных оливинов.

Компоненты	636	637	639	641	643	655	658	672	674	775	776	804
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	40.68	41.5	41.44	40.25	40.8	41.88	41.22	40.22	39.99	38.91	37.94	39.42
FeO	18.65	16.29	17.49	21.94	21.3	13.35	14.01	16.97	18.24	20.87	20.56	24.03
MgO	41.22	41.22	41.03	38.16	38.71	44.4	43.99	42.78	41.73	39.24	39.96	35.94
CaO	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.12	0.15	0.04
MnO	0.23	0.14	0.14	0.22	0.22	0.17	0.14	0.18	0.29	0.22	0.18	0.22
NiO	0.09	0.09	0.26	0.04	0.13	0.12	0.18	0.17	0.21	0	0	0.31
сумма	100.89	99.26	100.39	100.67	101.17	99.94	99.55	100.33	100.46	99.4	98.81	99.96
Fe, мол. %	79.75	81.85	80.7	75.61	76.41	85.6	84.84	81.8	80.3	77.02	77.6	72.72

Примечание. 1–5, 8, 9 – оливины из оливиновых вебстеритов интрузива Треугольник; 6, 7 – оливины из лерцолитов интрузива Треугольник; 10, 11 – оливины из габброноритов силла Икэн; 12 – оливин из вебстеритов силла Икэн. Здесь и далее номера образцов возрастают от кровли к подошве.

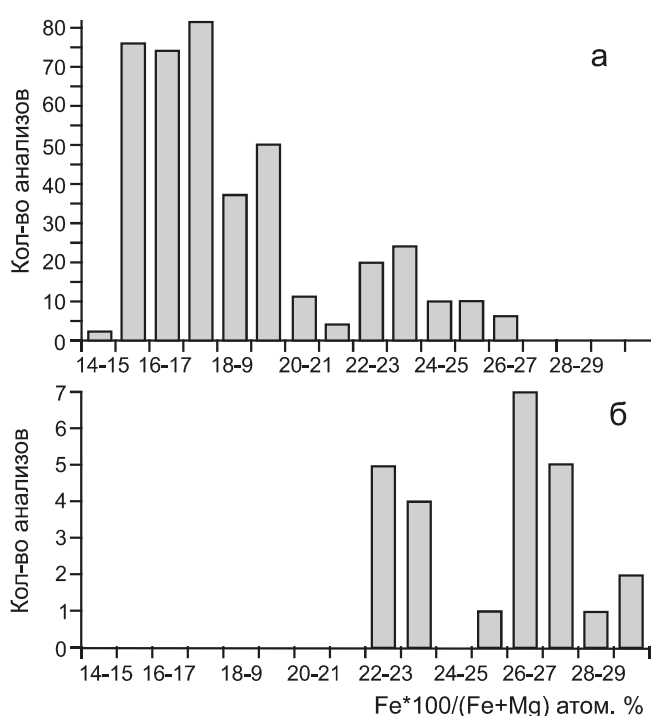


Рис. 4. Гистограмма железистости оливинов мафит-ультрамафитов интрузива Треугольник (а) и силла Икэн (б).

центрации Ni (0.12–0.43 %) установлены исключительно в оливинах вебстеритов. Различия оливинов габброидов и вебстеритов по содержанию Mn невелики: 0.17–0.25 % и 0.22–0.30 %, соответственно.

Ромбические пироксены ультрамафитов тела Треугольник представлены бронзитами (табл. 2); их железистость близка к железистости сосуществующих оливинов (рис. 4–6). Наиболее магнезиальные ортопироксены характерны для лерцолитов ( $f = 14.6–17.6$  ат. %), а наиболее железистые – для прослоев вебстеритов ( $f = 20.3–22.1$  ат. %) с низкими содержаниями Ni («безрудные вебстериты»). Для вебстеритов

подошвы и кровли интрузива характерны средние величины железистости минералов ( $f = 16.2–19$  ат. %) (рис. 5, 6). Концентрации  $Al_2O_3$  в ортопироксенах лерцолитов невелики (2.55–3.3 мас. %), незначительное повышение содержаний  $Al_2O_3$  зафиксировано лишь в минералах вебстеритов (2.9–3.5 мас. %). Характерная особенность бронзитов из пород этого тела – присутствие  $Cr_2O_3$  (0.01–0.32 мас. %) с максимальными концентрациями в лерцолитовой части разреза. Напротив, увеличение концентраций Mn в ортопироксенах происходит по мере продвижения к кровле и подошве интрузива; наименьшие его содержания наблюдаются центральной лерцолитовой части. Таким образом, сохраняется общая тенденция – наблюдается скрытая расслоенность, когда минералы при фракционировании постепенно изменяют свой состав в соответствии с требованиями фазового равновесия [9, 16, 19].

Более железистый и более разнообразный состав ортопироксенов в породах силла Икэн (табл. 2, рис. 6): от бронзитов ( $Fs_{12-30}$ ) до более богатых Fe пироксенов – гиперстенов в подавляющей части тела и феррогиперстенов ( $Fs_{50-70}$ ) в его кровле [16, 18]. Железистость ортопироксенов в вебстеритах варьируется незначительно ( $f = 29–33.5$  ат. %). Наиболее магнезиальные разновидности бронзитов характерны для подошвы силла ( $f = 19.9–25.3$  ат. %), а для габброидов ( $f = 42.6–53.1$  ат. %) кровли – железистые гиперстены. Минимальные концентрации  $Al_2O_3$  наблюдаются в ромбических пироксенах габброидов (0.6–2.24 мас. %). Глиноземистость ортопироксенов в вебстеритах снижается с ростом магнезиальности вниз по разрезу силла. В центральной части интрузии содержание  $Al_2O_3$  колеблется от 2.96 до 4.18 мас. %, в бронзитах пород подошвы – от 1.24 до 3.8 мас. %. Концентрации Mn коррелируются с железистостью ромбических пироксенов – максимальные содержания (при размахе колебаний – 0.38–1.2 мас. %) – в габброидах кровли силла с

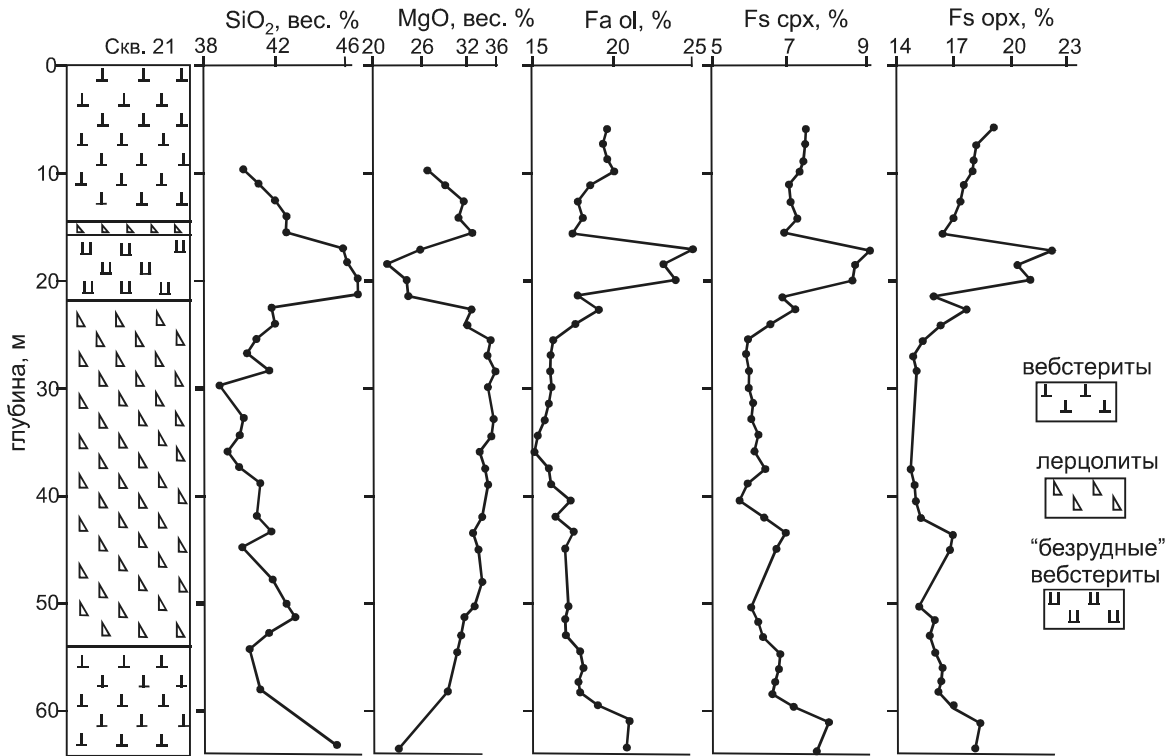


Рис. 5. Изменение химического состава пород и минералов в разрезе интрузива Треугольник.

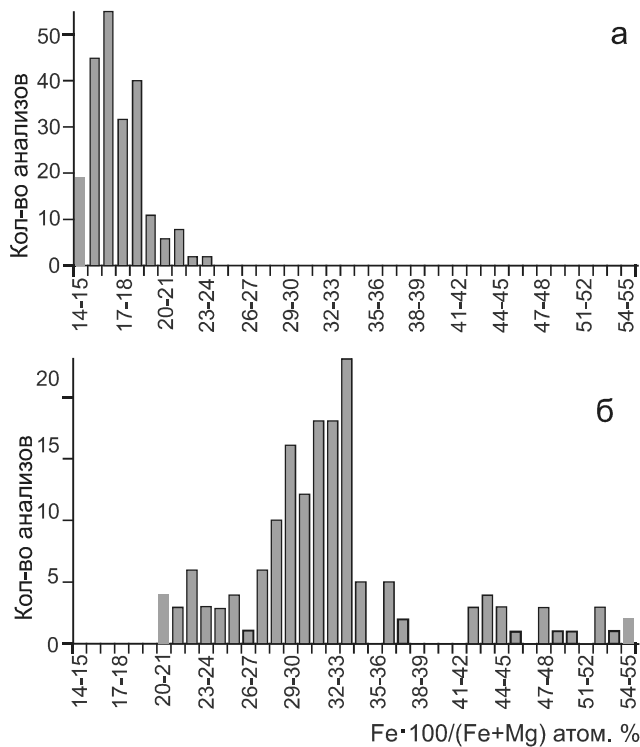


Рис. 6. Гистограмма железистости ортопироксенов мафит-ультрамафитов интрузива Треугольник (а) и силла Икэн (б).

постепенным снижением содержаний Mn в гиперстенах вебстеритов (0.27–0.64 мас. %) и до минимальных значений в бронзитах подошвы (0.14–0.3 мас. %).

**Клинопироксены** наряду с ортопироксенами встречаются во всех типах исследуемых пород. Клинопироксены из ультрамафитов тела Треугольник ( $f = 11–19$  ат. %) относятся к высокоглиноземистым (до 5.9 мас. %  $Al_2O_3$ ) и умереннохромистым (до 0.8 мас. %  $Cr_2O_3$ ) авгитам (табл. 3) [16, 18, 25]. В разрезе (по скв. 21) интрузива состав клинопироксенов меняется от магниального минала в лерцолитах ( $f = 11–13$  ат. %) до более железистого в вебстеритах (до 16.5 ат. %) (рис. 5, 7). Самые железистые клинопироксены установлены в «безрудных» вебстеритах. Схожие вариации содержаний отмечены для оксида хрома. Наиболее высокие его концентрации (0.4 %–0.8 %) отмечаются в клинопироксенах лерцолитов, а в вебстеритах вверх и вниз по разрезу происходит уменьшение этого компонента (0.23 %–0.5 %). Обратная зависимость в авгитах установлена для  $Al_2O_3$ : в магниальных разновидностях – наименьшие содержания.

Составы клинопироксенов из пород силла Икэн более железистые и изменяются от авгитов в вебстеритах до салитов в габброидах ( $f = 15–46$  ат. %) (рис. 7). Содержания  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $FeO$ ,  $MnO$  в моно-



Таблица 2. Химические составы представительных ортопироксенов.

Компо- ненты	637	638	639	642	643	648	649	655	657	672	674
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	54.7	56.3	56.37	53.86	54.66	55.97	56.11	56.89	56.04	54.7	55.18
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.01	3.48	3.26	3.51	3.1	2.96	2.55	2.76	2.82	3.66	3.74
FeO	10.83	11.22	10.28	13.29	13.52	9.47	9.65	9.34	9.5	11.88	11.74
MnO	0.19	0.12	0.16	0.26	0.22	0.15	0.2	0.18	0.19	0.24	0.23
MgO	29.62	27.91	28.94	27.5	27.09	30.81	29.79	30.32	29.92	28.79	29.12
CaO	0.31	0.45	0.54	0.35	0.34	0.44	0.28	1.08	0.44	0.56	0.45
Na <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02
K <sub>2</sub> O	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.15	0.13	0.04	0.22	0.22	0.22	0.17	0.16	0.02	0.02
Сумма	98.75	99.64	99.7	98.83	99.18	100	98.82	100.77	99.09	99.87	100.5
f	0.17	0.18	0.17	0.21	0.22	0.15	0.15	0.15	0.15	0.19	0.18

Компо- ненты	774	775	776	787	788	789	792	793	797	799	801
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO <sub>2</sub>	51.65	50.6	54.57	52.99	52.31	51.7	51.75	52.52	52.81	53.74	54.61
TiO <sub>2</sub>	0.02	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.57	1.99	0.64	3.76	3.7	3.89	3.4	4.05	3.69	3.52	2.91
FeO	31.62	27.86	25.48	18.24	20.21	20.61	22.33	18.87	17.78	13.25	14.23
MnO	0.8	0.41	0.96	0.25	0.31	0.5	0.43	0.23	0.33	0.18	0.24
MgO	15.66	17.43	14.94	24.69	22.3	23.13	20.82	23.15	24.39	28.11	27.66
CaO	0.5	0.48	2.41	0.41	0.43	0.49	0.63	0.41	0.42	0.29	0.37
Na <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.05	0.04	0.02	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.01
Сумма	100.9	98.8	99.05	100.4	99.28	100.3	99.37	99.25	99.43	99.17	100.1
f	0.53	0.47	0.49	0.29	0.34	0.33	0.38	0.31	0.29	0.21	0.22

Примечание. 1–11 – ортопироксены интрузива Треугольник: 1–5, 10, 11 – из оливиновых вебстеритов, 6–9 – из лерцолитов; 12–22 – ортопироксены силла Икэн: 12–14, 18 из габброноритов, 15–17, 19–22 из вебстеритов; f – общая железистость Fe/(Fe+Mg) здесь и далее.

клинных пироксенах этого силла в целом выше, чем в клинопироксенах тела Треугольник, а концентрации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>O ниже (табл. 3). В разрезе этого интрузива по мере приближения к подошве происходит увеличение в клинопироксенах вебстеритов содержаний Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub>, а в клинопироксенах габброидов практически отсутствуют Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>O.

**Амфиболы** постоянно встречаются в породах обоих интрузивов. Амфиболы в ультрамафитах тела Треугольник относятся к группе кальциевых высокоглиноземистых титанистых разновидностей (до 5.96 мас. % TiO<sub>2</sub>) роговой обманки – керсутитам (рис. 8) [16, 22]. Их железистость меняется – от 17 до 40 ат. % [16]. В амфиболах лерцолитов наблюдаются повышенные содержания MgO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub> при пониженных Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO по сравнению с амфиболами вебстеритов. Концентрации CaO в амфиболах варьируются от 9 до 12.2 мас. %. Обращает на себя внимание прямая корреляция содержаний глинозема и же-

лезистости, что может указывать на кристаллизацию амфибола в условиях высокого давления флюидов в расплаве [7, 17].

Амфиболы пород силла Икэн представлены роговыми обманками с широкими вариациями составов. На рис. 8 фигуративные точки составов большинства амфиболов ложатся в поля эденит-паргасит-гастингсит, их железистость варьируется от 16 до 70 ат. %. Содержания TiO<sub>2</sub> в амфиболах габброидов редко превышают 0.5 мас. %, а в роговых обманках вебстеритов концентрации TiO<sub>2</sub> значительно больше (до 5.63 %), концентрации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в них низкие (0–0.11 мас. %). Для магнезиальных роговых обманок характерны колебания железистости от 3 до 52 ат. %, для более железистых ее разновидностей – феррочермакитов – от 51 до 75 ат. %. Содержание Na<sub>2</sub>O в амфиболах габброидов варьируется от 0.1 до 0.55 мас. %, а в амфиболах вебстеритов – в пределах от 1.84 до 3.08 мас. %.

Таблица 3. Химические составы представительных клинопироксенов.

Компо- ненты	639	638	636	642	643	648	654	658	660	670	674
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	52.61	52.04	51.26	51.62	51.17	52.19	52.34	52.66	52.11	51.34	51.51
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.71	0.7	0.62	0.62	0.74	0.77	0.69	0.78	0.59	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	5.48	6.03	5.79	5.61	5.15	5.44	5.07	5.18	5.9	6.01
FeO	4.22	4.57	4.74	5.29	5.64	3.32	3.49	3.57	3.84	4.12	4.59
MnO	0.06	0.06	0.22	0.07	0.05	0.09	0.02	0	0	0.09	0.08
MgO	13.95	13.57	13.65	13.53	13.84	14.19	14.3	14.47	14.36	13.82	13.39
CaO	21.58	21.14	21.55	21.95	21.15	21.73	21.77	21.45	21.64	21.15	21.32
Na <sub>2</sub> O	1.29	1.23	1.12	1.29	0.97	1.47	1.28	1.25	1.27	1.28	1.28
K <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.39	0.31	0.3	0.22	0.76	0.7	0.72	0.63	0.35	0.19
Сумма	100.14	99.22	99.61	100.49	99.31	99.67	100.1	99.91	99.83	98.72	98.93
f	0.15	0.16	0.16	0.18	0.19	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16

Компо- ненты	773	774	776	787	789	792	793	796	797	799	801
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO <sub>2</sub>	51.97	51.75	49.84	50.7	49.97	49.14	50.47	49.15	50.5	50.23	52.62
TiO <sub>2</sub>	0.1	0.28	0.57	0.57	0.89	0.87	0.82	0.69	0.77	0.82	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.85	1.88	4.13	6.11	6.2	5.66	6.31	6.3	5.94	6	3.46
FeO	11.96	14.9	10.41	7.79	8.81	10.75	7.88	6.94	6.58	5.51	5.33
MnO	0.28	0.33	0.04	0.1	0.25	0.25	0.08	0.09	0.11	0.05	0.06
MgO	10.75	9.72	11.3	12.48	11.82	11.92	12.14	12.79	12.99	13.44	14.74
CaO	21.37	20.74	23.31	21.52	20.45	19.03	20.7	21.71	21.57	21.42	22.53
Na <sub>2</sub> O	0	0	0	1.05	0.91	0.83	1.12	1.19	1.14	0.97	0.99
K <sub>2</sub> O	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0	0	0.04	0.04	0.04	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.03	0.18	0
Сумма	98.3	99.63	99.61	100.36	99.32	98.45	99.53	98.94	99.67	98.66	99.94
f	0.38	0.46	0.34	0.26	0.29	0.34	0.27	0.23	0.22	0.19	0.17

Примечание. 1–11 – клинопироксены интрузива Треугольник: 1–5, 10, 11 – из оливиновых вебстеритов, 6–9 – из лерцолитов, 12–22 – клинопироксены силла Икэн: 12–14, 17 – из габброноритов, 15, 16, 18–22 – из вебстеритов.

В ультрамафитах тела Треугольник установлены хромшпинелиды (ряд хромит-хромпикотит) с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 18 мас. % [18]. В породах Икэнского силла выявлены алюмошпинелиды с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 10.5 мас. % [16].

**Плагиоклаз** в ультрамафитах тела Треугольник крайне редок. Он представлен андезином (34–47 % An), содержащим до 3.76 % Or [16, 18]. В лерцолитах для него характерны слабо повышенные содержания кальция и алюминия. В породах Икэнского силла состав плаггиоклазов меняется от андезина (32 % An) до лабрадора (66 % An). Пониженная основность плаггиоклаза в ультрамафитах интрузива Треугольник по сравнению с плаггиоклазами мафитов силла Икэн может быть связана с порядком его выделения из расплава. При кристаллизации в области низких давлений плаггиоклаз выделяется на ликвидусе, а повышенные давления задерживает его образование и ликвидусной фазой становятся фемические минералы [17, 19]. В связи с этим при более ранней кристаллизации

клинопироксена или близкоодновременной с плаггиоклазом, последний будет более кислым, чем при более раннем его формировании [7, 9].

Составы **слюд** располагаются вблизи границы минеральных видов биотит-флогопит. Железистость флогопитов из пород интрузии Треугольник варьируется в интервале 22–26 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14.05–15.73 мас. %, MgO – 16.18–20.49 мас. % [16, 18]. В слюдах вебстеритов нижней части разреза этого тела установлены пониженные в 1.5–2 раза содержания TiO<sub>2</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также несколько повышенные концентрации MgO.

Слюды пород Икэнского силла менее магниезальные (13–19 мас. %) и менее титанистые [18]. Содержания MgO, TiO<sub>2</sub> в слюдах габброидов значительно ниже, чем в слюдах вебстеритов, а Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> несколько выше. Спецификой этих слюд является присутствие примеси Ni (до 0.56 %).

Распределение оксидов в сосуществующих минералах пород интрузивов Треугольник и Икэн (оливин, орто- и клинопироксены, амфибол) подчиняется

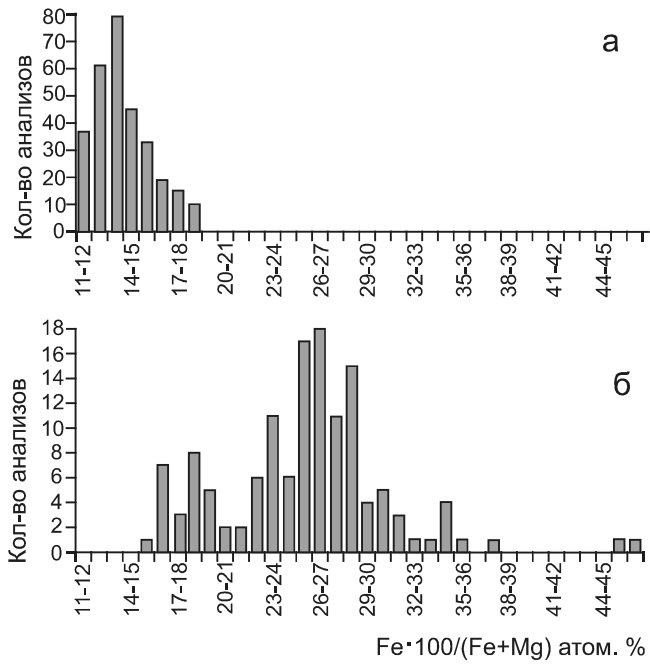


Рис. 7. Гистограмма железистости клинопироксенов мафит-ультрамафитов интрузива Треугольник (а) и силла Икэн (б).

общим закономерностям обменных равновесий, связанных с котектической кристаллизацией магматических жидкостей [16, 18]. В частности, равновесная кристаллизация оливина с пироксенами и амфиболом в случае интрузий Треугольник и Икэн подтверждает характером распределения FeO (рис. 9).

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД**

Представительные анализы мафит-ультрамафитов (из керн скважин 21 и 25) приведены в табл. 4 и 5, которые на классификационной диаграмме SiO<sub>2</sub>–(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) [8, 12] располагаются в поле ультраосновных и основных пород нормальной щелочности. Содержание MgO в ультрамафитах тела Треугольник колеблется в пределах 21.46–32.15 мас. %, в породах силла Икэн – от 8.72 до 18.10 мас. %. В целом, для них характерно преобладание натрия над калием и высокие концентрации летучих. На бинарных диаграммах отчетливо выражена обособленность ультрамафитовой (тело Треугольник) и мафитовой (тело Икэн) породных групп (рис. 10), являющаяся свидетельством того, что эти два тела соответствуют разным этапам

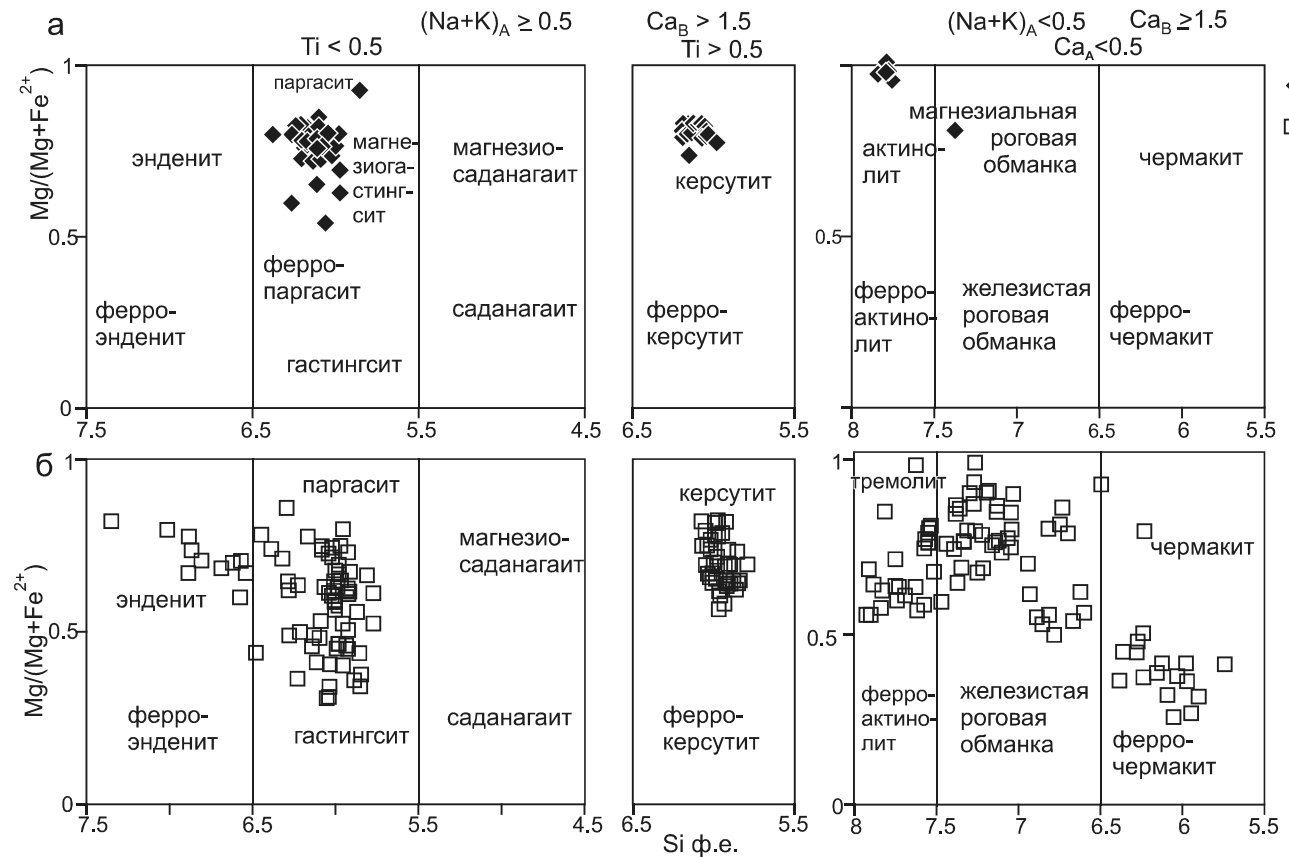
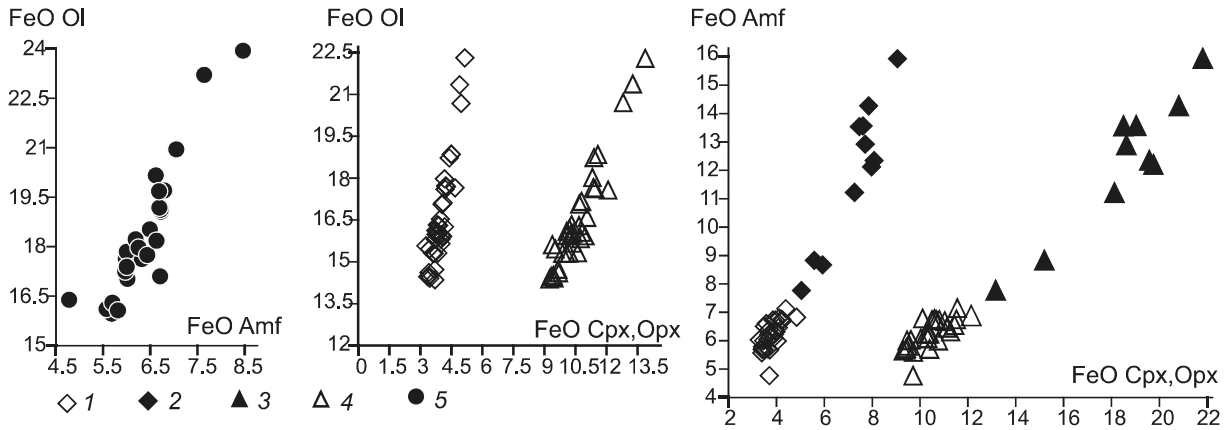
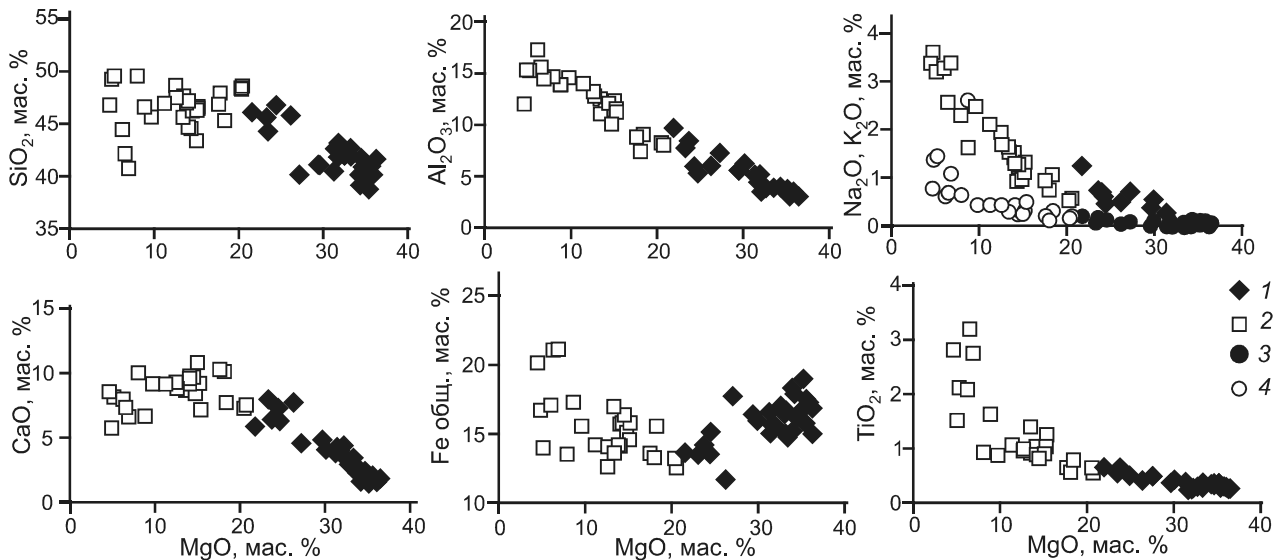


Рис. 8. Вариации составов роговых обманок в породах интрузива Треугольник (а) и силла Икэн (б). 1 – лерцолиты и оливиновые вебстериты, 2 – вебстериты и габброиды. Классификационные диаграммы по [22].



**Рис. 9.** Корреляция составов оливинов, пироксенов и амфиболов в породах интрузива Треугольник (1, 3) и силла Икэн (2, 4).

1–2 – клинопироксены, 3–4 – ортопироксены, 5 – амфиболы.



**Рис. 10.** Вариационные диаграммы распределения петрогенных элементов относительно MgO для пород интрузива Треугольник (1, 3), силла Икэн (2, 4). Содержания Na<sub>2</sub>O (1, 2), K<sub>2</sub>O (3, 4)

фракционирования единой родоначальной магмы [9]. Положение этих групп подчинено единому тренду, отражающему общую эволюцию состава пород и, таким образом, подчеркивающую их петрогенетическую общность. Наблюдается четкая зависимость большинства петрогенных оксидов от содержания MgO: с возрастанием MgO уменьшаются содержания TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO [16, 18]. Концентрации других оксидов также образуют отрицательные корреляции с MgO, подчиняясь тренду накопления железо-магнезиальных силикатов. Отрицательный тренд на диаграмме кремний – магний для тела Треугольник указывает, что фракционировал только оливин, тогда как в силле Икэн фракционирует ортопироксен и затем клино-

пироксен [23, 25]. Это хорошо видно по кальцию – происходит падение содержания кальция при низкой магнезиальности. Для глинозема такая хорошая отрицательная корреляция обусловлена тем, что при фракционировании оливина и пироксенов глинозем накапливается, а фракционирования плагиоклаза нет. Соотношения оксидов в породах силла Икэн более сложные, за исключением пары Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO. Это четко связано с порядком фракционирования минералов. На спайдер-диаграммах для пород обоих интрузивов характерны минимумы по Sr (рис. 11, 12), это может свидетельствовать, что плагиоклаз все же фракционировал [9, 26], по-видимому, всплывал и в данных телах он был потерян. Подтверждением этому могут

Таблица 4. Химические составы мафит-ультрамафитов интрузива Треугольник.

Компоненты	636	637	643	645	650	652	655	656	673	674
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	37.01	37.59	46.32	37.97	34.10	34.72	35.22	37.39	41.71	41.81
TiO <sub>2</sub>	0.43	0.33	0.52	0.27	0.23	0.22	0.34	0.30	0.6	0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.62	5.09	5.8	3.49	2.58	2.59	3.38	3.24	7.88	7.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.28	15.08	13.5	14.95	16.71	14.63	14.73	14.29	13.42	12.57
MnO	0.18	0.16	0.2	0.13	0.13	0.16	0.14	0.11	0.18	0.18
MgO	25.09	27.1	24.24	30.18	31.1	31.24	30.89	32.15	22.3	21.46
CaO	4.27	4.48	7.29	2.7	1.38	1.34	1.98	2.04	6.07	7.34
Na <sub>2</sub> O	0.68	0.38	0.64	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0.72	<0.25
K <sub>2</sub> O	0.09	0.04	0.12	0.07	0.07	0.06	0.10	0.11	0.17	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0.05	0.04
п.п.п.	7.97	8.49	1.36	9.25	12.22	13.71	11.89	9.20	5.93	8.78
Сумма	98.65	98.76	99.99	99.01	98.52	98.67	98.67	98.83	99.03	99.83
Ni	11149.30	10112.20	930.67	5636.48	10961.20	10325.10	8332.38	7636.25	7638.88	5315.61
Cu	1813.47	1460.79	85.12	1267.14	2147.12	2376.21	2207.73	1485.59	1139.00	2932.10
Co	197.82	190.92	70.64	147.60	223.08	223.79	177.99	161.53	140.69	133.96
Sc	11.69	14.94	26.82	13.78	7.80	7.47	8.08	9.15	17.35	15.22
Ti	3191.56	2361.70	3833.72	2092.11	1043.56	976.85	1455.35	1259.72	2119.40	1534.31
V	117.86	121.25	182.94	121.19	65.45	65.75	69.36	63.32	115.68	94.10
Cr	1684.42	2300.92	1635.09	2345.21	2050.66	2424.98	2105.65	1774.83	1853.95	1794.20
Mn	1142.35	1084.62	1424.05	893.56	693.22	903.44	750.60	578.59	724.70	737.49
Sr	63.20	30.93	41.00	17.60	11.22	12.03	13.48	30.55	58.56	29.41
Zr	23.13	14.68	21.56	11.49	11.73	12.04	18.04	18.00	40.32	19.46
Nb	0.54	0.18	0.61	0.46	0.07	0.08	0.43	0.13	0.45	0.32
La	2.47	1.34	2.55	1.44	1.03	1.12	1.86	1.64	2.44	1.42
Ce	5.79	3.38	6.17	3.39	2.55	2.68	4.40	3.83	6.12	3.96
Pr	0.65	0.31	0.71	0.28	0.12	0.13	0.36	0.28	0.80	0.54
Nd	3.79	2.39	4.23	2.10	1.54	1.58	2.58	2.28	4.34	3.26
Sm	0.91	0.56	1.04	0.40	0.22	0.23	0.45	0.40	1.26	1.00
Eu	0.18	0.06	0.20						0.37	0.24
Gd	1.26	0.86	1.51	0.61	0.36	0.36	0.64	0.56	1.66	1.35
Tb	0.01		0.05						0.18	0.14
Dy	1.17	0.88	1.55	0.60	0.31	0.30	0.55	0.49	1.59	1.34
Ho	0.06		0.13						0.25	0.20
Er	0.55	0.40	0.79	0.24	0.07	0.07	0.20	0.18	0.84	0.67
Tm									0.04	0.01
Yb	0.47	0.37	0.73	0.21	0.05	0.06	0.17	0.15	0.77	0.62
Lu									0.03	0.00
Hf	0.67	0.38	0.79	0.30	0.13	0.13	0.29	0.29	0.94	0.54
Ta				0.02						
P	233.07	152.83	228.56	202.72		30.42		73.48	73.12	96.41
Zn	27.10	36.91	40.88	139.67	22.54	48.29	17.35	15.22	44.72	41.11
Ga	5.65	4.95	6.63	3.94	2.16	2.59	2.71	2.62	5.66	6.04
Ge	1.09	1.18	1.39	1.08	0.77	0.83	0.83	0.85	1.04	0.98
Rb	1.82	1.12	2.47	1.35	1.17	1.57	1.92	1.95	1.99	0.90
Y	5.00	4.16	6.80	3.17	2.32	2.48	3.69	3.65	5.91	4.54
Te	1.26	1.03		0.44	0.67	0.71	0.56	0.45	0.64	0.52
Cs	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.09	0.03
Ba	33.62	21.66	36.76	20.31	21.44	18.54	27.69	31.70	40.95	17.51
Hg	0.03	0.02	0.01	0.26	0.00	0.03	0.04	0.04	0.01	0.35
Pb	1.86	1.60	1.02	2.05	2.16	3.84	2.51	2.42	1.51	3.21
Bi	0.11	0.10	0.03	0.07	0.10	0.10	0.09	0.06	0.05	0.09
Th	0.17	0.14	0.39	0.21	0.11	0.13	0.24	0.27	0.13	0.07
U	0.04	0.02	0.09	0.05	0.02	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02

Примечание. Здесь и далее значения главных элементов и п.п.п. даны в мас. %, элементы-примеси – в ppm. 1, 2, 9, 10 – оливиновые вебстериты, 3 – «безрудный» вебстерит, 4–8 – лерцолиты.

Таблица 5. Химические составы мафитит-ультрамафитов силла Икэн.

Компоненты	776	777	782	786	787	792	796	797	801
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	45.78	47.62	43.78	38.33	47.21	41.86	47.6	48.35	44.45
TiO <sub>2</sub>	1.57	1.44	0.79	2.58	0.94	3.15	0.92	0.96	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.62	14.71	11.72	13.6	12.52	15.31	12.35	13.00	8.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.99	16.15	15.51	19.86	13.95	20.86	13.61	12.59	15.32
MnO	0.21	0.17	0.19	0.1	0.19	0.23	0.2	0.19	0.19
MgO	8.72	4.85	14.28	6.62	12.69	6.6	13.6	12.58	18.1
CaO	6.54	5.57	9.47	6.26	9.17	7.35	9.17	8.83	7.61
Na <sub>2</sub> O	1.62	3.47	0.95	3.19	1.7	2.55	1.65	1.93	1.07
K <sub>2</sub> O	2.58	1.33	0.26	1.03	0.44	0.69	0.32	0.44	0.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.15	0.07	0.22	0.07	0.1	0.06	0.11	0.08
п.п.п.	2.31	3.33	1.76	5.76	1.11	1.28	0.52	1.02	1.87
Сумма	100.01	98.79	98.78	97.55	99.99	99.98	100.0	100.0	98.47
Ni	4757.50	14628.10	14156.70	34348.70	4017.51	6328.55	3218.62	2382.33	15784.10
Cu	1276.66	2279.26	3551.82	9088.44	905.61	2359.06	870.86	500.88	1754.70
Co	105.11	204.54	203.39	483.90	92.79	118.51	75.04	69.10	228.00
Sc	20.65	12.80	24.69	13.05	24.52	16.39	24.99	23.13	24.51
Ti	5582.48	5227.37	3064.11	10119.80	3767.80	13060.90	3800.75	4307.56	3317.51
V	173.99	84.16	198.79	149.32	212.42	441.07	215.70	194.61	176.24
Cr	495.04	123.29	1003.06	292.39	980.93	144.63	842.34	1169.23	1467.60
Mn	873.30	726.26	940.89	559.97	969.94	1188.68	1044.19	1099.80	1055.57
Sr	98.62	303.71	99.15	199.08	148.15	228.38	115.85	163.06	79.28
Zr	27.40	6.25	42.52	76.75	53.10	69.83	45.99	63.32	47.35
Nb	2.80	5.79	0.77	8.50	1.83	5.18		1.48	
La	11.15	14.16	3.64	15.89	6.39	10.37	5.38	7.51	5.65
Ce	28.23	28.95	9.70	41.09	15.82	26.17	13.28	17.88	14.21
Pr	3.87	3.37	1.02	5.19	1.69	3.06	1.67	2.20	1.77
Nd	17.79	14.09	6.40	25.89	9.07	15.51	8.49	10.63	8.59
Sm	4.32	2.70	1.63	5.84	2.07	3.49	2.12	2.48	2.01
Eu	0.97	1.00	0.33	1.56	0.49	0.97	0.62	0.72	0.54
Gd	5.06	2.99	2.32	7.09	2.73	4.44	2.77	3.09	2.53
Tb	0.67	0.32	0.07	0.68	0.13	0.35	0.31	0.34	0.26
Dy	4.41	2.26	2.16	5.26	2.43	3.67	2.54	2.71	2.29
Ho	0.83	0.40	0.18	0.76	0.23	0.46	0.42	0.44	0.35
Er	2.34	1.34	1.05	2.56	1.23	1.83	1.40	1.47	1.24
Tm	0.25	0.12	-	0.05			0.08	0.09	0.06
Yb	2.12	1.34	0.93	2.05	1.12	1.57	1.25	1.33	1.14
Lu	0.23	0.12	-	0.02			0.07	0.08	0.06
Hf	1.16	0.25	1.10	2.57	1.39	2.17	1.55	2.15	1.45
Ta	0.08	0.20	-	0.24		0.07			
P	-	423.39	-	740.20	167.49	143.42			
Zn	69.77	71.70	52.69	44.40	58.56	127.86	55.50	60.25	36.98
Ga	11.33	10.68	9.06	15.18	11.49	19.52	10.95	10.97	7.74
Ge	0.98	0.96	1.22	1.31	1.34	1.20	1.27	1.17	1.42
Rb	16.13	8.56	3.94	14.58	6.57	9.01	4.81	6.30	3.30
Y	15.05	8.96	9.48	22.49	11.74	14.91	8.97	8.67	8.24
Te	0.01	-	1.55	0.80	0.24	0.53	0.25	0.03	2.41
Cs	0.12	0.06	0.04	0.24	0.09	0.11	0.06	0.08	0.04
Ba	230.62	432.64	49.75	411.40	106.86	229.07	86.13	117.44	90.17
Hg	0.00	-	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01
Pb	1.23	4.14	3.87	6.08	2.95	8.34	2.59	2.59	1.80
Bi	0.03	0.12	0.08	0.24	0.01	0.03	0.02	0.02	0.10
Th	0.37	0.26	0.24	0.96	0.64	0.79	0.53	0.67	0.38
U	0.07	0.06	0.08	0.21	0.13	0.15	0.11	0.15	0.08

Примечание. 1, 2, 4, 6 – габбронориты, 3, 5, 7–9 – плагиоклазовые вебстериты.

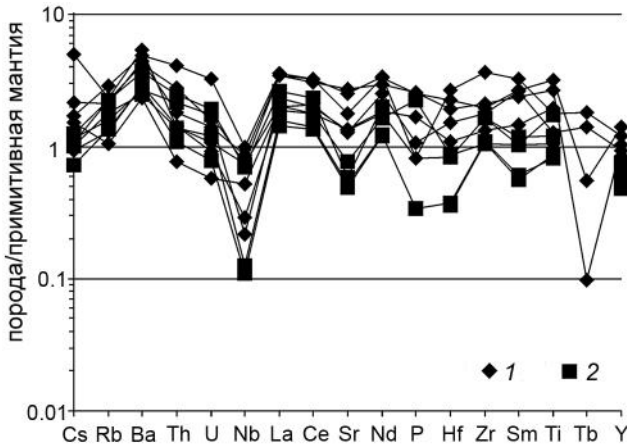


Рис. 11. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов в мафит-ультрамафитах интрузива Треугольник, нормированные к примитивной мантии [24].

1 – оливиновые вебстериты, 2 – перидолиты.

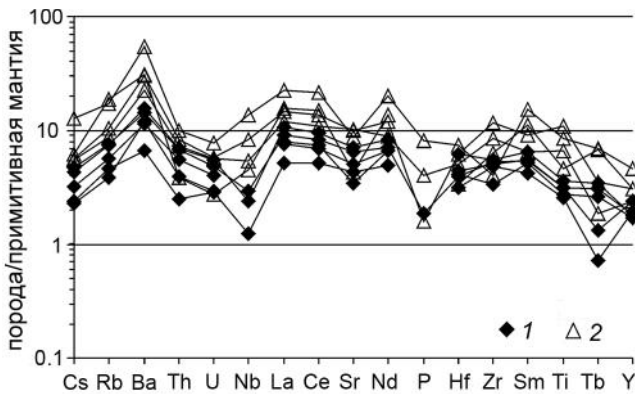


Рис. 12. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов в мафит-ультрамафитах силла Икэн, нормированные к примитивной мантии [24].

1 – вебстериты, 2 – габброиды (габбронориты и плагиовебстериты).

служить отдельные горизонты в разрезе этих тел как обогащенные плагиоклазом, так и без плагиоклаза.

Породы интрузива Треугольник характеризуются относительно низкими концентрациями редкоземельных элементов (REE) (табл. 4). Суммарные содержания REE в перидолитах колеблются от 4.4 до 12.3 г/т. В оливиновых вебстеритах концентрации этих элементов варьируются в более широких пределах: в кровле тела – 6.31–17.32 г/т, в подошве – 12.67–21.30 г/т. Более высокие содержания REE отмечены в прослое «безрудных» вебстеритов – 17.55–28.68 г/т. Графики распределения REE, нормированных к хондриту [24], как в перидолитах, так и в оливиновых вебстеритах идентичны [16, 18]. Они имеют сравнительно пологий, слабо отрицательный наклон тренда, демонстри-

руя обогащение LREE и MREE относительно HREE: в перидолитах –  $(La/Yb)_N = 4.6–14.7$  и  $(Sm/Yb)_N = 2.0–5.3$ , и умеренно фракционированное распределение в оливиновых вебстеритах:  $(La/Yb)_N = 1.6–3.5$  и  $(Sm/Yb)_N = 1.5–2.7$ . Кроме того, для них характерны отрицательные аномалии Eu и Tb. На многоэлементных диаграммах [24] оливиновые вебстериты и перидолиты обнаруживают сходное распределение LILE и HFSE (рис. 11). Близость нормализованных значений этих элементов определяет довольно сглаженную, субгоризонтальную форму кривых, особенно для вебстеритов. Общей геохимической особенностью пород интрузива Треугольник является отчетливо выраженный Nb минимум, наиболее проявленный в перидолитах. Другая отличительная черта перидолитов – отрицательные аномалии по Sr, Hf и менее выраженная по Sm. Характерная геохимическая особенность пород этого интрузива – высокие концентрации Sr и Ni (табл. 4)

В породах Икэнского силла концентрации REE более высокие, чем в перидолитах и оливиновых вебстеритах тела Треугольник: в габброидах – 50–286 г/т, в вебстеритах 20–56.8 г/т (табл. 5). REE в них, нормированные по хондриту [24], демонстрируют отрицательное близпараллельное расположение спектров [16, 18]. Распределение REE в габброидах характеризуется обогащением LREE и MREE относительно HREE  $(La/Yb)_N = 2.6–8.5$ ;  $(Sm/Yb)_N = 1.6–3.2$ . Для вебстеритов этого тела отмечается умеренный характер дифференциации REE в области LREE и MREE –  $(La/Yb)_N = 1.3–3.8$ ;  $(Sm/Yb)_N = 1.5–2.0$ , сходное с таковым в оливиновых вебстеритах интрузива Треугольник. На графиках распределения REE в породах силла Икэн, в отличие от таковых в ультрамафитах интрузива Треугольник, наблюдаются слабо проявленные «сглаженные» отрицательные аномалии Eu, Tb, Ho и аналогичные по величине отрицательные аномалии Tm и Lu. Следует отметить, что в габброидах отмечаются более высокие концентрации LREE по сравнению с MREE, тогда как в вебстеритах концентрации этих элементов находятся на одном уровне. На мультиэлементных диаграммах [24] LILE и HFSE литофильные элементы обнаруживают более высокий уровень накопления в габброидах по отношению к вебстеритам (рис. 12). Одной из геохимических особенностей вебстеритов являются низкие концентрации Nb, Ta и P, также как и в оливиновых вебстеритах интрузива Треугольник.

#### ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Геохимия таких петрогенных элементов, как Mg и Fe, в мафит-ультрамафитах является важным генетическим признаком, поэтому их распределение

в сосуществующих минералах отражает определенные условия магматической кристаллизации. В связи с этим рассмотрим характер поведения MgO (FeO) по разрезам изученных интрузивов, а также характер изменения химических составов породообразующих минералов более подробно. Анализ распределения оксида магния в породах разреза интрузива Треугольник выявил его параболический характер (рис. 5). Содержание MgO в оливиновых вебстеритах нижней части разреза (скв. 21) составляет 21.46 мас. %. По мере продвижения вверх по вертикали оно постепенно повышается и достигает максимальных значений (до 32.42 мас. %) на «плато» в центральной лерцолитовой части разреза, что обусловлено возрастанием содержания оливина и серпентина (по оливину) и повышением магнезиальности оливина и пироксенов. В верхней части разреза содержание MgO начинает снижаться, причем темп снижения содержания оксида магния близок темпу «накопления». Симметричный характер распределения MgO в породах интрузии по разрезу нарушает появление шестиметрового прослоя «безрудных» вебстеритов с низкими содержаниями Ni (0.12 %) и высокими – оксида железа (рис. 5). Химический состав сосуществующих оливина, орто- и клинопироксена вдоль разреза по вертикали интрузивного тела находится в соответствии с характером изменения магнезиальности пород. Эти особенности химизма и минералогии ультрамафитов тела Треугольник позволяют сделать предположение об одновременной кристаллизации в подошве и кровле интрузива, что могло способствовать накоплению флюидов в центральной его части, и быстром охлаждении расплава у контактов с постепенным снижением скорости остывания по мере удаления от них. В пользу быстрого охлаждения свидетельствуют мелко- и тонкозернистые структуры пород в подошве и кровле интрузива. Это объясняет постепенный переход от оливиновых вебстеритов в краевых частях тела к лерцолитам в центральной зоне. Побочным следствием такой направленной кристаллизации могла стать скрытая расслоенность. Вероятнее всего, сложившаяся петрохимическая структура была сформирована в результате одноактного внедрения магматической жидкости. Позднее структура интрузии была нарушена инъекцией дополнительной порции расплава с образованием прослоя «безрудных» вебстеритов. Судя по петрохимическим данным и составам минералов «безрудных вебстеритов», речь может идти о насыщенном низкотемпературными компонентами расплаве.

Характер распределения MgO (рис. 13) в породах и породообразующих минералах по разрезу сил-

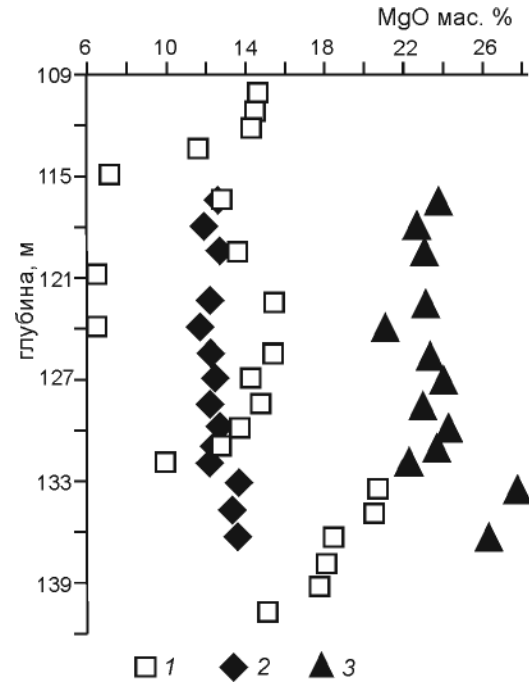


Рис. 13. Характер распределения MgO в породах и пироксенах по разрезу силла Икэн.

1 – породы, 2 – клинопироксены, 3 – ортопироксены.

ла Икэн (скв. 25) более сложный: содержание MgO в породе вблизи подошвы составляет 14.12 мас. %, выше по разрезу оно постепенно повышается и через 8 м достигает величины 19.78 мас. %. Аналогичные содержания MgO отмечаются в породе вблизи кровли; при этом в обоих случаях повышение содержания MgO, по всей вероятности, обусловлено тем, что магма была с кристаллами ортопироксена и, возможно, оливина, а затем после их одсадки идет кристаллизация в камере ортопироксена и клинопироксена, что может указывать на пульсационное заполнение камеры. Далее вверх по разрезу, в метровом интервале происходит резкое падение содержания MgO – до 9 мас. %. На протяжении следующих 8 метров отмечается постепенное увеличение содержания MgO от 9.6 до 14 мас. %, далее, в 2-х метровом интервале произошло резкое падение до 6.6 мас. %. Затем, в таком же интервале наблюдается возрастание содержания MgO до 14 мас. %, в следующем 3-х метровом интервале – очередное резкое понижение до 6.2 мас. %. Выше, на протяжении следующих нескольких метров – возрастание содержания MgO до 13.5 и далее снижение до 12.5 мас. %. На глубине 115 м отмечается очередное понижение содержания оксида магния до 7.2 мас. % и далее на протяжении 5 метров происходит постепенное возрастание до 14.5 мас. %. Распределение оксидов магния и железа в минералах-



кумулятах (пироксены и амфибол) демонстрирует устойчивый характер. Таким образом, по разрезу интрузии имеет место многократное чередование пород с более высокой и более низкой магнезиальностью, тогда как изменения химических составов кумулатов амфибола, орто- и клинопироксена незначительное. Закономерное изменение химизма пород в пределах отдельных ритмов свидетельствует, что расслоенная последовательность – это продукт единого развивающегося процесса, каким является очередная или новая инъекция магматической жидкости близкого состава. Многократное поступление рудонесущей магмы через магматический проводник приводило к сегрегации сульфидов и формированию прожилков, гнезд, их обогащению Ni, Cu, Co и благородными металлами [18].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что интрузив Треугольник состоит из амфиболсодержащих лерцолитов, роговообманковосодержащих оливиновых и плагиоклазсодержащих роговообманково-оливиновых вебстеритов. В Икэнском силле доминируют роговообманковые разновидности плагиовестеритов, габброноритов и вебстериты. Небольшие мощности при значительной протяженности бескорневых пластообразных тел, их ареальное распространение, тектонические контакты, расслоенность и ориентированные текстуры в лежачем и висячем боках интрузивов свидетельствуют, что их внедрение и затвердевание происходило в условиях подвижной среды [6]. После своего формирования тела мафит-ультрамафитов были вовлечены в процессы тектонического течения, что способствовало их бластомилонитизации и перемещению на более высокие горизонты.

Обособленность ультрамафитовой и мафитовой породных групп силлов Треугольник и Икэн, установленная на бинарной диаграмме, является свидетельством того, что эти тела соответствуют разным этапам фракционирования единой родоначальной магмы. Положение этих групп подчинено единому тренду, отражающему общую эволюцию состава пород. По минералого-петрографическим и геохимическим особенностям – это породы единого комплекса. Для пород обоих силлов характерно сочетание высоких содержаний Mg, Ni, Cr с низкими содержаниями Ti, щелочей, HREE, Nb, Ta, Yb [18]. По сравнению с ультрамафитами тела Треугольник, мафиты силла Икэн более обогащены Rb, Sr и Ba, а габброиды – также LREE при более низких содержаниях HREE и Ti; содержания последнего значительны только в габброидах. Несмотря на различия, вся совокупность исследуемых пород обладает в целом однотипным фракционированным трендом распределения REE. Положитель-

ные аномалии Ba, Rb, La, Ce в породах силла Икэн являются следствием наложения процессов динамометаморфизма, чему подтверждение – отрицательные аномалии U и Th [12, 21].

Малые тела кун-маньенского комплекса, по сути – небольшие магматические камеры, сложены породами с тонко-мелкозернистыми структурами, обусловленными высокой скоростью охлаждения. Рассматриваемые магматические тела в соответствии со способом внедрения и остывания магмы можно разделить на две группы: 1) закрытая система – магма внедряется в виде единого относительно быстрого акта и кристаллизуется без потери какой-либо части; 2) открытая система: магма внедряется неоднократно, отдельные внедрения разделены интервалом времени, достаточным для значительного охлаждения и образования кумулатов; возможно периодическое просачивание всплывающей магмы. В первую группу входит интрузив Треугольник; инъекция дополнительной порции расплава с образованием прослоя «безрудных» вебстеритов отделена значительным интервалом времени. Силл Икэн – открытая система: магма внедрялась неоднократно, отдельные порции внедрения разделены интервалом времени, достаточным для значительного охлаждения и образования кумулатов.

Состав исходного расплава был оценен для пород интрузивного тела Треугольник, где присутствуют «закалочные» фации, которые представлены тонко-мелкозернистыми оливиновыми вебстеритами. Сразу после внедрения магмы начинается закалка подошвы и кровли интрузива. Закалка внешних оторочек магматического тела обычно сопровождается понижением температуры ниже солидуса, так что валовый состав пород краевых фаций приблизительно соответствует исходной магме. Исходя из этого, примерный состав родоначального расплава следующий (мас. %):  $\text{SiO}_2 = 41.81$  %,  $\text{TiO}_2 = 0.50$  %,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7.06$  %,  $\text{FeO}(\text{общ.}) = 12.57$  %,  $\text{MnO} = 0.18$  %,  $\text{MgO} = 21.46$  %,  $\text{CaO} = 7.34$  %,  $\text{Na}_2\text{O} < 0.25$  %,  $\text{K}_2\text{O} < 0.09$  %,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.04$  %,  $\text{ppr} = 8.78$  %, что соответствует низкотитанистому высокофлюидному пикриту.

Согласно экспериментальным данным, между составом оливина (Ol) и равновесного по отношению к нему расплава (L) существует следующая зависимость  $(\text{Fe}/\text{Mg})\text{Ol}/(\text{Fe}/\text{Mg})\text{L} = 0.3$  [23]. Следовательно, оливин  $\text{Fo}_{85}$ , для которого  $\text{Fe}/\text{Mg} = 0.164$ , может кристаллизоваться из первичного расплава с  $\text{Fe}/\text{Mg} = 0.548$  (тело Треугольник). Эти значения показывают, что первичные мантийные жидкости представлены высокомагнезиальными расплавами, которые отвечают по составу пикритам и родственным им породам. Наиболее магнезиальные вкрапленники оливина в силле Икэн соответствуют  $\text{Fa}_{22}$  или  $f = 0.28$  ат. %,

следовательно этот оливин может кристаллизоваться из расплава с  $Fe/Mg = 0.94$ , т.е. из пикробазальта или оливинового базальта.

Для установления температурных параметров образования мафит-ультрамафитов рассматриваемых интрузивов использовались составы фаз минерального равновесия. Температура кристаллизации пироксенов оценивалась по [25]. По пироксенам можно оценить только субсолидусные температуры, для становления интрузивов важны ликвидусные температуры [20]. Полученные значения субсолидусных температур по этому геотермометру имеют для пород разреза интрузива Треугольник небольшой разброс, достигающий 60 градусов, который позволил сопоставить различные типы пород. Максимальные температуры кристаллизации, которые очень близки между собой, зафиксированы в минералах оливиновых вебстеритов верхнего и нижнего контактов тела – в среднем, около 857°C. В отличие от центральной части интрузива, затвердевание его краевых частей происходило в условиях резких температурных градиентов. При этом в краевых частях интрузива в результате переохлаждения интервалы кристаллизации у контактов сведены к минимуму, то есть близки к солидусу [20]. Более низкий температурный режим (в среднем 844°C) отвечает минеральному равновесию в лерцолитах, что хорошо согласуется с повышенным флюидным режимом кристаллизации интрузива [11]. Более простая ситуация с силлом Икэн. Здесь установлены также близкие температуры кристаллизации пород из его разреза, поскольку оценивались температуры кристаллизации минералов-кумулятов орто- и клинопироксенов. Все проанализированные образцы показали хорошую сходимость, средняя температура около 927°C. (Следует отметить, что полученные значения – субсолидусные температуры, никаким образом не связанные с температурой родоначальной магмы). Судя по составу заключенных фаций и с учетом пересчета на сухой остаток температура родоначальной магмы не ниже 1300°C. В целом, ультрамафиты тела Икэн, кристаллизующиеся на гипабиссальном уровне, уравновешены при более высоких температурах вследствие кристаллизации в «сухом» виде, поскольку остаточный магматический расплав был уже малофлюидным.

### ВЫВОДЫ

Петрохимические особенности, сходный график распределения РЗЭ и близкие отношения  $La/Sm = 1.6-3.8$  в породах интрузивных тел Треугольник и Икэн свидетельствуют о генетическом их родстве, т.е. об их происхождении из единой исходной магмы. Положение мафитовой (силл Икэн) и ультрамафитовой (силл Треугольник) породных групп, подчиненное

единому петрохимическому тренду, отражает общую эволюцию состава пород, отвечающих разным этапам фракционирования единой родоначальной магмы.

Обобщение всего имеющегося материала по интрузивному телу Треугольник и силлу Икэн позволяет прийти к выводу о том, что они сформировались в различных магматических камерах и из в разной степени фракционированной единой родоначальной магмы. Интрузив Треугольник, сложенный лерцолитами и оливиновыми вебстеритами, образовался в процессе фракционной кристаллизации пикритового расплава, по составу отвечающего оливиновым вебстеритам. Исходной магмой для пород Икэнского силла (вебстериты, плагио-вебстериты и габбро-ориты) послужил дифференциат, оставшийся после фракционирования кумулатов оливина, пироксенов, амфиболов из пикритового расплава при формировании лерцолитов и оливиновых вебстеритов интрузивного тела Треугольник.

В соответствии со способом внедрения и остывания магмы изученные интрузивы можно разделить на две группы. Тело Треугольник является закрытой системой; магма внедрялась в виде единого относительно быстрого акта и кристаллизовалась без потери какой-либо части. Силл Икэн – открытая система; магма внедрялась неоднократно, отдельные внедрения разделены интервалом времени, достаточным для значительного охлаждения и образования кумулатов.

Субсолидусные температуры для оливиновых вебстеритов нижнего и верхнего контактов интрузива Треугольник оцениваются около 857°C. Более низкий температурный режим – в среднем 844°C, отвечающий минеральному равновесию в лерцолитах, хорошо согласуется с повышенным флюидным режимом кристаллизации интрузива. Более простая ситуация – с силлом Икэн, для которого установлены также близкие температуры (около 927°C) кристаллизации минералов-кумулятов орто- и клинопироксенов из пород разреза. Температура родоначальной магмы для них, судя по приведенному выше составу пород и с учетом пересчета на сухой остаток, оценивается не ниже 1300°C. В целом, ультрамафиты тела Икэн, кристаллизующиеся на гипабиссальном уровне, уравновешены вследствие кристаллизации в «сухом» виде при более высоких температурах, поскольку остаточный магматический расплав был уже малофлюидным. Для интрузива Треугольник состав родоначальной магмы соответствует пикриту, для силла Икэн – пикробазальту.

Спецификой магматического расплава является обогащенность интрузивов флюидными компонентами, которая выражается в наличии минеральных фаз, богатых гидроксидом, – паргасита и флогопита, маг-

матических по происхождению. Прямая корреляция содержания глинозема и железа может указывать на кристаллизацию этих минералов в условиях высокого давления флюидов в расплаве.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д. г.-м. н. А.Э. Изоху (ИГМ СО РАН) и С.В. Высоцкому (ДВГИ ДВО РАН) за критический анализ и конструктивные замечания, позволившие улучшить качество рукописи.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 433–464; Кн. 2. С. 575–595.
2. Горбунов Г.И., Астафьев А.Ю., Гончаров Ю.В., Корчагин А.У., Нерадовский Ю.Н., Смолькин В.Ф., Соколов С.В., Шаров Н.В., Яковлев Ю.Н. Медно-никелевые месторождения Печенги. М.: ГЕОС, 1999. 236 с.
3. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Пересторонин А.Н., Петухова Л.Л., Потоцкий Ю.П., Соболев Л.П. Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита // Докл. АН. 2009. Т. 425, № 4. С. 505–508.
4. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Гвоздев В.И., Пересторонин А.Н., Петухова Л.Л. Платиноидно-медно-никелевое оруденение кунманьенского комплекса малых интрузий (юго-восток Алдано-Станового щита) // Платина России. Сб. науч. Трудов. Т. 7. Красноярск, 2011. С. 435–448.
5. Гурьянов В.А., Роганов Г.В., Зелепугин В.Н., Розинов М.И., Салтыкова Т.Е. Изотопно-геохронологические исследования цирконов раннедокембрийских пород юго-восточной части Алдано-Станового щита: новые результаты, их геологическая интерпретация // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 2. С. 3–21.
6. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Песков А.Ю., Петухова Л.Л., Пересторонин А.Н., Косынкин А.В. Платиноносность никеленосных мафит-ультрамафитов Пристанового коллизионного пояса (юго-восток Сибирской платформы) // Отч. геология. 2014. № 6. С. 48–56.
7. Кислов Е.В. Йоко-Довыренский расслоенный массив. Улан-Удэ: Из-во БНЦ, 1998. 264 с.
8. Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. М.: Недра, 1997. 248 с.
9. Кокс К.Г., Бел Дж.Д., Панкхерст З.Дж. Интерпретация изверженных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.
10. Магматические горные породы. Ультраосновные породы. Т. 5. М.: Наука, 1988. 507 с.
11. Мельник Ю.П. Термодинамические свойства газов в условиях глубинного петрогенезиса. Киев: Наукова Думка, 1978. 150 с.
12. Методика геодинамического анализа при геологическом картировании. Мин-во геол. СССР, АН СССР, Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов / Под ред. Н.В. Межеловского). М.: Недра, 1991. 204 с.
13. Мишкин М.А., Лениников А.М., Вовна Г.М., Бадрединов З.Г., Октябрьский Р.А. (2007) Геохимия и исходная природа метабазит-эндербитовой ассоциации Джугджурского блока (Алданский щит) // Геохимия. 2007. № 6. С. 608–623.
14. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. СПб.: СПбГУ, 2003. 487 с.
15. Песков А.Ю., Диденко А.Н., Гурьянов В.А. Эволюция палеопротерозойского мафит-ультрамафитового магматизма Кун-Маньенского рудного поля (Алдано-Становой щит) по палеомагнитным данным // Тихоокеан. геология. 2018. Т. 37, № 5. С. 3–15.
16. Петухова Л.Л., Гурьянов В.А., Приходько В.С. Палеопротерозойские малые интрузии мафит-ультрамафитов с Cu-Ni сульфидной минерализацией на юго-востоке Алдано-Станового щита // Петрография магматических и метаморфических горных пород. Материалы XII Всерос. Петрограф. совещания. Петрозаводск: Кольский научный центр РАН, 2015. С. 351–353.
17. Пономарев Г.П., Пузанков М. Ю., «Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островолужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. 428 с.
18. Приходько В.С., Петухова Л.Л., Гурьянов В.А.. Природа малых тел палеопротерозойских мафит-ультрамафитов, развитых на юго-востоке Алдано-Станового щита // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы V Международн. конф. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2017. С. 219–220.
19. Ферштатер Г.Б. Петрология главных типов интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 1987. 232 с.
20. Шарков Е.В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М.: Науч. мир. 368 с.
21. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
22. Leake B.E., Wolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Maresch W.V., Nickel E.H., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Yozhi G. Nomenclatura of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // Can. Mineral. 1997. V. 335. P. 219–246.
23. Roeder P.L., Emslie R.F. Olivine-liquid equilibrium / Contrib. Mineral. Petrol. 1970. V. 29. N 4. P. 275–289.
24. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the oceanic basins / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry/ Geol. Soc. London.: Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
25. Wells P.R.A. Pyroxene thermobarometry in single and complex systems // Contr. Mineral. Petrol. 1977. V. 62. P. 129–139.
26. Wood D.A., Joron J.L., Treuil M., Norry M., Tarney J. Elemental and Sr isotope variation in basic from Iceland and surrounding ocean floor // Contrib. Mineral. Petrol. 1979. V. 70. P. 319–339.
27. [www.tvforex.ru/metal/1914-amur-minerals-poluchit.html](http://www.tvforex.ru/metal/1914-amur-minerals-poluchit.html).

Рекомендована к печати Ю.А. Мартыновым

после доработки 24.05.2019 г.  
принята к печати 13.11.2019 г.

*V.S. Prikhod'ko, L.L. Petukhova, V.A. Guriyanov, V.M. Chubarov*

**Petrology of small bodies from nickel-bearing mafite-ultramafites of the southeastern Aldan-Stanovoy Shield**

The nature of mafite-ultramafite bodies of the southeastern Aldan-Stanovoy Shield is considered on the example of the Kuhn-Magnen ore field. They played an important role in the formation of the copper-nickel sulfide Kuhn-Magne deposit, where they acted as conductors of sulfide-bearing igneous melts. A detailed mineralogical and geochemical study with point-to-point testing was carried out on the core of two wells 21 and 25 from the intrusive bodies Treugolnik and Icen, respectively. The data obtained indicate their origin from a single source magma. It is shown that the formation of small intrusions of Treugolnik and Icen occurred in different-depth magmatic chambers in the process of cotectic crystallization of dark-colored minerals from the initial picrite (Treugolnik body) and intermediate picrobasalt (Icen body) melts. A comparative analysis of the results of petrogeochemical and mineralogical studies suggests that the intrusive Treugolnik was formed as a closed system: magma intruded as a single relatively rapid act and crystallized without losing any part; whereas the formation of sill Icen was carried out by an open system due to the successive different-aged injections of individual portions of the melt. After their crystallization, magmatic bodies together with the host metamorphic rocks were involved in tectonic deformation processes.

**Key words:** intrusion, mafite-ultramafite, sulfide, websterite, crystallization, Kuhn-Magnen ore field, Aldan-Stanovoy Shield, Far East of Russia.