



УДК 550.4+551.14+552.11

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.3>

Соотношения пород примитивной мантии, реститов и метасоматитов во включениях базанитов вулкана Карьерный (Западное Прибайкалье)

Ю. Аило

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия
Университет Аль-Фурат, г. Дейр-эз-Зор, Сирия*

С. В. Рассказов, И. С. Чувашова

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия
Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Т. А. Ясныгина

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Глубинные включения вулканов Карьерный и Сухой восточной части Тункинской долины маркируют северную границу распространения глубинного зеленого (с хромдиопсидом) ксеногенного материала на территории Хамар-Дабанского террейна, совпадающую с изоградой гиперстена фации гранулитового метаморфизма Слюдянского кристаллического комплекса. Изучено новое местонахождение глубинных включений в лавах вулкана Карьерный, в котором были найдены зеленые перидотиты (с хромдиопсидом) и черные пироксениты (с авгитом). Изучение зеленых перидотитов показало преобладание среди них шпинелевых и бесшпинелевых лерцолитов при подчиненной роли флогопитовых верлитов, шпинелевых гарцбургитов и оливиновых вебстеритов. По содержаниям петрогенных оксидов выделены: 1) породы, близкие к примитивной мантии, 2) реститы и 3) метасоматиты. На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb породы первой группы соответствуют мантийному направлению, а породы двух других групп смещены в область коровых составов. Исходя из температурных оценок 845–971 °С (термометр Нимиса – Тэйлора), полученных для преобладающей группы реститов, предполагается их происхождение из слоя литосферы мощностью порядка 3 км, в подошве которого находятся породы, близкие к примитивной мантии (температура 967 °С), а в кровле – метасоматиты (температуры 825–863 °С).

Ключевые слова: мантия, литосфера, базальт, глубинное включение, Тункинская долина.

Для цитирования: Соотношения пород примитивной мантии, реститов и метасоматитов во включениях базанитов вулкана Карьерный (Западное Прибайкалье) / Ю. Аило, С. В. Рассказов, И. С. Чувашова, Т. А. Ясныгина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 29. С. 3–23. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.3>

Введение

Включения из щелочных базальтоидов несут информацию о составе и температурном состоянии пород хрупкой оболочки (литосферы) и области перехода от нее к подстилающей пластичной среде (астеносфере). Особый

интерес представляют глубинные породы, захваченные базальтоидными расплавами в осевых структурах рифтовых зон, поскольку появляется возможность тестирования гипотетических моделей развития рифтового процесса. Одной из ключевых территорий, на которой можно получить непосредственную информацию о глубинных породах коры и подстилающей мантии по включениям из щелочных базальтоидов, является Тункинская долина, заложенная вдоль простирания метаморфических зон Слюдянского кристаллического комплекса – метаморфического субтеррейна Хамар-Дабанского террейна, столкнувшегося с фундаментом Сибирского континента [Террейны Байкал-Хубсугульского ... , 2006].

В вулканических породах Тункинской долины глубинные включения были впервые отмечены Н. Я. Волянюком и др. [Волянюк, Семенова, 1975а, б] в породах некка Сухой (хр. Камар восточного окончания долины) и лавр. Хобок (Тункинская впадина центральной части долины). Позже в центральной части долины была выявлена поперечная смена состава глубинных включений в направлении с севера на юг, от Тункинских гольцов через впадину к южному склону хр. Хамар-Дабан. Ассоциации включений обозначили породы коры и коро-мантийного перехода, отторженные поднимавшимися щелочно-базальтовыми и базанитовыми расплавами вдоль главного рельефообразующего разлома, погружающегося от Тункинских гольцов под Хамар-Дабан [Расказов, Богданов, Медведева, 1992]. Состав включений менялся от амфиболсодержащих на Тункинских гольцах через преимущественно черные включения (с авгитом) в центральной части Тункинской впадины (Хобок), зеленые фассаитсодержащие породы в ее юго-восточной части (Иркут) к ассоциации черных (с авгитом) и зеленых (с хромдиопсидом) на склоне хр. Хамар-Дабан (Козья Шейка). Степень окисленности железа в клинопироксенах и шпинели менялась в соответствии с метаморфической зональностью Слюдянского комплекса. В зоне гранулитового метаморфизма, соответствующей центральной части Тункинской впадины, включения характеризовались восстановленным железом. При переходе в зону амфиболитового метаморфизма степень окисленности железа варьировала от восстановленного до окисленного состояния.

Кроме местонахождения некка Сухой восточной части долины, глубинные включения были обнаружены в базанитовом покрове на структурной перемычке между Быстринской и Торской впадинами. В 2015 г. базанитовый покров был вскрыт карьером, в котором обнажились кластотуфы вулканической постройки, получившей название вулкана Карьерный [Базальты Быстринской зоны ... , 2018]. Благодаря карьерной выработке появилась возможность отбора представительной коллекции глубинных пород и их сопоставления с глубинными породами прежде изученных местонахождений. В настоящей работе приводятся первые результаты изучения состава глубинных включений зеленой группы с хромдиопсидом с определением их систематики и вероятного происхождения из единого литосферного слоя мантии.

Методика аналитических исследований

Содержания петрогенных оксидов в вулканических породах и их глубинных включениях определялись методом «мокрой химии» (химик-аналитик – Е. Г. Колтунова), микроэлементов – методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ИСП-МС) с использованием масс-спектрометра Agilent 7500se (пробоподготовка химика-аналитика М. Е. Марковой, измерения А. П. Чебыкина). Методика исследований приведена в работе [Калиева и калинатровая ... , 2012].

Элементный анализ оливинов, пироксенов и шпинелей выполнен с использованием электронно-зондового микроанализатора Superprobe JXA-8200 фирмы Jeol (Япония) (аналитик – Л. Ф. Суворова). Проводилась съемка пятью спектрометрами с волновой дисперсией при аналитических условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 20 нА, диаметр пучка электронов 1 мкм, время счета импульсов 10 с на пике линии, фона – по 5 с с каждой стороны от линии. Для регистрации аналитического сигнала микрокомпонентов использовался светосильный Н-тип рентгеновского спектрометра.

Структурное положение и возраст вулкана Карьерный

Тункинская рифтовая долина примыкает к Южно-Байкальской впадине с запада и состоит из шести впадин (с запада на восток): Мондинской, Хойтогорской, Туранской, Тункинской, Торской и Быстринской. Впадины разделены междувпадинными перемычками. Долина ограничена с севера крутым склоном Тункинских гольцов, а с юга – пологим склоном хребтов Мунку-Сардык, Ургудеевский и Хамар-Дабан. Средний сегмент долины составляет наиболее крупная (65×32 км) Тункинская впадина глубиной более 2500 м. Другие впадины, расположенные восточнее и западнее, имеют меньшие размеры и глубины.

На западном побережье оз. Байкал вулканизм проявился в трех зонах: Камарской, Становой и Быстринской. Камарская и Быстринская зоны протягиваются на 20 км каждая. Между ними приблизительно такое же расстояние. Протяженность Становой зоны на одну треть меньше. Расстояние между Камарской и Становой зонами составляет не более 10 км (рис. 1).

Докайнозойский фундамент территории представляет собой коллизионную границу Слюдянского блока, аккретированного к краю архейского Шарыжалгайского кристаллического блока Сибирской платформы в раннем палеозое, около 480 млн лет назад. В Слюдянском зональном метаморфическом комплексе Камарская и Быстринская вулканические зоны заключены в блоке гранулитового метаморфизма и утыкаются в главный Саянский разлом, тектониты которого круто погружаются в северо-северо-восточном направлении, под Шарыжалгайский блок. Становая зона находится во внутренней части Слюдянского блока и, в отличие от двух других зон, пересекает изограду гиперстена.

Глубинные включения вулканов Карьерный и Сухой восточной части Тункинской долины маркируют северную границу распространения глубинного зеленого (с хромдиопсидом) ксеногенного материала на территории Хамар-Дабанского террейна, совпадающую с изоградой гиперстена фации гранулитового метаморфизма.

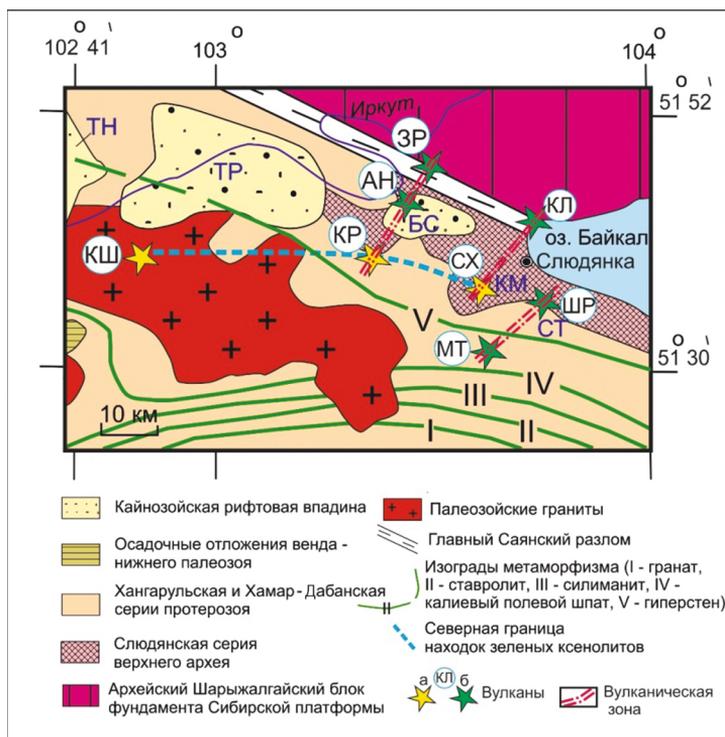


Рис. 1. Геологическая схема фундамента

Вулканы: *а* – с глубинными включениями: КР – Карьерный, СХ – Сухой, КШ – Козья Шейка; *б* – без глубинных включений: КЛ – Култукский, ШР – Широкий, МТ – Метео, АН – Анчукский, ЗР – Зыркузунский; вулканические зоны: БС – Быстринская, КМ – Камарская, СТ – Становая; впадины: ТН – Тункинская, ТР – Торская. Схема составлена с использованием работ [Шафеев, 1970; Култукский вулкан: пространственно ... , 2013]

Молодые впадины Тункинской рифтовой долины унаследовали коллизионную границу. Камарская и Быстринская вулканические зоны пересекают осевую структуру рифтовой долины. Камарская выходит непосредственно на край Южно-Байкальской впадины, Быстринская – находится на перемычке между Быстринской и Торской впадинами. Быстринская впадина активно прогибалась с накоплением неоген-четвертичных отложений, но в неоплейстоцене была вовлечена в инверсионные восходящие движения.

Датирование образца TN-15-05 вулкана Карьерный К–Аг-методом показало возраст вулкана $13,2 \pm 1,5$ млн лет ($K_2O = 1,85$ мас. %, $^{40}Ar_{рад} = 7,92 \times 10^{-4}$ нмм³/г, $Ar_{возд} = 92$ %). Эта датировка сопоставляется с интервалом датировок 13,4–11,7 млн лет, полученным для пород верхнего пакета вулкана Сухой Камарской зоны [Култукский вулкан: пространственно ... , 2013]. Таким образом, вулканы с глубинными включениями (Карьерный и Сухой) проявили активность в Быстринской и Камарской зонах в одно время (около 13 млн лет назад) [Базальты Быстринской зоны ... , 2018].

Общая характеристика включений

В лавах вулкана Карьерный глубинные включения представлены зелеными перидотитами (с хромдиопсидом) и черными пироксенитами (с авгитом). Собранная коллекция включений составляет около 200 образцов. Размер включений – до 20 см. По соотношениям оливина (Ol), ортопироксена (Orx) и клинопироксена (Cpx) [Streckeisen, 1973] в составе зеленых пород преобладают шпинелевые и бесшпинелевые лерцолиты, реже встречаются флогопитовые верлиты, шпинелевые гарцбургиты и оливиновые вебстериты.

Шпинелевые лерцолиты макроскопически представляют собой светло-зеленые полнокристаллические породы, сложенные бесцветным до бледно-желтого оливином (40–70 %), светлым коричнево-серым, иногда с зеленоватым оттенком, ортопироксеном (10–25 %), изумрудно-зеленым хромдиопсидом (10–25 %), смоляно-черной хромшпинелью (до 15 %) (образцы: BS-16-1, BS-16-3, BS-16-4, BS-16-6, BS-16-8, BS-16-9, BS-16-10, BS-16-11, BS-16-12, BS-16-14, BS-16-15 и BS-16-16).

Структура шпинелевых лерцолитов – от мелко- до среднезернистой. Зерна оливина и ромбического пироксена достигают 3 мм. Шпинель редко превышает 1 мм. Ортопироксен обычно представлен индивидуальными зернами. Иногда встречаются его крупные порфириформные выделения. В образце BS-16-11 ортопироксен включает зерна шпинели. Диопсид представлен зернами от 2 мм до зерен мельчайшего размера. Хромшпинель ксеноморфна по отношению к силикатным минералам. Под биноклем имеет черную окраску, в проходящем свете под микроскопом – бурую. В шпинели наблюдаются включения оливина.

Бесшпинелевые лерцолиты представляют собой зеленые породы, сложенные бесцветным до бледно-желтого оливином, светло-коричнево-серым, иногда с зеленоватым оттенком, ортопироксеном, изумрудно-зеленым хромдиопсидом. Шпинель отсутствует в образце BS-16-7.

Флогопитовые верлиты зеленоватой окраски, среднезернистой структуры сложены оливином (40–50 %), клинопироксеном (30–35 %), слюдой (10–15 %) и черной акцессорной хромшпинелью. Флогопит обнаружен в верлите образца BS-16-2.

Шпинелевые гарцбургиты – бутыльно-зеленые породы, сложенные бледно-желтым оливином (60–70 %), светло-коричнево-серым ортопироксеном (15–20 %), черной хромшпинелью (10 %) и акцессорным изумрудно-зеленым хромдиопсидом (5 %). От лерцолитов данная порода отличается меньшим содержанием клинопироксена (эти породы характеризуют лерцолитовым парагенезисом минералов). Гарцбургитовый состав характеризует образец BS-16-13.

Оливиновые вебстериты – темно-зеленые среднезернистые породы, сложенные оливином (35–40 %), ортопироксеном (40–45 %), клинопироксеном (20 %) и черной акцессорной шпинелью. Такой состав имеет образец BS-16-5.

На диаграмме $MgSiO_3 - FeSiO_3 - CaSiO_3$ [Paldervart, Hess, 1951; Ginzburg, 1975] клинопироксены зеленых глубинных включений попадают в

область диопсида, ортопироксены – в область энстатита. По данным микрозондового анализа (табл. 1), в состав минералов шпинелевых лерцолитов входят: оливин (89–91 % форстерита), диопсид $\text{En}_{48-50}\text{Wo}_{47-48}\text{Fs}_{3-5}$, энстатит $\text{En}_{89-91}\text{Wo}_1\text{Fs}_{8-10}$ и хромшпинель ($100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) = 67-72$).

Таблица 1

Концентрации оксидов (мас. %) в породообразующих минералах глубинных включений из базанитов вулкана Карьерный

| Компонент | OL | SP | CPX | OPX | OL | SP | CPX | OPX |
|--------------------------------|----------------|-------|-------|--------|----------------|-------|-------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| № образца | BS-16-1 | | | | BS-16-2 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,60 | 0,00 | 53,93 | 57,08 | 41,49 | 0,00 | 54,81 | - |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | - |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 43,02 | 3,21 | 2,64 | 0,00 | 25,69 | 1,90 | - |
| FeO ^l | 8,99 | 26,09 | 2,10 | 5,62 | 9,56 | 43,09 | 2,13 | - |
| MgO | 48,74 | 12,25 | 16,30 | 34,08 | 48,24 | 15,35 | 16,97 | - |
| MnO | 0,17 | 18,09 | 0,08 | 0,09 | 0,17 | 15,15 | 0,11 | - |
| CaO | 0,00 | 0,17 | 22,22 | 0,40 | 0,00 | 0,25 | 22,39 | - |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,61 | - |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,89 | 0,41 | 0,00 | 0,00 | 0,92 | - |
| NiO | 0,36 | 0,28 | 0,00 | 0,10 | 0,33 | 0,09 | 0,00 | - |
| Сумма | 99,86 | 99,99 | 99,47 | 100,42 | 99,79 | 99,62 | 99,83 | - |
| Fo | 90,46 | | | | 89,83 | | | |
| Cr#Sp | | 28,91 | | | | 52,95 | | |
| Mg#Sp | | 72 | | | | 64 | | |
| En | | | 48,73 | 90,84 | | | 49,53 | - |
| Wo | | | 47,76 | 0,77 | | | 46,98 | - |
| Fs | | | 3,51 | 8,39 | | | 3,49 | - |
| № образца | BS-16-3 | | | | BS-16-4 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 42,18 | 0,00 | 53,19 | 56,63 | 41,08 | 0,00 | 54,61 | 57,17 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,06 | 0,37 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 40,99 | 4,54 | 2,61 | 0,00 | 36,27 | 2,93 | 2,05 |
| FeO ^l | 9,28 | 27,83 | 2,11 | 5,70 | 9,50 | 32,41 | 2,23 | 5,79 |
| MgO | 48,46 | 13,30 | 15,44 | 34,05 | 48,62 | 13,75 | 16,18 | 34,14 |
| MnO | 0,16 | 17,38 | 0,09 | 0,13 | 0,15 | 16,54 | 0,07 | 0,14 |
| CaO | 0,00 | 0,16 | 20,87 | 0,43 | 0,00 | 0,20 | 21,56 | 0,49 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 1,81 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,119 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 1,38 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 1,05 | 0,45 |
| NiO | 0,38 | 0,20 | 0,00 | 0,08 | 0,37 | 0,16 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,46 | 99,92 | 99,79 | 100,29 | 99,73 | 99,32 | 99,75 | 100,20 |
| Fo | 90,15 | | | | 89,97 | | | |
| Cr#Sp | | 31,29 | | | | 37,48 | | |
| Mg#Sp | | 70 | | | | 68 | | |
| En | | | 48,81 | 90,66 | | | 49,14 | 90,47 |
| Wo | | | 47,44 | 0,83 | | | 47,06 | 0,93 |
| Fs | | | 3,74 | 8,51 | | | 3,80 | 8,60 |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|----------------|---|-------|--------|----------------|--------|-------|--------|
| № образца | BS-16-5 | | | | BS-16-6 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,48 | - | 52,67 | 56,75 | 41,33 | 0,00 | 53,12 | 57,37 |
| TiO ₂ | 0,00 | - | 0,21 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | - | 5,29 | 3,17 | 0,00 | 42,79 | 3,77 | 2,50 |
| FeO ¹ | 9,54 | - | 2,28 | 5,98 | 9,02 | 26,51 | 2,17 | 5,37 |
| MgO | 48,58 | - | 15,34 | 33,47 | 48,56 | 12,66 | 16,19 | 33,84 |
| MnO | 0,15 | - | 0,10 | 0,15 | 0,12 | 17,92 | 0,071 | 0,15 |
| CaO | 0,00 | - | 21,25 | 0,49 | 0,00 | 0,16 | 22,18 | 0,48 |
| Na ₂ O | 0,00 | - | 1,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,92 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | - | 0,55 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 1,16 | 0,42 |
| NiO | 0,31 | - | 0,00 | 0,08 | 0,44 | 0,28 | 0,00 | 0,09 |
| Сумма | 100,05 | - | 99,34 | 100,29 | 99,47 | 100,39 | 99,65 | 100,21 |
| Fo | 89,94 | | | | 90,45 | | | |
| Cr#Sp | | - | | | | 29,36 | | |
| Mg#Sp | | - | | | | 72 | | |
| En | | | 48,10 | 90,04 | | | 48,54 | 90,98 |
| Wo | | | 47,89 | 0,94 | | | 47,81 | 0,93 |
| Fs | | | 4,01 | 9,02 | | | 3,65 | 8,09 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|----------------|---|--------|--------|----------------|-------|-------|-------|
| № образца | BS-16-7 | | | | BS-16-8 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,66 | - | 53,38 | 55,87 | 41,3 | 0,00 | 54,02 | 56,56 |
| TiO ₂ | 0,00 | - | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,07 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | - | 3,63 | 2,85 | 0,00 | 37,04 | 3,64 | 2,37 |
| FeO ¹ | 9,16 | - | 2,29 | 6,02 | 9,34 | 31,24 | 1,95 | 5,66 |
| MgO | 48,03 | - | 16,21 | 33,99 | 48,41 | 13,72 | 15,74 | 34,08 |
| MnO | 0,14 | - | 0,07 | 0,17 | 0,09 | 16,50 | 0,07 | 0,17 |
| CaO | 0,00 | - | 22,53 | 0,51 | 0,00 | 0,17 | 21,53 | 0,46 |
| Na ₂ O | 0,00 | - | 0,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | - | 1,00 | 0,53 | 0,00 | 0,00 | 1,44 | 0,50 |
| NiO | 0,39 | - | 0,00 | 0,12 | 0,40 | 0,20 | 0,00 | 0,11 |
| Сумма | 99,38 | - | 100,20 | 100,06 | 99,54 | 99,00 | 99,84 | 99,89 |
| Fo | 90,20 | | | | 90,14 | | | |
| Cr#Sp | | - | | | | 36,13 | | |
| Mg#Sp | | - | | | | 68 | | |
| En | | | 48,12 | 90,08 | | | 48,72 | 90,68 |
| Wo | | | 48,07 | 0,97 | | | 47,90 | 0,88 |
| Fs | | | 3,81 | 8,95 | | | 3,38 | 8,44 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|
| № образца | BS-16-9 | | | | BS-16-10 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 40,88 | 0,00 | 53,25 | 56,83 | 41,18 | 0,00 | 54,18 | 56,42 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,15 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 40,50 | 2,79 | 2,14 | 0,00 | 45,04 | 2,70 | 2,97 |
| FeO ¹ | 10,06 | 28,69 | 2,19 | 6,52 | 8,91 | 23,78 | 2,11 | 5,56 |
| MgO | 48,08 | 13,10 | 16,7 | 33,89 | 48,92 | 12,52 | 16,83 | 33,97 |
| MnO | 0,18 | 17,06 | 0,06 | 0,11 | 0,18 | 18,29 | 0,11 | 0,11 |
| CaO | 0,00 | 0,18 | 23,01 | 0,47 | 0,00 | 0,15 | 23,10 | 0,42 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,37 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,88 | 0,34 | 0,00 | 0,00 | 0,55 | 0,44 |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|
| № образца | BS-16-9 | | | | BS-16-10 | | | |
| NiO | 0,36 | 0,22 | 0,00 | 0,00 | 0,35 | 0,31 | 0,00 | 0,08 |
| Сумма | 99,57 | 99,90 | 99,30 | 100,30 | 99,60 | 100,09 | 100,12 | 99,97 |
| Fo | 89,33 | | | | 90,56 | | | |
| Cr#Sp | | 32,22 | | | | 26,15 | | |
| Mg#Sp | | 70 | | | | 72 | | |
| En | | | 48,44 | 89,46 | | | 48,61 | 90,86 |
| Wo | | | 47,99 | 0,89 | | | 47,96 | 0,81 |
| Fs | | | 3,57 | 9,65 | | | 3,42 | 8,33 |
| № образца | BS-16-11 | | | | BS-16-12 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,51 | 1,00 | 52,41 | 55,91 | 41,21 | 0,00 | 54,01 | 56,62 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,31 | 0,38 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 38,71 | 6,32 | 4,09 | 0,00 | 43,57 | 3,58 | 2,63 |
| FeO ^I | 9,65 | 30,07 | 3,00 | 6,39 | 9,25 | 23,58 | 2,00 | 5,85 |
| MgO | 48,04 | 13,63 | 14,95 | 32,82 | 48,90 | 14,28 | 15,91 | 33,81 |
| MnO | 0,18 | 17,02 | 0,04 | 0,18 | 0,13 | 17,77 | 0,06 | 0,14 |
| CaO | 0,00 | 0,19 | 20,39 | 0,62 | 0,00 | 0,13 | 21,63 | 0,52 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 1,89 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 1,31 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,71 | 0,39 | 0,00 | 0,00 | 1,34 | 0,46 |
| NiO | 0,36 | 0,17 | 0,00 | 0,10 | 0,38 | 0,34 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 99,73 | 101,10 | 100,10 | 100,68 | 99,88 | 99,67 | 99,84 | 100,04 |
| Fo | 89,71 | | | | 90,28 | | | |
| Cr#Sp | | 34,26 | | | | 26,63 | | |
| Mg#Sp | | 69 | | | | 69 | | |
| En | | | 47,79 | 89,06 | | | 48,84 | 90,24 |
| Wo | | | 46,84 | 1,20 | | | 47,72 | 1,00 |
| Fs | | | 5,37 | 9,73 | | | 3,44 | 8,75 |
| № образца | BS-16-13 | | | | BS-16-14 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,06 | 0,00 | 53,22 | 56,77 | 41,81 | 0,00 | 54,68 | 57,04 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,33 | 0,09 | 0,00 | 0,12 | 0,09 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 44,30 | 3,11 | 2,60 | 0,00 | 30,99 | 3,18 | 2,65 |
| FeO ^I | 9,49 | 24,35 | 2,31 | 6,20 | 9,02 | 37,54 | 2,102 | 5,38 |
| MgO | 48,11 | 11,85 | 16,67 | 33,77 | 48,6 | 13,72 | 16,42 | 34,22 |
| MnO | 0,12 | 18,46 | 0,09 | 0,14 | 1,00 | 15,97 | 0,07 | 0,11 |
| CaO | 0,00 | 0,15 | 22,8 | 0,51 | 0,00 | 0,20 | 22,39 | 0,41 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,69 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,66 | 0,32 | 0,00 | 0,00 | 0,86 | 0,45 |
| NiO | 0,39 | 0,25 | 0,00 | 0,09 | 0,39 | 0,14 | 0,00 | 0,13 |
| Сумма | 99,17 | 99,36 | 99,6 | 100,48 | 99,92 | 98,67 | 100,5 | 100,39 |
| Fo | 89,92 | | | | 90,48 | | | |
| Cr#Sp | | 26,94 | | | | 44,83 | | |
| Mg#Sp | | 74 | | | | 67 | | |
| En | | | 48,52 | 89,78 | | | 48,74 | 91,17 |
| Wo | | | 47,70 | 0,97 | | | 47,76 | 0,79 |
| Fs | | | 3,78 | 9,25 | | | 3,50 | 8,04 |

Окончание табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|-----------------|-------|--------|-------|-----------------|--------|--------|-------|
| № образца | BS-16-15 | | | | BS-16-16 | | | |
| SiO ₂ , мас. % | 41,46 | 0,00 | 55,05 | 56,67 | 41,53 | 0,00 | 55,14 | 56,87 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,11 | 0,00 | 0,16 | 0,10 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 32,18 | 2,93 | 1,64 | 0,00 | 32,74 | 3,59 | 2,04 |
| FeO [†] | 8,88 | 36,81 | 2,27 | 5,73 | 8,87 | 36,65 | 1,94 | 5,45 |
| MgO | 48,69 | 14,22 | 15,96 | 34,53 | 48,74 | 14,35 | 15,69 | 34,33 |
| MnO | 0,12 | 16,21 | 0,08 | 0,18 | 0,16 | 16,42 | 0,03 | 0,11 |
| CaO | 0,00 | 0,17 | 21,22 | 0,40 | 0,00 | 0,17 | 20,72 | 0,51 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 1,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,59 | 0,00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 1,17 | 0,48 | 0,00 | 0,00 | 1,49 | 0,50 |
| NiO | 0,36 | 0,14 | 0,00 | 0,12 | 0,36 | 0,12 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 99,51 | 99,72 | 100,20 | 99,86 | 99,66 | 100,59 | 100,29 | 99,81 |
| Fo | 90,61 | | | | 90,59 | | | |
| Cr#Sp | | 43,42 | | | | 42,89 | | |
| Mg#Sp | | 67 | | | | 67 | | |
| En | | | 49,13 | 90,80 | | | 49,55 | 90,92 |
| Wo | | | 46,95 | 0,75 | | | 47,02 | 0,98 |
| Fs | | | 3,92 | 8,45 | | | 3,43 | 8,10 |

Примечание. Fo – форстерит; Cr# Sp и Mg#Sp – хромистость и магнезиальность шпинели; En, Wo и Fs – энстатит, воластонит и ферросилит. Аналитик – Л. Ф. Суворова.

Состав минералов бесшпинелевых лерцолитов варьируется в этих же пределах. Состав силикатных минералов флогопитовых верлитов подобен составу минералов лерцолитов: оливин (90 % форстерита), хромдиопсид ($\text{Эн}_{50}\text{Во}_{47}\text{Фс}_3$) при пониженной магнезиальности хромшпинели ($(100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 64)$) и повышенной хромистости ($\text{Cr}\# = 100 \cdot \text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) = 53$). Состав минералов шпинелевых гарцбургитов: энстатит $\text{Эн}_{90}\text{Во}_1\text{Фс}_9$ и оливин (90 % форстерита). В хромшпинели гарцбургитов отношение $100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 74$. Акцессорный диопсид имеет состав: $\text{Эн}_{49}\text{Во}_{48}\text{Фс}_4$. Состав минералов оливиновых вебстеритов: диопсид $\text{Эн}_{48}\text{Во}_{48}\text{Фс}_4$, энстатит $\text{Эн}_{90}\text{Во}_1\text{Фс}_9$ и оливин (90 % форстерита).

Петрохимическое группирование пород относительно состава примитивной мантии

На диаграмме Mg/Si и Al/Si (рис. 2) включения зеленых перидотитов разделяются на три группы. Одна группа представлена образцом BS-16-11, близким к составу примитивной мантии (primitive mantle, PM). Подобный состав имеют включения зеленых перидотитов из местонахождения Козья Шейка. Другая (основная) группа шпинелевых лерцолитов, шпинелевых гарцбургитов и флогопитовых верлитов обнаруживает более заметное возрастание отношения Mg/Si при понижении отношения Al/Si, эта группа представлена образцами BS-16-1, BS-16-2, BS-16-3, BS-16-4, BS-16-8, BS-16-9, BS-16-10, BS-16-12, BS-16-13, BS-16-14, BS-16-15 и BS-16-16. Повышение отношения Mg/Si с понижением отношения Al/Si обозначает образование рестита – тугоплавкого продукта, остающегося в результате частичного плавления и удаления расплава из первичного мантийного материала.

В тренде обеднения, выраженном двумя группами пород, вторая из них относится к реститам. Третья группа шпинелевых и бесшпинелевых лерцолитов и оливиновых вебстеритов отличается пониженными отношениями Mg/Si при отношениях Al/Si, сопоставимых с этим отношением в группе 1, третья группа представлена образцами BS-16-5, BS-16-6 и BS-16-7. Эта группа смещена от тренда обеднения и относится к метасоматитам (табл. 2).

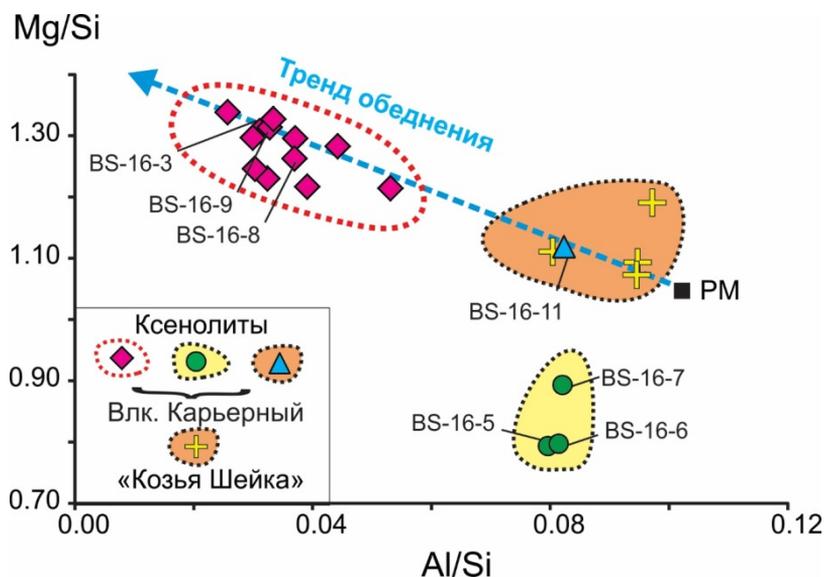


Рис. 2. Группирование ксенолитов на диаграмме Mg/Si и Al/Si

Состав ксенолитов из местонахождения Козья Шейка (Зун-Мурын) показан по данным [Рассказов, Иванов, Демонтерова, 2000]. Синей штриховой линией со стрелкой обозначен тренд обеднения пород групп 1 и 2 относительно состава примитивной мантии (PM). Состав PM [Геохимия архея ... , 1987]

Таблица 2

Результаты силикатного анализа включений зеленых перидотитов

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| № образца | BS-16-1 | BS-16-2 | BS-16-3 | BS-16-4 | BS-16-5 | BS-16-6 |
| SiO ₂ , мас. % | 44,25 | 43,34 | 44,41 | 45,05 | 53,56 | 53,81 |
| TiO ₂ | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,11 | 0,11 |
| Al ₂ O ₃ | 1,45 | 1,16 | 1,22 | 1,29 | 3,77 | 3,87 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,75 | 0,47 | 1,01 | 0,92 | 3,02 | Н. о. |
| FeO | 6,92 | 7,46 | 7,17 | 6,92 | 3,51 | 6,41 |
| MnO | 0,11 | 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,16 | 0,14 |
| MgO | 44,40 | 41,82 | 44,97 | 42,91 | 32,89 | 33,20 |
| CaO | 1,29 | 4,05 | 0,34 | 1,85 | 2,32 | 1,42 |
| Na ₂ O | 0,30 | 0,41 | 0,06 | 0,13 | 0,19 | 0,62 |
| K ₂ O | 0,06 | 0,33 | 0,05 | 0,11 | 0,06 | 0,07 |
| P ₂ O ₅ | Н. о. | 0,05 | Н. о. | Н. о. | Н. о. | Н. о. |
| H ₂ O ⁻ | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| ППП | 0,53 | 0,79 | 0,55 | 0,74 | 0,52 | 0,54 |
| Сумма | 100,17 | 100,13 | 100,00 | 100,12 | 100,16 | 100,25 |

Окончание табл. 2

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| № образца | BS-16-1 | BS-16-2 | BS-16-3 | BS-16-4 | BS-16-5 | BS-16-6 |
| Ta, мкг/г | 0,04 | 0,22 | 0,12 | 0,09 | 0,11 | 0,08 |
| Th | 0,15 | 0,85 | 0,28 | 0,41 | 0,35 | 0,76 |
| Yb | 0,12 | 0,44 | 0,17 | 0,20 | 0,37 | 0,24 |

| № п/п | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| № образца | BS-16-7 | BS-16-8 | BS-16-9 | BS-16-10 | BS-16-11 | BS-16-12 |
| SiO ₂ , мас. % | 49,51 | 44,72 | 45,05 | 45,28 | 45,53 | 43,99 |
| TiO ₂ | 0,17 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 0,07 |
| Al ₂ O ₃ | 3,59 | 1,46 | 2,11 | 3,29 | 1,57 | 1,72 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,72 | 1,52 | 1,47 | 1,42 | 0,91 | 1,16 |
| FeO | 5,02 | 6,77 | 6,73 | 6,42 | 7,03 | 7,64 |
| MnO | 0,13 | 0,14 | 0,13 | 0,17 | 0,11 | 0,23 |
| MgO | 34,23 | 43,73 | 42,36 | 39,24 | 42,90 | 43,70 |
| CaO | 4,86 | 1,04 | 1,12 | 2,75 | 1,22 | 0,56 |
| Na ₂ O | 0,72 | 0,09 | 0,08 | 0,69 | 0,12 | 0,10 |
| K ₂ O | 0,18 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,11 |
| P ₂ O ₅ | Н. о. | Н. о. | 0,03 | Н. о. | Н. о. | Н. о. |
| H ₂ O ⁻ | 0,09 | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,06 |
| ППП | 0,64 | 0,62 | 0,65 | 0,58 | 0,63 | 0,64 |
| Сумма | 99,86 | 100,24 | 99,93 | 100,06 | 100,20 | 99,98 |
| Ta, мкг/г | 0,18 | 0,07 | 0,04 | 0,10 | 0,03 | 0,05 |
| Th | 1,25 | 0,24 | 0,06 | 0,49 | 0,08 | 0,21 |
| Yb | 0,53 | 0,15 | 0,13 | 0,35 | 0,30 | 0,12 |

| № п/п | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| № образца | BS-16-13 | BS-16-14 | BS-16-15 | BS-16-16 |
| SiO ₂ , мас. % | 43,83 | 43,41 | 44,28 | 45,05 |
| TiO ₂ | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,06 |
| Al ₂ O ₃ | 1,29 | 0,99 | 1,18 | 2,11 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,14 | 1,15 | 1,07 | 1,47 |
| FeO | 6,93 | 7,16 | 6,70 | 6,73 |
| MnO | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,13 |
| MgO | 45,04 | 44,99 | 44,48 | 42,36 |
| CaO | 0,82 | 0,96 | 1,26 | 1,12 |
| Na ₂ O | 0,08 | 0,08 | 0,33 | 0,08 |
| K ₂ O | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,07 |
| P ₂ O ₅ | Н. о. | 0,03 | Н. о. | 0,03 |
| H ₂ O ⁻ | 0,02 | 0,06 | 0,04 | 0,08 |
| ППП | 0,54 | 0,64 | 0,57 | 0,65 |
| Сумма | 99,88 | 99,66 | 100,18 | 99,93 |
| Ta, мкг/г | 0,09 | 0,04 | 0,06 | 0,08 |
| Th | 0,15 | 0,26 | 0,09 | 0,18 |
| Yb | 0,19 | 0,11 | 0,13 | 0,14 |

Примечание. Глубинные включения: 1–4, 8–10, 12–16 – рестины; 11 – порода, близкая к примитивной мантии; 5–7 – метасоматиты. Н. о. – не определялось. Аналитик – Е. Г. Колтунова, ИЗК СО РАН.

На диаграмме $\text{FeO}_{\text{общ}}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3) фигуративные точки ксенолитов групп 1 и 2 распределяются вдоль тренда обеднения примитивной мантии с относительным снижением оксида алюминия. Породы основной реститовой группы имеют предельное истощение около 24 % при давлении 1–3 ГПа. Такими величинами оценивается степень плавления гранатсодержащего источника базальта срединных океанических хребтов [McKenzie, Bickle, 1988]. Группа 1 (образец BS-16-11) соответствует реститу примитивной мантии с более низкой степенью плавления порядка 15 % при давлении, сопоставимом с нижней предельной оценкой давлений для пород основной группы реститов.

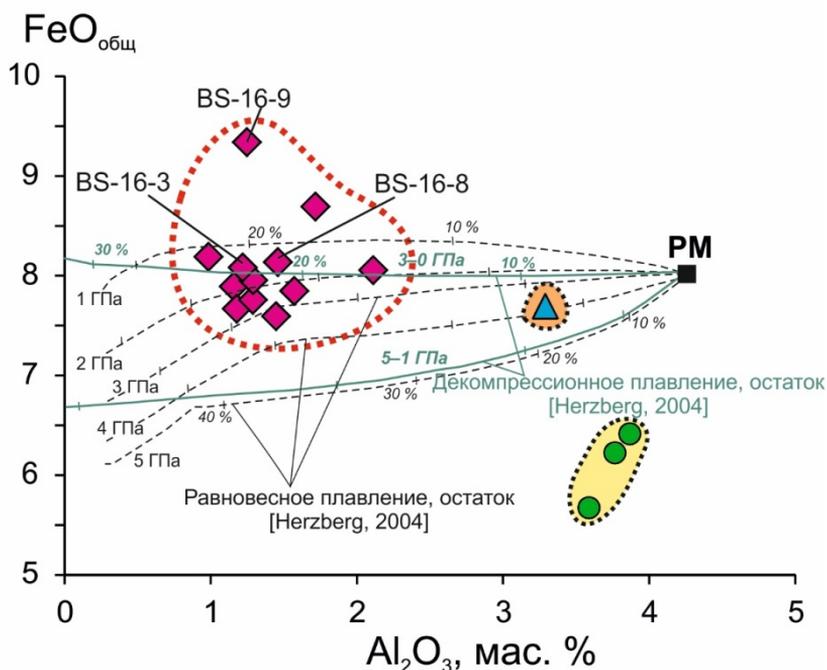


Рис. 3. Диаграмма $\text{FeO}_{\text{общ}}-\text{Al}_2\text{O}_3$.

Усл. обозн. см. рис. 2. Давление в гигапаскалях (1 ГПа = 10 кбар)

Оценки температур и вариаций частичного плавления

По двупироксеновым термометрам (W) [Wells, 1977] и (NT) [Nimis, Taylor, 2000] и тоже по двупироксеновому термометру (W) [Wells, 1977] и растворимости Са в ортопироксене (BKN) [Brey, Köhler, 1990] получены сопоставимые температуры (табл. 3). Для интерпретации принимаются температурные оценки по термометру (NT) [Nimis, Taylor, 2000]. Получается температурный интервал пород основной группы реститов около 100 °С, на высокотемпературном конце которого находятся породы группы 1, а на низкотемпературном конце – породы группы 3.

Таблица 3

Результаты расчета температур пород по минералогическим термометрам

| | Образцы | Температура, °C | | | |
|----|--------------|-----------------|--------------------|-----|------|
| | | BKN | (BKN) Ca-in-opx | NT | W |
| 1 | BS-16-1 | 959 | 882 | 943 | 967 |
| 2 | BS-16-2 | | | 971 | |
| 3 | BS-16-3 | | 904 | | |
| 4 | BS-16-4 | 969 | 953 | 936 | 958 |
| 5 | BS-16-5 | | 921 | | |
| 6 | BS-16-6 | 901 | 932 | 863 | 920 |
| 7 | BS-16-7 | 857 | 941 | 825 | 898 |
| 8 | BS-16-8 | 893 | 926 | 845 | 910 |
| 9 | BS-16-9 | | 939 | | |
| 10 | BS-16-10 | 917 | 889 | 914 | 947 |
| 11 | BS-16-10 (2) | 1065 | 889 | 960 | 1007 |
| 12 | BS-16-11 | | 967 | | |
| 13 | BS-16-12 | 898 | 954 | 857 | 919 |
| 14 | BS-16-13 | 921 | 946 | 908 | 946 |
| 15 | BS-16-14 | 970 | 890 | 952 | 975 |
| 16 | BS-16-15 | 997 | 916 | 948 | 965 |
| 17 | BS-16-16 | 1009 | 968 | 950 | 980 |

Примечание. Термометры: BKN [Brey, Köhler, 1990]; (BKN) Ca-in-opx [Brey, Köhler, 1990]; W [Wells, 1977]; NT [Nimis, Taylor, 2000].

Кондуктивный градиент возрастания температуры литосферы с глубиной составляет в среднем 1 °C на 30 м. Принимая такое изменение температуры в интервале значений термометра (TN) в качестве показателя слоя, сложенного реститами основной группы, получаем приблизительную оценку мощности этого слоя порядка 3 км. Слой характеризуется общим истощением материала относительно примитивной мантии. В его нижней (более высокотемпературной) части находится слабообедненная порода группы 1, а в верхней части – метасоматиты (рис. 4).

По петрохимическим критериям намечается обеднение пород основной группы реститов в результате частичного плавления примитивной мантии и более слабое обеднение пород, близких к составу примитивной мантии. Выявляется также отличие группы 3 от реститов групп 1 и 2, хотя составы хромшпинели группы 3 перекрываются с реститовыми хромшпинелями. По экспериментальным данным [Wood, 1991], с повышением частичного плавления в рестите должна возрастать хромистость шпинели (Cr#) (см. табл. 1). Между тем в породах основной группы реститов значения Cr# варьируются от 26 до 53 при одинаковом уровне значений отношения Mg/Si. Вариации хромистости шпинели реститов не проявились в тренде истощения материала примитивной мантии.

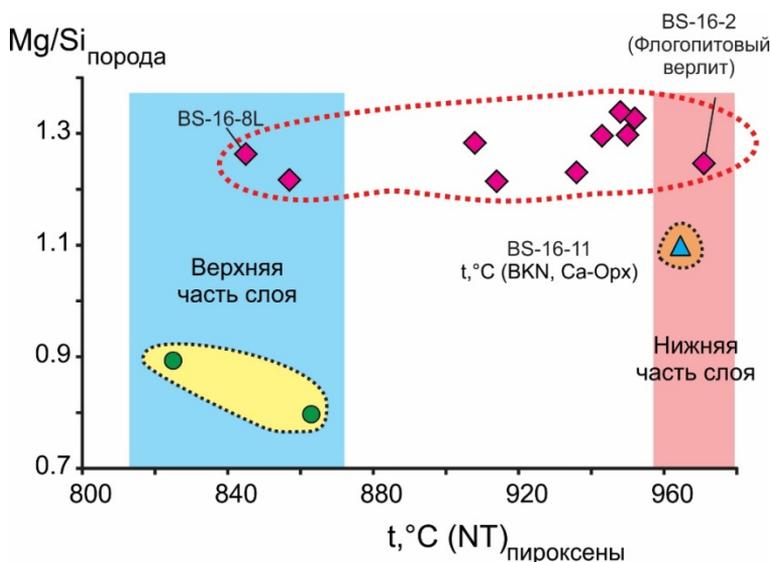


Рис. 4. Диаграмма Mg/Si – температура (NT) равновесия пироксенов.
Усл. обозн. см. рис. 2 (объяснения в тексте)

Микроэлементные признаки наложенного обогащения пород

На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb (рис. 5, а) образец BS-16-11 наименее обедненной породы находится в пределах мантийного направления рядом с составом примитивной мантии. Часть фигуративных точек основной группы реститов (BS-16-9, BS-16-13 и BS-16-15) распределяются вдоль мантийного направления, смещаясь от состава примитивной мантии к составу нижней коры. Другая часть точек основной группы реститов обнаруживает относительное возрастание Th/Yb, характерное для средней коры и валового состава коры. Три точки группы метасоматитов образуют отчетливый тренд широких вариаций Th/Yb при узком диапазоне Ta/Yb. На этот тренд попадают две фигуративные точки основной группы реститов (BS-16-1 и BS-16-10), тогда как большинство других фигуративных точек этой группы смещены правее этого тренда, по направлению к составу базальта океанических островов (ОИВ). Максимальное смещение дают образцы BS-16-16 и BS-16-3.

Другим признаком наложенных на мантийные породы процессов служит повышение концентраций легких элементов в нормированных к хондриту спектрах редкоземельных элементов (РЗЭ) клинопироксенов (рис. 5, б). Максимальные содержания РЗЭ определены в образце BS-16-16, смещенном к ОИВ на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb (см. рис. 5, а). Общее слабое снижение концентраций РЗЭ в образцах BS-16-2 (флогопитовый верлит) и BS-16-15 (лерцолит мантийного направления, близкий к составу нижней коры) сопровождается выполаживанием линии нормирования к хондриту в легкой части спектра. Далее, в образце BS-16-8 наблюдается относительное снижение средних и тяжелых элементов ряда. И наконец, в образцах BS-16-1 (тренд нижней – средней коры) и BS-16-14 резко опускается центральная часть спектра. Такая V-образная форма спектра в целом не характерна для мантийных пород и часто проявляется в коровых гранитоидах.

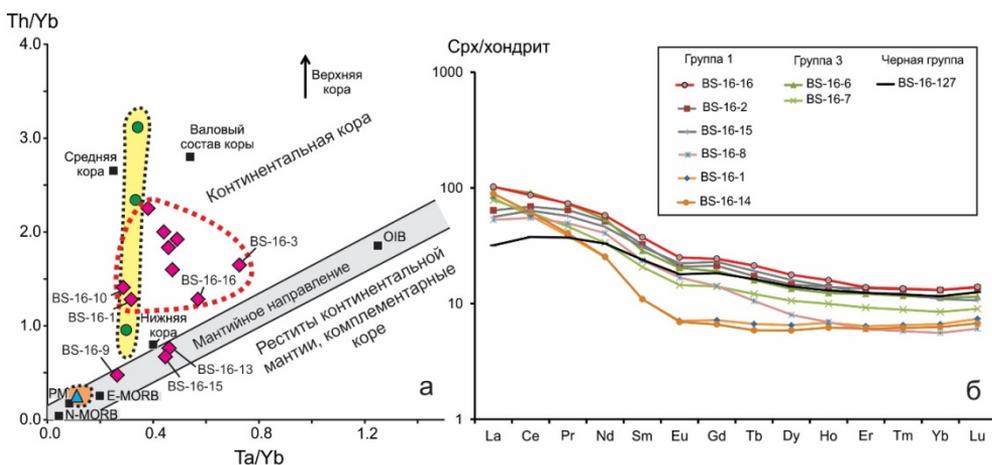


Рис. 5. а – диаграмма Th/Yb – Ta/Yb для зеленых перидотитов и б – спектры редкоземельных элементов клинопироксенов, нормированные к хондриту. Усл. обозн. см. рис. 2. Составы обогащенного и нормального базальтов срединных океанических хребтов (E-MORB и N-MORB), базальта океанических островов (OIB) и примитивной мантии (PM) показаны по работе [Sun, McDonough, 1989; Arevalo, McDonough, 2010]. Составы нижней, средней, верхней коры и валовый состав показаны по работе [Rudnick, Fountain, 1995]

Для сопоставления нанесен состав авгита из черного включения (см. рис. 5, б). Конфигурация РЗЭ-спектра с выположенной легкой частью РЗЭ сопоставима с конфигурацией спектров основной группы реститов. Следовательно, наложенные процессы преобразования реститов, вероятно, были связаны с кристаллизацией черных авгитсодержащих пород (табл. 4).

Спектры пород зеленой группы метасоматитов не обнаруживают какого-либо выполаживания легкой части ряда РЗЭ и характеризуют ее как самостоятельную группу с геохимическими характеристиками нижней – средней коры.

Таблица 4

Результаты определений РЗЭ в клинопироксенах

| № образца | BS-16-1 | BS-16-2 | BS-16-6 | BS-16-7 | BS-16-8 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| La, мкг/г | 19,33 | 15,13 | 24,01 | 18,59 | 12,54 |
| Ce | 35,18 | 42,25 | 55,50 | 37,47 | 33,74 |
| Pr | 3,58 | 5,97 | 6,71 | 4,30 | 4,59 |
| Nd | 11,52 | 23,55 | 24,55 | 15,28 | 18,55 |
| Sm | 1,61 | 4,80 | 4,24 | 3,06 | 3,49 |
| Eu | 0,40 | 1,18 | 1,14 | 0,81 | 0,94 |
| Gd | 1,43 | 4,22 | 3,79 | 2,80 | 2,82 |
| Tb | 0,24 | 0,62 | 0,57 | 0,44 | 0,38 |
| Dy | 1,60 | 3,60 | 3,30 | 2,60 | 1,97 |
| Ho | 0,37 | 0,76 | 0,67 | 0,54 | 0,38 |
| Er | 1,02 | 2,16 | 1,94 | 1,48 | 0,96 |
| Tm | 0,16 | 0,33 | 0,29 | 0,22 | 0,14 |
| Yb | 1,07 | 2,10 | 1,80 | 1,37 | 0,90 |
| Lu | 0,18 | 0,34 | 0,28 | 0,22 | 0,15 |

Окончание табл. 4

| № образца | BS-16-14 | BS-16-15 | BS-16-16 | BS-16-127 |
|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| La, мкг/г | 21,11 | 13,29 | 24,22 | 7,55 |
| Ce | 37,77 | 38,94 | 53,08 | 23,12 |
| Pr | 3,75 | 5,31 | 6,80 | 3,45 |
| Nd | 11,59 | 21,01 | 26,34 | 15,08 |
| Sm | 1,62 | 4,57 | 5,53 | 3,54 |
| Eu | 0,39 | 1,26 | 1,41 | 1,01 |
| Gd | 1,31 | 4,56 | 4,85 | 3,65 |
| Tb | 0,21 | 0,69 | 0,77 | 0,59 |
| Dy | 1,44 | 3,94 | 4,35 | 3,45 |
| Ho | 0,34 | 0,77 | 0,87 | 0,71 |
| Er | 0,97 | 1,97 | 2,21 | 1,98 |
| Tm | 0,15 | 0,30 | 0,33 | 0,30 |
| Yb | 1,01 | 1,77 | 2,11 | 1,87 |
| Lu | 0,17 | 0,26 | 0,34 | 0,31 |

Примечание. Клинопироксены: BS-16-(1–16) – из зеленого перидотита; BS-16-127 – из черного клинопироксенита.

Обсуждение и заключение

Изученные включения зеленых перидотитов из базанитов вулкана Карьерный характеризуют слой литосферной мантии шпинелевой фации глубинности. Среди них преобладают шпинелевые и бесшпинелевые лерцолиты при подчиненной роли флогопитовых верлитов, шпинелевых гарцбургитов и оливиновых вебстеритов. По содержаниям петрогенных оксидов выделяются: 1) породы, близкие к примитивной мантии, 2) реститы и 3) метасоматиты. На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb породы первой группы соответствуют мантийному направлению, а породы двух других групп смещены в область коровых составов.

По минеральным термометрам рассчитывается общий диапазон температурных оценок реститовой группы пород 845–971 °С (термометр Нимиса – Тэйлора). При кондуктивном температурном градиенте литосферы приблизительная мощность перидотитового слоя составляет около 3 км. В его подошве находятся породы, близкие к примитивной мантии (температура 967 °С), а в кровле – метасоматиты (температуры 825–863 °С).

Порода основания слоя приближается к составу примитивной мантии не только по петрогенным оксидам, но и по микроэлементам. Основная группа пород слоя имеет признаки истощения по петрогенным оксидам, но одновременно имеет признаки обогащения по Th/Yb (относительно Ta/Yb), обозначая переход от микроэлементных характеристик мантийных пород к характеристикам нижней и средней коры. Такая двойственность обусловлена начальным частичным плавлением и истощением перидотитового слоя и его последующей флюидной переработкой с обогащением несовместимыми элементами (Th). Максимальный эффект наложенных изменений перидотитов выражается в развитии своеобразных пород с низким Mg/Si и высоким Th/Yb в верхней части слоя.

Включения зеленых перидотитов вулканов Карьерный и Сухой восточной части Тункинской долины маркируют северную границу распространения ксенолитов этого типа на территории Хамар-Дабанского террейна, совпадающую с изоградой гиперстена фации гранулитового метаморфизма. Все проанализированные зеленые включения местонахождения Козья Шейка сопоставимы с породами вулкана Карьерный, близкими по составу к примитивной мантии.

При выполнении работы использовалось оборудование центров коллективного пользования «Ультрамикрoанализ», ЛИН СО РАН (масс-спектрометр Agilent 7500ce) и «Изотопной геохимии» ИГХ СО РАН им. А. П. Виноградова (микрoанализатор Superprobe JXA-8200).

Работа выполнена при финансировании грантом РНФ18-77-10027.

Список литературы

Базальты Быстринской зоны из источников континентальной литосферной мантии, Тункинская долина Байкальской рифтовой системы / Ю. Аило, С. В. Рассказов, Т. А. Ясныгина, И. С. Чувашова, Чжэньхуа Сие, Йи-минь Сунь // Геология и окружающая среда. 2018. Т. 1, № 1. С. 27–43.

Волянюк Н. Я., Семенова В. Г. О находке глиноземистых ультраосновных включений в базальтах Байкальской рифтовой зоны // Докл. АН СССР. 1975а. Т. 222, № 5. С. 1186–1189.

Волянюк Н. Я., Семенова В. Г. О находке трахибазальтов с ультраосновными включениями в Слодянском районе // Докл. АН СССР. 1975б. Т. 223, № 1. С. 199–202.

Геохимия архея : пер. с англ. / под ред. А. Крёнера, Г. Н. Хенсона, А. М. Гудвена. М. : Мир, 1987. 315 с.

Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии / С. В. Рассказов, И. С. Чувашова, Т. А. Ясныгина, Н. Н. Фефелов, Е. В. Саранина. Новосибирск : ГЕО, 2012. 340 с.

Култукский вулкан: пространственно-временная смена магматических источников на западном окончании Южно-Байкальской впадины в интервале 18–12 млн лет назад / С. В. Рассказов, Т. А. Ясныгина, И. С. Чувашова, Е. А. Михеева, С. В. Снопков // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Vol. 4, N 2. P. 135–168. <https://doi.org/10.5800/GT2013420095>.

Рассказов С. В., Иванов А. В., Демонтерова Е. И. Глубинные включения из базальтов Зун-Мурина (Тункинская рифтовая долина, Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2000. Т. 40, № 1. С. 100–110.

Рассказов С. В., Богданов Г. В., Медведева Т. И. Минералы глубинных включений из разновозрастных базальтов Тункинской впадины. Прикладная минералогия Восточной Сибири. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1992. 272 с.

Слодянский кристаллический комплекс / Е. П. Васильев, Л. З. Резницкий, В. Н. Вишняков, Е. А. Некрасова. Новосибирск : Наука, 1981. 197 с.

Террейны Байкал-Хубсугульского фрагмента Центрально-Азиатского подвижного пояса палеозой. Состояние проблемы / В. Г. Беличенко, Л. З. Резницкий, В. А. Макрыгина, И. Г. Бараш // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса. От океана к континенту. Т. 1. Материалы совещания. Иркутск : ИЗК СО РАН. 2006. С. 37–40.

Шафеев А. А. Докембрий Юго-Западного Прибайкалья и Хамар-Дабана. М. : Наука, 1970. 177 с.

Arevalo R. Jr., McDonough W. F. Chemical variations and regional diversity observed in MORB // Chemical Geology. 2010. Vol. 271. P. 70–85.

Brey G. P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers // *J. Petrol.* 1990. Vol. 31. P. 1353–1378.

Ginzburg I. V. Refinement of the classification of pyroxenes from new data on their crystal chemistry // *Zap. Vses. Min. Obshch.* 1975. Vol. 104. P. 539–549.

McKenzie D., Bickle M. J. The volume and composition of melt generation by extension of the lithosphere // *J. Petrol.* 1988. Vol. 29, pt. 3. P. 625–679.

Nimis P., Taylor W. R. Single clinopyroxene thermobarometer for garnet peridotites. Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. Vol. 139. P. 541–554.

Paldervart A., Hess H. H. Pyroxenes in the crystallisation of basaltic magma // *Geol.* 1951. Vol. 59. P. 472–489.

Rudnick R. L., Fountain D. M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // *Reviews of Geophysics.* 1995. Vol. 33, N 3. P. 267–309.

Streckeisen A. Plutonic Rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks // *Geotimes.* 1973. Vol. 18(10). P. 26–30.

Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. Vol. 42. P. 313–345.

Wells P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex system // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. Vol. 62. P. 129–139.

Wood B. J. Oxygen barometry of spinel peridotites // *Reviews in Mineralogy.* 1991. Vol. 25. P. 417–431.

Relationship Between Rocks of Primitive Mantle, Restites, and Metasomatites in Inclusions from Basanites of the Karyerny Volcano (Western Pribaikal)

Y. Ailow

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

University of Al-Fourat, Deir ez-Zor, Syria

S. V. Rasskazov, I. S. Chuvashova

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Institute of Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

T. A. Yasnygina

Institute of Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Deep-seated inclusions from the Karyerny and Sukhoi volcanoes in the eastern part of the Tunka valley mark the northern limit of green (chrome-diopside bearing) xenoliths on the area of the Khamardaban terrain that coincides with the hypersthene isograd of the granulite metamorphism facies of the Slyudyanka crystalline complex. A new location of deep-seated inclusions has been studied in lavas from the Karyerny volcano, where green peridotites (with chrome-diopside) and black pyroxenites (with augite) have been found. The study of green peridotites showed the predominating spinel and spinel-free lherzolites with a subordinate role of phlogopite verlitites, spinel harzburgites, and olivine websterites. In terms of major oxides, (1) rocks close to the primitive mantle, (2) restites, and (3) metasomatites have been recognized. In the Th/Yb versus Ta/Yb diagram, data points of the former group have been plotted within the mantle array, whereas those of the two other groups have been shifted to the

area of crustal compositions. From temperature estimates of 845–971 °C (Nimis–Taylor thermometer), obtained for the predominating restite group, it is suggested that these rocks originate from a 3 km thick lithospheric layer, at a base and top of which, rocks close to the primitive mantle (temperature 967 °C) and metasomatites (temperatures 825–863 °C) occur.

Keywords: mantle, lithosphere, basalt, deep-seated inclusions, Tunka valley.

For citation: Ailow Y., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A. Relationship Between Rocks of Primitive Mantle, Restites, and Metasomatites in Inclusions from Basanites of the Karyerny Volcano (Western Pribaikal). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 29, pp. 3-23. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.3> (in Russian)

References

- Ailow Y., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Zhenhua Xie, Yi-min Sun. Bazalty Bystrinskoy zony iz istochnikov kontinentalnoy litosfernoy mantii, Tunkinskaya dolina Baykal'skoy riftovoy sistemy [Basalts of the Bystrinsky zone from sources of the continental lithospheric mantle, Tunkinskaya valley of the Baikal rift system]. *Geologiya i okruzhayushchaya sreda* [Geology and environment], 2019, vol. 1, no. 1, pp. 27-43. (in Russian)
- Volyanyuk N.YA., Semenova V.G. O nakhodke glinozemistykh ul'traosnovnykh vkluycheniy v bazal'takh Baykal'skoy riftovoy zony [On the discovery of alumina ultrabasic inclusions in basalts of the Baikal rift zone]. *Dokl. AN SSSR* [Dokl. Academy of Sciences of the USSR], 1975a, vol. 222, no. 5, pp. 1186-1189. (in Russian)
- Volyanyuk N.YA., Semenova V.G. O nakhodke trakhibazal'tov s ul'traosnovnymi vkluycheniyami v Slyudyanskom rayone [On the discovery of trachybasalts with ultrabasic inclusions in the Slyudyansky district]. *Dokl. AN SSSR* [Dokl. Academy of Sciences of the USSR], 1975b, vol. 223, no. 1, pp. 199-202. (in Russian)
- Kronera A., Khensona G.N., Gudvena A.M. (eds.). *Geokhimiya arkheya* [Geochemistry Archean]. Moscow, Mir Publ., 1987, 315 p. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V. *Kaliyevaya i kalinatrovaya vulkanicheskkiye serii v kaynozoye Azii* [Potassic and potassic-sodic volcanic series in the cenozoic of Asia]. Novosibirsk, GEO Publ., 2012, 340 p. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Mikheeva E.A., Snopkov S.V. Kultuk'skiy vulkan: prostranstvenno–vremennaya smena magmaticheskikh istochnikov na zapadnom okonchaniy Yuzhno-Baykal'skoy vpadiny v intervale 18–12 mln let nazad [The Kultuk volcano: spatialtemporal change of magmatic sources at the western terminus of the south Baikal basin between 18 and 12 Ma]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 135-168. <https://doi.org/10.5800/GT2013420095>. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Demonterova E.I. Glubinnyye vkluycheniya iz bazanitov Zun-Murina (Tunkinskaya riftovaya dolina, Pribaykaliye) [Deep-seated inclusions from the Zun-Murin basanites (Tunka rift valley, the Baikal region)]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2000, vol. 40, no. 1, pp. 100-110. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Bogdanov G.V., Medvedeva T.I. *Mineraly glubinnykh vkluycheniy iz raznovozrastnykh bazal'tov Tunkinskoy vpadiny* [Minerals of deep-seated inclusions from uneven-age basalts of the Tunkinskaya depression]. Applied mineralogy of Eastern Siberia. Irkutsk, Publ. Irkutsk University, 1992, 272 p. (in Russian)
- Vasil'yev E.P., Reznitsky L.Z., Vishnyakov V.N., Nekrasova E.A. *Slyudyanskiy kristallicheskiy kompleks* [Slyudyansky crystalline complex]. Novosibirsk, Science Publ., 1981, 197 p. (in Russian)
- Belichenko V.G., Reznitsky L.Z., Makrygin V.A., Barash I.G. Terreyny Baykal-Khubsugul'skogo fragmenta Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa palezoid. Sostoyaniye problem [The Baikal – Khubsugul fragmentary terrain of the Central Asian mobile belt is a paleosoid. State of the problem]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa. Ot okeana k kontinentu. T. 1 Mat-ly soveshchaniya. Irkutsk: IZK SO RAN* [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt. From

the ocean to the continent. Vol. 1. Meeting materials. Irkutsk, IEC SB RAS], 2006, pp. 37-40. (in Russian)

Shafeyev A.A. *Dokembriy Yugo-Zapadnogo Pribaykaliya i Khamar-Dabana* [The Precambrian of the South-Western Baikal and Khamar-Daban]. Moscow, Science Publ., 1970, 177 p. (in Russian)

Arevalo R.Jr., McDonough W.F. Chemical variations and regional diversity observed in MORB. *Chemical Geology*, 2010, vol. 271, pp. 70-85.

Brey G.P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 1990, vol. 31, pp. 1353-1378.

Ginzburg I.V. Refinement of the classification of pyroxenes from new data on their crystal chemistry. *Zap. Vses. Min. Obshch.*, 1975, vol. 104, pp. 539-549.

McKenzie D., Bickle M.J. The volume and composition of melt generation by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, 1988, vol. 29, pt. 3, pp. 625-679.

Nimis P., Taylor W.R. Single clinopyroxene thermobarometer for garnet peridotites. Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2000, vol. 139, pp. 541-554.

Paldervaart A., Hess H.H. Pyroxenes in the crystallisation of basaltic magma. *Geol.*, 1951, vol. 59, pp. 472-489.

Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 1995, vol. 33, no. 3, pp. 267-309.

Streckeisen A. Plutonic Rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geotimes*, 1973, vol. 18(10), pp. 26-30.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, vol. 42, pp. 313-345.

Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1977, vol. 62, pp. 129-139.

Wood B.J. Oxygen barometry of spinel peridotites. *Reviews in Mineralogy*, 1991, vol. 25, pp. 417-431.

Аило Юссеф

аспирант, младший научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 8(3952)24-32-80

преподаватель
Университет Аль-Фурат
Сирия, Дейр-эз-Зор
тел./факс: +(963) 51 313572
e-mail: youseph.gh.g@gmail.com

Ailow Youseph

Postgraduate, Researcher
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
tel.: 8(3952)24-32-80

Teacher
Al-Furat University,
Syria, Deir ez-Zor,
tel./fax.: +(963) 51 313572
e-mail: youseph.gh.g@gmail.com

Рассказов Сергей Васильевич

доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующий, кафедра
динамической геологии
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 8(3952)51-16-59

заведующий, лаборатория изотопии
и геохронологии

Rasskazov Sergei Vasilyevich

Doctor of Sciences (Geology
and Mineralogy), Professor, Head
Dynamic Geology Chair
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
tel.: 8(3952)51-16-59

*Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: rassk@crust.irk.ru*

*Head, Laboratory of Isotopic
and Geochronological Studies
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: rassk@crust.irk.ru*

Чувашова Ирина Сергеевна
*кандидат геолого-минералогических наук,
доцент
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)51-16-59
e-mail: chuvashova@crust.irk.ru*

Chuvashova Irina Sergeevna
*Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Assistant Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: 8(3952)51-16-59
e-mail: chuvashova@crust.irk.ru*

Ясныгина Татьяна Александровна
*кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)51-16-59
e-mail: ty@crust.irk.ru*

Yasnygina Tatyana Aleksandrovna
*Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: 8(3952)51-16-59
e-mail: ty@crust.irk.ru*