

Реконструкция преобразований оливина в дунитах концентрически-зонального комплекса Матыскен, Корякское Нагорье

Кузьмин И.А. ^{1,2}, Тарасов А.А. ^{1,3}, Кутырев А.В. ², Чайка И.Ф. ^{1,2}, Каменецкий В.С. ², Зеленский М.Е. ⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, kuzmin.kuvanechka@yandex.ru

² Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН, Черногоровка

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Аннотация. в статье приведены оригинальные данные изучения включений в оливине из дунитов зонального клинопироксенит-дунитового массива Матыскен. В ходе работы выделено два типа включений: силикатно-оксидные и флюидно-минеральные (серпентин-солевые). Силикатно-оксидные включения представлены симплектитовыми срастаниями диопсида и магнетита. Они направлены радиально, от геометрического центра, который образован ламелью хромшпинели (вероятно, магнезиоферрита). Флюидно-минеральные включения в основном сложены серпентином, в котором обнаруживаются единичные зёрна галита, сильвина, флюорита, а также повсеместно обнаруживаются газовые фазы: молекулярный водород и метан. Предложена последовательность и механизм формирования симплектитов диопсида и магнетита в результате серии твердофазных превращений оливина, насыщенного изоморфными примесями Ca^{2+} и Fe^{3+} . Также, предложена генетическая модель, согласно которой происходит формирование описанной ассоциации дочерних фаз в оливине в виде включений. Также, авторами предлагается модель формирования флюидно-минеральных включений вследствие отделения водного флюида при кристаллизации дунитов, с последующей серией реакций и последовательном образовании минералов группы серпентина в ряду: антигорит-хризотил-лизардит и захватом флюида, насыщенного ионами щелочных металлов, а также хлорид и фторид-ионами.

Ключевые слова: диопсид-магнетитовые симплектиты, оливин, ламели, дуниты, включения, флюид.

Reconstruction of olivine transformations in dunites of the Matysken zoned complex, Koryakya Highlands

Kuzmin I.A. ^{1,2}, Tarasov A.A. ^{1,3}, Kutyrev A.V. ², Chaika I.F. ^{1,2}, Kamenetsky V.S. ², Zelensky M.E. ⁴

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, kuzmin.kuvanechka@yandex.ru

² Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents original data on the olivine-hosted inclusions from dunites of the Matysken zoned clinopyroxenite-dunite intrusion (Koryak Highlands, Northern Kamchatka). Two types of inclusions were identified: silicate-oxide and fluid-serpentine-salt. The silicate-oxide inclusions are represented by symplectite-like intergrowths of diopside and magnetite. The symplectites grow radially, from the center, which is formed by a lamella of chromian spinel (apparently magnesioferrite). Mineral assemblage of the fluid-serpentine-salt inclusions is dominated by serpentine in which single grains of halite, sylvite, fluorite are found. Fluid phase in these inclusions is represented by H_2 and CH_4 . A sequence and mechanism for the formation of diopside and magnetite symplectites as a result of a series of solid-state transformations of olivine saturated with Ca^{2+} and Fe^{3+} is proposed. Finally, we propose a model for the formation of the fluid-serpentine-salt inclusions due to the separation of aqueous fluid during the crystallization of dunites, followed by a series of reactions and the sequential formation of minerals of the serpentine group (antigorite-chrysotile-lizardite) and the capture of fluid saturated with alkali metal ions as well as Cl^- and F^- ions.

Key words: diopside-magnetite symplectites, olivine, lamellae, dunites, inclusions, fluid.

Введение

Исследование концентрически-зональных клинопироксенит-дунитовых массивов продолжается уже более 150 лет. Они представляют широкий интерес для исследователей, так как с ними

генетически связаны промышленно значимые россыпи платиновых металлов, а также коренные проявления платины, как правило, приуроченные к телам массивных, жильных и прожилково-вкрапленных хромититов (Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935; Лазаренков и др., 1992). Как правило, такие массивы формируют крупные геологические структуры, такие как Платиноносный пояс Урала или Корякско-Камчатский Платиноносный Пояс.

Главным породообразующим минералом в этих массивах выступает оливин, происхождение которого также может быть самым разнообразным. Несмотря на то, что в настоящее время доминирует теория происхождения дунитов вследствие магматической дифференциации (Батанова, 2009; Савельев и др., 2016 и др.), также, ряд исследований показывают, что дуниты активно перекристаллизуются (Шмелёв, Филипова, 2010; Савельев и др., 2016), а также могут проходить несколько циклов серпентинизации/десерпентинизации. Чтобы сформировать представление о формировании дунитовых массивов, для начала следует разобраться с процессами преобразования дунитового ядра, и, соответственно, главного породообразующего минерала – оливина.

Ключом к решению этой задачи являются включения в оливине. Они могут помочь реконструировать процессы, с которыми связано образование и изменение оливина, состав флюидов взаимодействовавших с ним, изменения Р/Т параметров в процессе его формирования. Таким образом, цель работы – дать комплексную характеристику включений в оливине из дунитов массива Матыскен, и с их помощью реконструировать процессы преобразования и изменения оливина в дунитах зональных массивов.

Материалы и методы

Всего в ходе работы было изучено более двух тысяч зёрен оливина. Изучались твердофазные и флюидно-минеральные включения в оливине из дунитов и хромититов. Для изучения отбиралась фракция крупности оливина – $0.5 + 0.2$ мм. Оливин монтировался в эпоксидную смолу для дальнейшего изучения. Для того чтобы сохранить водорастворимые минералы, препараты полировались без использования воды (в качестве смазочной жидкости применялась WD-40 – уайт-спирит с углекислым газом и минеральным маслом). Вскрытые включения были проанализированы методами сканирующей электронной микроскопии в университете Тасмании (Австралия) на приборе Hitachi SU-70 оборудованном аналитической системой Oxford AZtec Energy XMax 80 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе 30 нА. Невскрытые включения анализировались методом конфокальной рамановской спектроскопии. Точечные анализы фаз включений с локальностью 2 μm были получены с использованием системы из конфокального рамановского микроспектрометра Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800, оборудованного Nd:YAG лазером с длиной волны 532 нм и оптическим микроскопом Olympus BX41 со $100\times$ объективом и подключённой видеокамерой в ИГМ СО РАН (Новосибирск). Калибровка прибора производилась по линии 520.6 см^{-1} кристаллического кремния. С учётом присутствия в составе включений газов и жидкостей, измерения пиков производились в диапазоне от 10 см^{-1} до 4200 см^{-1} . Диагностика метана и молекулярного водорода проводилась по эталонным линиям: CH_4 – 2917; H_2 – 4126, 4143, 4156, 4161 см^{-1} (Frezzotti et al., 2012).

Геология объекта исследований

Массив Матыскен является типичным представителем комплексов Урало-Аляскинского типа. Площадь массива порядка 7 км^2 . Он имеет выраженное зональное строение, а само дунитовое тело прослеживается на глубину около 1.5 км. Как и во всех концентрически-зональных массивах (Иванов, 1997), центральную часть составляет дунитовое ядро, и от центра к периферии происходит закономерная смена на клинопироксенит-верлитовую оторочку, с переходом далее к габброидам. Между дунитами и клинопироксенит-верлитовой оторочкой прослеживаются тектонические границы, и приконтактная часть пронизана маломощными секущими телами клинопироксенитов (Батанова и др., 1991) (рис. 1).

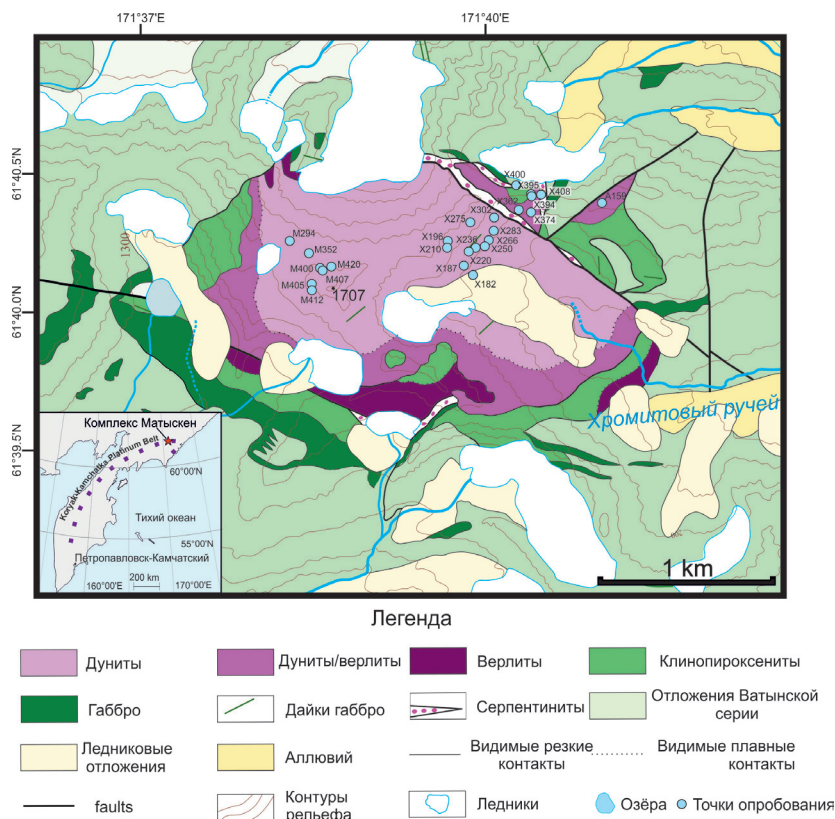


Рис. 1. Геологическая карта массива Матыскен (Разумный и др., 2000, с изменениями).

Fig.1. Geological map of the Matysken massif (Razumny et al., 2000).

Результаты исследований

Было выделено два типа включений: силикатно-оксидные, и флюидно-минеральные.

Силикатно-оксидные включения представлены закономерно-ориентированными ламелями и симплектитовыми срастаниями силикатно-оксидного состава: магнетит, хромшпинель (предположительно – магнезиоферит), диопсид. Эти включения формируют ориентированные структуры в оливине с удлинением по [100 или 010] (рис. 2 а, б). Флюидно-минеральные включения, как пра-

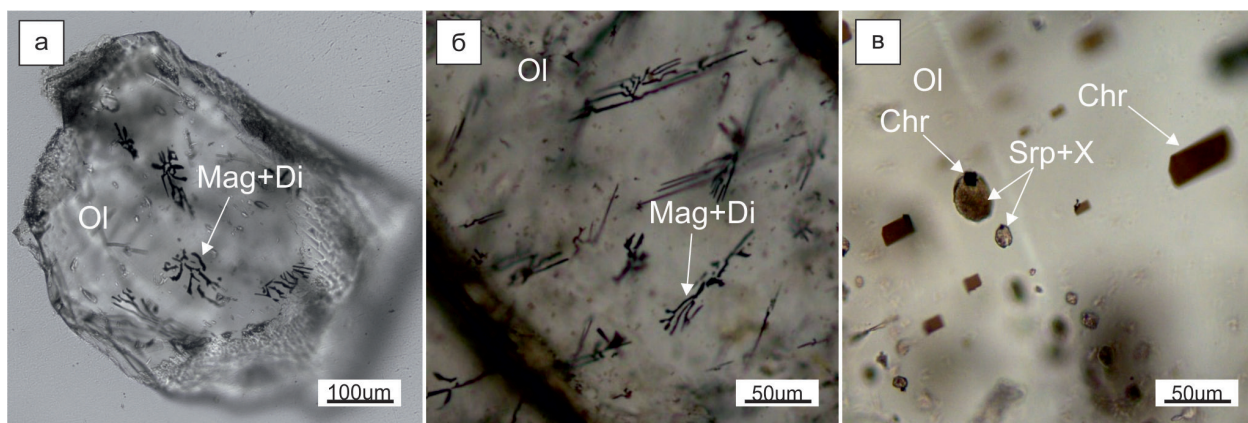


Рис. 2. Позиция в минеральных зёрнах и взаимная ориентировка включений в оливине дунитов массива Матыскен (фотографии в проходящем свете); а, б – силикатно-оксидные твердофазные включения, в – флюидно-минеральные (серпентин-солевые) включения. Ol – оливин, Mag – магнетит, Di – диопсид, Chr – хромит, Srp – серпентин, X – газовые фазы.

Fig. 2. Position in mineral grains and mutual orientation of inclusions in olivine from dunites of the Matysken massif (photos in transmitted light); а, б – silicate-oxide solid-phase inclusions; в – fluid-mineral (serpentine-salt) inclusions. Ol – olivine, Mag – magnetite, Di – diopside, Chr – chromite, Srp – serpentine, X – gas phases.

вило, не имеют закономерной ориентировки и приурочены к хаотично расположенным трещинам (рис. 2 в), в ряде случаев, образуя случайные углы с системно-ориентированными силикатно-оксидными включениями.

Твердофазные (силикатно-оксидные) включения

Твердофазные включения представлены силикатами и оксидами. Помимо случайно расположенных мономинеральных включений акцессорного хромита, в оливине обнаруживаются хромшпинелевые «рои» в виде ориентированных скоплений ламелей хромшпинели (рис. 3 а, б). Можно предположить, что ориентированные кристаллы хромшпинели (образующие ламели) ориентированы по ромбической призме оливина [110]. В пользу этого свидетельствуют равные углы между ламелями и их взаимная ориентировка в виде «ромба». В неразрывной ассоциации с хромшпинеле-

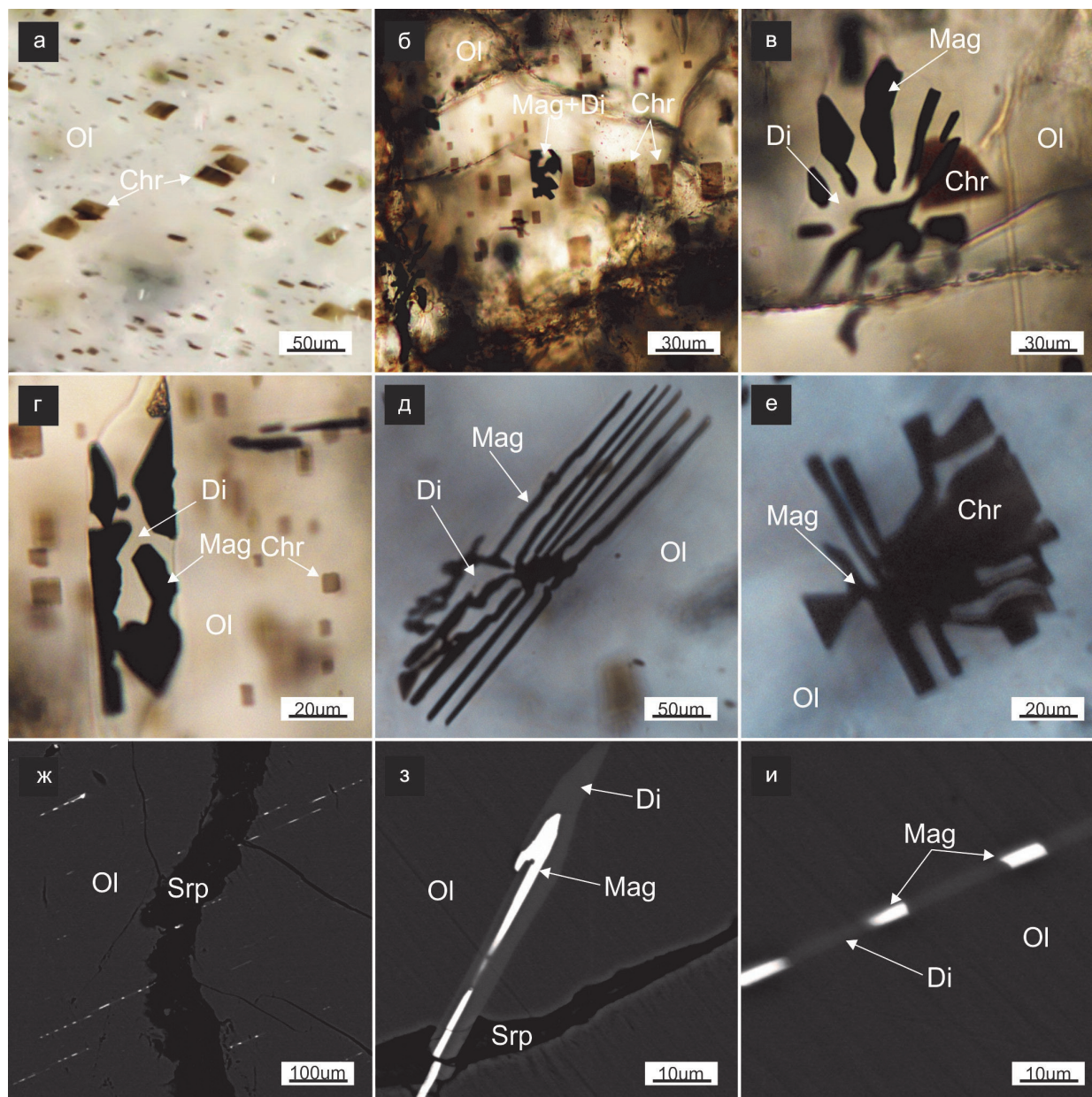


Рис. 3. Твердофазные (силикатно-оксидные) включения в оливине дунитов массива Матыскен; а-е – фотографии выполненные с помощью оптического микроскопа с различным увеличением (проходящий свет, в одном николе), ж-и – BSE изображения. Ol – оливин, Mag – магнетит, Di – диопсид, Chr – хромит, Srp – серпентин.

Fig. 3. Solid-phase (silicate-oxide) inclusions in olivine from dunites of the Matysken massif; а-е – photographs taken with an optical microscope with different magnifications (transmitted light, in one nicol), ж-и – BSE-image. Ol – olivine, Mag – magnetite, Di – diopside, Chr – chromite, Srp – serpentine.

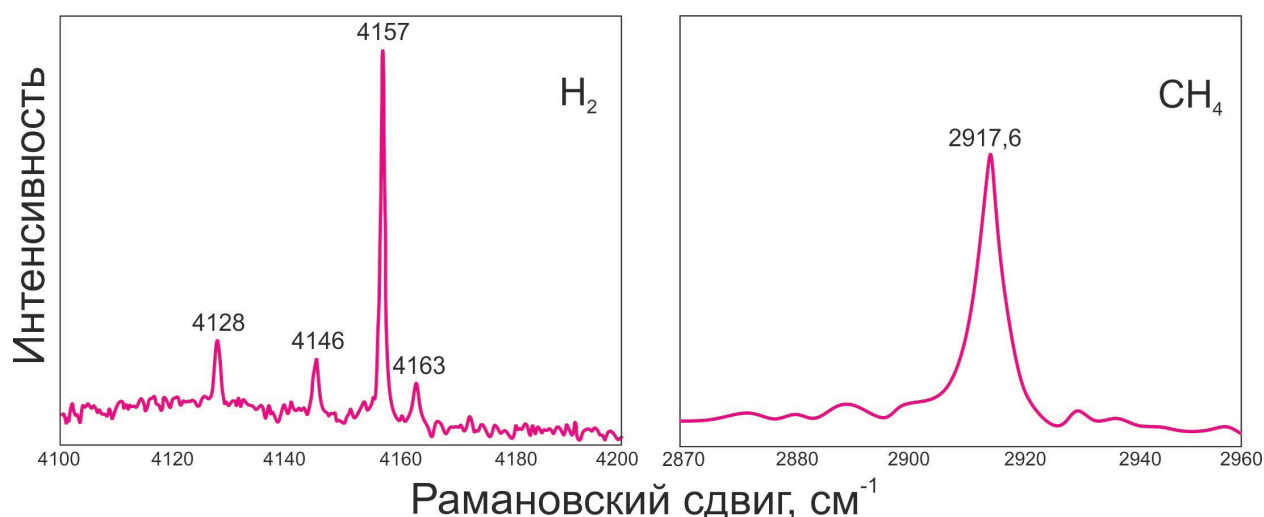


Рис. 4. Раман-спектры дочерних фаз: водорода и метана во включениях в оливине дунитов массива Матыскен.
 Fig. 4. Raman-spectra of the daughter phases: hydrogen and metan in inclusions in olivine from dunites of the Matysken massif.

выми «роями» находятся симплектитовые сростания диопсида и магнетита (магнетит стабильно содержит порядка 0.3 мас. % хрома). Как правило, геометрическим центром симплектитов диопсида и магнетита являются вышеописанные ламели хромшпинели (рис. 3 д). Наблюдения, выполненные в плоских срезах под разными углами (рис. 3 а-е), показывают, что диопсид и магнетит находятся в равных объёмных соотношениях и, вероятно, кристаллизовались одновременно. Отдельно стоит

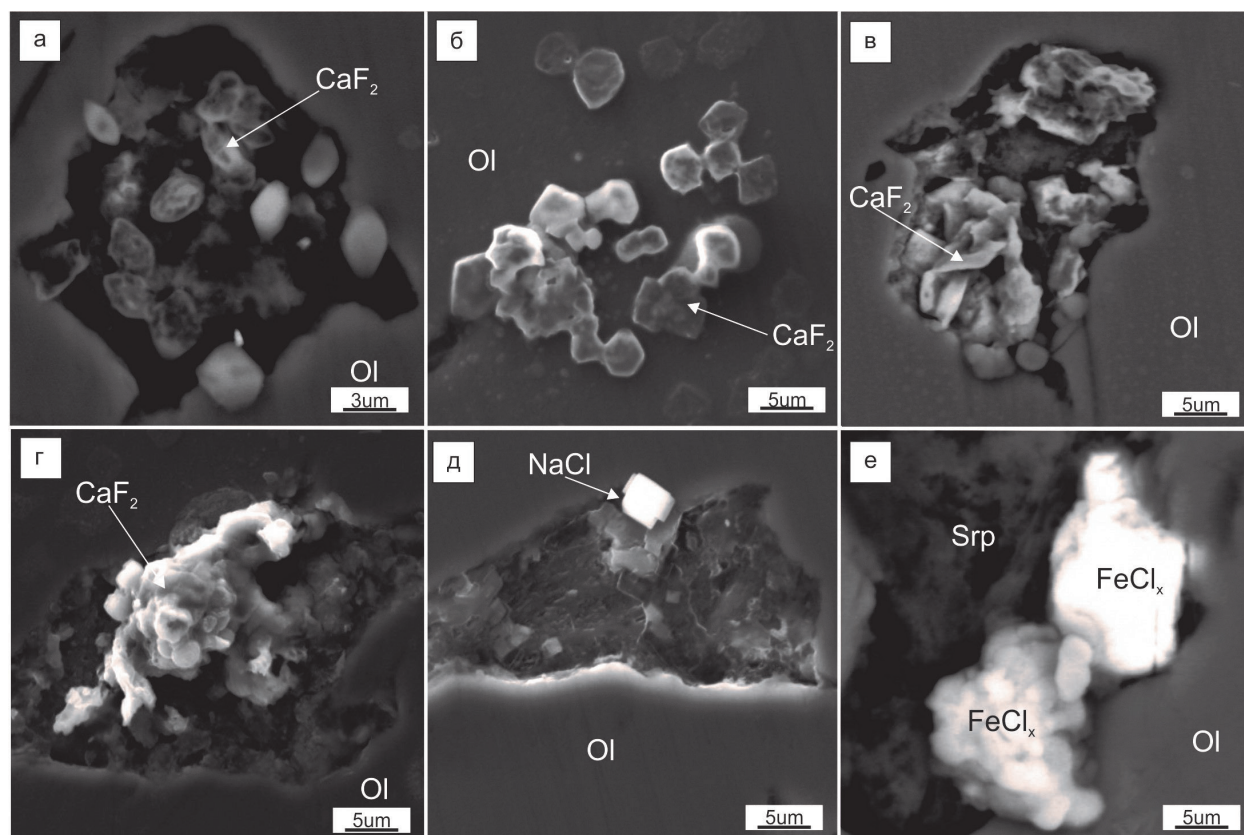


Рис. 5. Серпентин-солевые включения в оливине дунитов массива Матыскен. а-г – включения флюорита, д – галит в сростании с сильвином, е – хлориды/гидрохлориды железа.

Fig. 5. Serpentine-salt inclusions in olivine from dunite of the Matysken massif. а-г – fluorite inclusions, д – halite with silvine, е – chlorides/hydrochlorides of iron.

отметить, что изучался оливин, как из дунитов, так и из образцов прожилково-вкрапленных и жильных хромититов. Оливин из хромититов практически не содержит силикатно-оксидных включений.

Флюидно-минеральные включения

Флюидно-минеральные включения, как правило, расположены под различными углами к ориентированным системам силикатно-оксидных включений и не имеют собственной кристаллографической ориентировки. В основном, они сложены серпентином в ассоциации с которым фиксируются газовые фазы: молекулярный водород и метан (рис. 4).

При вскрытии включений было обнаружено, что серпентин тесно ассоциирует с различными солями: фторидом кальция (рис. 5 а-г), хлоридами натрия, калия (рис. 5 д) и железа (рис. 5 е). Фторид кальция по составу соответствует флюориту, как правило, находясь в тесных срастаниях с серпентином, или же слагая отдельные кристаллы. Кристаллы галита характеризуются выраженной зональностью, в центральных частях преобладает К (по зонам наблюдается переход галит-сильвин), в периферических – Na. Соединения железа, предположительно, являются смесью хлоридов железа (2) и (3) и/или гидрохлоридов.

Обсуждение результатов и выводы

Изученные включения разделены на две разновидности: твердофазные (силикатно-оксидные) и флюидно-минеральные (серпентин-солевые).

Силикатно-оксидные включения закономерно ориентированы, и занимают позицию по кристаллографическим направлениям в оливине, что является косвенным свидетельством их формирования в результате распада твёрдого раствора. Вероятно, при кристаллизации оливина в нём было растворено достаточное количество хрома, кальция и трёхвалентного железа. На первом этапе при декомпрессии и смене температурного режима, вследствие падения изоморфной ёмкости оливина (Khisina et al., 2013) из него выделяется хромит, в виде ориентированных ламелей (рис. 6 а). В то же время, экспериментально показана возможность формирования ориентированных ламелей шпинели при перекристаллизации оливина в ходе его реакции с высокотемпературными водными флюидами, причём даже при непродолжительном по времени воздействию (Zelenski et al., 2022). В целом, можно предполагать подобный механизм и для хромистой шпинели. В данной работе мы предлагаем альтернативный вариант, при котором реакция с водными флюидами произошла

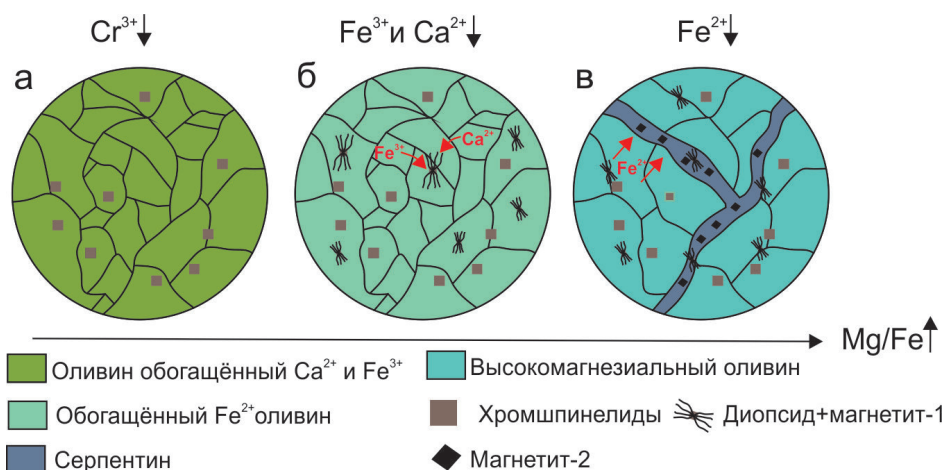


Рис. 6. Стадийность в формировании высокомагнезиального (Fo₉₅₋₉₆) оливина через серию распадов твёрдых растворов. а – распад высокобарного оливина с выделением хромшпинелидов (предположительно – магнезиоферрита), б – выделение на хромитовых зародышах диопсида и магнетита-1 (выделяется железо (3), в – серпентинизация с окислением железа (2) и выделением изометричных кристаллов магнетита-2.

Fig. 6. Stages of high-Mg olivine (Fo₉₅₋₉₆) formation through a series of solid solution decays. а – decay of high-pressure olivine with the release of chrome spinels (supposedly – magnesioferrite), б – growth diopside-magnetite symplectites on the magnesioferrite nucleus (release Fe³⁺), в – serpentinization: oxidation Fe²⁺ and formation isometric magnetite-2 crystals.

на стадии серпентинизации, а на ранних этапах происходил распад серии твёрдых минеральных растворов. В пользу этого говорит присутствие симплектитов диопсида и магнетита на хромитовых «зародышах» как в неизменённых частях оливина, так и в трещинах, заполненных серпентином, а также пространственное разобщение силикатно-оксидных и флюидно-минеральных включений внутри зёрен оливина.

Затем, происходит одновременный рост из твёрдого раствора диопсида и магнетита (рис. 6 б), причём в образование этой генерации магнетита может происходить и без окислительно-восстановительных процессов, только за счёт Fe^{3+} , присутствовавшего в структуре оливина. Возможность одновременной кристаллизации магнетита и диопсида при декомпрессии оливина доказана экспериментальными работами (Khisina et al., 2013, 2015; Arai et al., 2021). Вследствие одновременного роста чаще всего и образуются подобные сростания – симплектиты. При этом, можно предположить, что при декомпрессии оливина из него выделяется некоторое количество воды, которая далее влияет на состав флюидов. Похожие симплектитовые сростания ранее описывались и для других объектов, хотя чаще всего в них обнаруживались симплектиты магнетита с ортопироксеном (Bell et al., 1975; Chatterjee et al., 2020; Nabtoor et al., 2022 и др.).

Флюидно-минеральные включения, их фазовый состав следующий: лизардит $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (преобладает), магнетит Fe_3O_4 , галогениды (сильвин KCl , галит NaCl , флюорит CaF_2 и хлорид железа FeCl_3) и газовая фаза, состоящая из смеси водорода H_2 и метана CH_4 с преобладанием первого. Происхождение такого набора дочерних фаз во включениях можно объяснить с помощью следующей модели:

Из-за тектонических движений либо в силу других причин, зёрна оливина растрескивались, в новообразованные трещины проникал существенно водный высокотемпературный флюид с растворёнными в нём Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , F^- , $\text{CO}_3^{2-}/\text{CH}_4$ и SiO_2 . Растворение и перекристаллизация оливина в этом флюиде привели залечиванию трещин и к консервации реликтов этого высокотемпературного флюида в оливине в виде вторичных флюидных включений. Для того, чтобы во время формирования включений на месте трещин образовывался оливин, а не серпентин, температура проникающего флюида должна быть выше чем температура реакции $\text{Srp} = \text{Ol} + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2^{\text{aq}}$ (согласно экспериментальным данным (Frost and Beard, 2007) выше 350–500 °C (рис. 7). При понижении температуры включения попадают в область стабильности серпентина, водный раствор внутри включений начинает взаимодействовать с оливином-хозяином с образованием серпентина, магнетита и водорода в ходе следующей реакции: $3(\text{Mg}_x\text{Fe}_{2-x})\text{SiO}_4 + (2x+4)\text{H}_2\text{O} + (2x-3)\text{SiO}_2^{\text{aq}} = x\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + (2-x)\text{Fe}_3\text{O}_4 + (2-x)\text{H}_2$, где x – количество формульных единиц Mg в оливине, SiO_2^{aq} – растворённый в воде кремнезём.

При протекании этой реакции вода расходуется. Так как растворённые в водном флюиде внутри включений Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , F^- плохо входят в структуру серпентина и магнетита, их концентрация увеличивается по мере уменьшения количества несвязанной воды во включениях. Когда водный флюид внутри включения достигает насыщения по флюориту, галиту и сильвину, эти минералы выпадают на стенках включений в виде идиоморфных кристаллов (рис. 4). Хлориды железа могут образовываться при реакции выделяющегося при серпентинизации Fe^{3+} с Cl^- из флюида во включениях.

В серпентин-солевых включениях обнаружены газы: водород и метан. Согласно различным моделям, водород образуется либо *in situ* во включениях при серпентинизации оливина на стенках в ходе реакции 1 (Grozeva et al., 2020), либо водород формируется при серпентинизации оливина на границах зёрен и в трещинах, а затем диффундирует через решётку оливина во включения (Hall et al., 1991). Метан, концентрация которого меньше, мог образоваться во включениях при восстановлении водородом растворённых в водном растворе $\Sigma\text{CO}_2(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ (Klein et al., 2019). Либо метан мог быть изначально растворён в захваченном оливином флюиде (Arai et al., 2021). Взаимодействие флюидов / растворов из включений с минералом-хозяином широко распространено и описано в литературе, (например Andersen et al., 1984) в том числе и взаимодействие оливина с водными флюидами, законсервированными в нём в виде включений (Klein et al., 2019, Zhang et al., 2021).

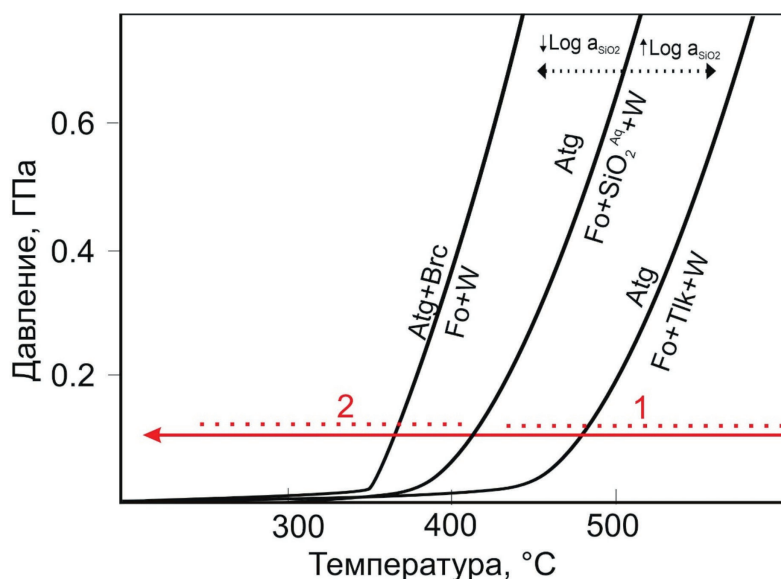


Рис. 7. Фазовая диаграмма системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$ в координатах температура-давление. Черными линиями показаны реакции, ограничивающие поле стабильности серпентина: оливин с водным раствором с низким содержанием SiO_2 ($\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] < -2.5$): $\text{Fo} + \text{W} = \text{Srp} + \text{Bru}$, при температурах ниже температуры этой реакции водный раствор всегда будет реагировать с оливином; реакция разложения серпентина $\text{Atg} = \text{Fo} + \text{Tlk} + \text{W}$ ограничивающая область стабильности этого минерала сверху; реакция серпентинизации оливина водным раствором, содержащим SiO_2 ($-2.5 < \text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] < -1$) $\text{Fo} + \text{W} + \text{SiO}_2^{\text{Aq}} = \text{Srp}$. Расположение линии этой реакции на P-T диаграмме зависит от активности кремнезёма: при $\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] = -2.5$ линия этой реакции совпадает с линией реакции $\text{Fo} + \text{W} = \text{Srp} + \text{Bru}$, по мере увеличения активности SiO_2 в растворе температура этой реакции растёт и при $\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] = -1$ совпадает с линией реакции дегидратации серпентина. По нашему мнению, серпентин во включениях образовался именно в ходе реакции $\text{Fo} + \text{W} + \text{SiO}_2^{\text{Aq}} = \text{Srp}$, поэтому положение линии этой реакции и активность SiO_2 в растворе определяет температуру начала серпентинизации. Красной сплошной линией показан процесс остывания дунита. Пунктирными красными линиями показаны возможные вариации P-T параметров процессов залечивания трещин и формирования флюидных включений (1), и преобразований включений в ходе процесса серпентинизации (2). Atg – антигорит, Fo – форстерит, W – вода, Brц – брусит. Диаграмма составлена с использованием данных (Evans, 2004; Ulmer & Trommsdorff, 1995).

Fig.7. Phase diagram of the $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$ system in temperature-pressure coordinates. The black lines show the reactions that limit the stability field of serpentine: olivine with an aqueous solution with a low content of SiO_2 ($\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] < -2.5$): $\text{Fo} + \text{W} = \text{Srp} + \text{Bru}$, at temperatures below the temperature of this reaction, an aqueous solution will always react with olivine; serpentine decomposition reaction $\text{Atg} = \text{Fo} + \text{Tlk} + \text{W}$ limiting the region of stability of this mineral from above; olivine serpentinization reaction with an aqueous solution containing SiO_2 ($-2.5 < \text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] < -1$) $\text{Fo} + \text{W} + \text{SiO}_2^{\text{Aq}} = \text{Srp}$. The location of the line of this reaction on the P-T diagram depends on the activity of silica: at $\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] = -2.5$, the line of this reaction coincides with the line of the reaction $\text{Fo} + \text{W} = \text{Srp} + \text{Bru}$, as the activity of SiO_2 in the solution increases, the temperature of this reaction increases and at $\text{Log}[a_{\text{SiO}_2}] = -1$ coincides with the serpentine dehydration reaction line. In our opinion, serpentine in inclusions was formed precisely during the reaction $\text{Fo} + \text{W} + \text{SiO}_2^{\text{Aq}} = \text{Srp}$, therefore, the position of the line of this reaction and the activity of SiO_2 in solution determine the temperature at which serpentinization begins. The solid red line shows the dunite cooling process. Dashed red lines show possible variations in the P-T parameters of fracture healing and fluid inclusion formation (1), and inclusion transformations during the serpentinization process (2). Atg is antigorite, Fo is forsterite, W is water, Brц is brucite. Chart compiled using data from (Evans, 2004; Ulmer & Trommsdorff, 1995).

Отделение водных растворов от дунитовых массивов на поздних стадиях их эволюции при остывании, на поздних стадиях их эволюции также широко распространено и описано в литературе (Пушкарев и др., 2006).

В целом, можно резюмировать, что, вероятнее всего формирование силикатно-оксидных и флюидно-минеральных включений оторваны по времени. Кристаллизация симплектитов диопсида и магнетита, вероятно, произошла вследствие серии распадов твёрдых растворов, в то время как формирование флюидно-минеральных включений, содержащих газовые фазы, произошло

на постмагматическом этапе, вследствие отделения высокотемпературного (выше 500 °С) флюида, насыщенного К, Na, Са, Cl и F ионами, и его реакции с оливином, с образованием антигорита и далее – выделения газовых фаз и перехода антигорит-лизардит.

Благодарности

Авторы признательны А.В. Головину (ИГМ СО РАН) за помощь в проведении рамановской спектроскопии.

Исследования финансировались Российским научным фондом (грант №21-17-00122).

Литература

1. Батанова В.Г., Астраханцев О.В., Сидоров Е.Г. Дуниты Гальмознанского гипербазит-габбрового массива (Корякское нагорье) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 1. С. 24–35.
2. Батанова В.Г., Савельева Г.Н. Миграция расплавов в мантии под зонами спрединга и образование дунитов замещения: обзор проблемы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 992–1012.
3. Бетехтин А.Г. Платина и другие минералы платиновой группы. М. Изд-во: АН СССР, 1935. 148 с.
4. Высоцкий Н.К. Месторождения платины Исковского и Нижне-Тагильского районов на Урале. Труды Геологического комитета. 1913. Вып. 62. 692 с.
5. Заварицкий А.Н. Коренные месторождения платины на Урале. Материалы по общей и прикладной геологии. Ленинград. Изд-во: Геологического комитета, 1928. 64 с.
6. Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О. Платинометальная минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. Ленинград. Изд-во: Недра, 1992. 217 с.
7. Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург. Изд-во: Уральский университет, 1997. 488 с.
8. Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Д., Заккарины Ф. Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса. Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.
9. Шмелев В.Р., Филиппова С.С. Структура и механизм формирования Нижнетагильского дунит-клинопироксенитового массива (Средний Урал) // Геотектоника. 2010. № 4. С. 65–86.
10. Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Кожевников Д.А., Котляров В.А. Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитовых дунитов Крака, Южный Урал). Минералогия. 2016. № 2(4). С. 56–77.
11. Andersen T., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. The trapped fluid phase in upper mantle xenoliths from Victoria, Australia: implications for mantle metasomatism. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. No 88(1-2). P. 72–85.
12. Arai S., Ishimaru S., Mizukami T. Methane and propane micro-inclusions in olivine in titanoclinohumite-bearing dunites from the Sanbagawa high-P metamorphic belt, Japan: Hydrocarbon activity in a subduction zone and Timobility. Earth Planet. Sci. Lett. 2012. V. 353–354, P. 1–11.
13. Abrajano T.A., Sturchio N.C., Bohlke J.K., Lyon G.L., Poreda R.J., Stevens C.M. Methane-hydrogen gas seeps, Zambales ophiolite, Philippines: deer or shallow origin? Chemical Geology. 1988. V. 71. P. 211–222. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90116-7.
14. Arai S., Hoshikawa C., Miura M., Ando J., Ishimaru S., Mochizuki N., Tamura A. Dehydrogenation of deep-seated hydrous olivine in “black-colored” dunites of arc origin. Lithos, 2021. V. 384–385. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.105967>.
15. Bell P.M., Mao H. K., Edwin Roedder and P. W. Weiblen. The problem of the origin of symplectites in olivine-bearing lunar rocks. Proc. Lunar Sci. Conf. 6th. 1975. P. 231–248.
16. Chatterjee S., Bandyopadhyay D., Takazawa E., Michibayashi K. Orthopyroxene–magnetite symplectite in olivine gabbros from the lower crustal Oman Ophiolite: Oman Drilling Project, HoleGT2A. J Mineral Petrol Sci. 2021. V. 116. P. 170–175.
17. Coveney R. M., Jr. Hydrogen and serpentinite—their roles in the localization of gold ores at the Oriental mine, Alleghany, California (abs.): Economic Geology. 1971. V. 66. P. 1255–1266.
18. Evans B.W. The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable. International Geology Review, 2004. V. 46(6). P. 479–506. DOI: 10.2747/0020-6814.46.6.479.
19. Frost B.R., Beard J.S.; On silica activity and serpentinitization. Journal of petrology. 2007. V. 48. No 7. P. 1351–1368.
20. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. J. Geochem. Explor. 2012. V. 112. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>.

21. Grozeva N.G., Klein F., Seewald J.S. and Sylva S.P. Chemical and isotopic analyses of hydrocarbon-bearing fluid inclusions in olivine-rich rocks. *Phil. Trans. R. Soc.* 2020. A 378, 20180431. DOI: 10.1098/rsta.2018.0431.
22. Hall D.L., Bodnar R.J. and Craig J.R. Evidence for post-entrapment diffusion of hydrogen into peak metamorphic fluid inclusions from the massive sulfide deposits at Ducktown, Tennessee. *Am. Mineral.* 1991. V. 76. P. 1344–1355.
23. Klein F., Tarnas J. and Bach W. Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. *Elements*. 2020. V. 16. P. 19–24. DOI: 10.2138/gselements.16.1.19.
24. Khisina N.R., Wirth R., Abart R., Rhede D., Heinrich W. Oriented chromite–diopside symplectic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by “Luna-24” mission. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. V. 104. P. 84–98. DOI: 10.1016/j.gca.2012.10.050.
25. Khisina N.R., Lorenz C.A. Dehydration as the mechanism of formation of the oriented spinel–pyroxene symplectites and magnetite–hematite inclusions in terrestrial and extraterrestrial olivines. *Petrol.* 2015. V. 23. P. 176–188. <https://doi.org/10.1134/S086959111502006X>.
26. Abdelmonem Marsas Habtoor, Ahmed Hassan Ahmed, Ibrahim Abdulhamid Al-Akhaly, Hisham Mohamed Harbi, Nuru Mohammed Said. Orthopyroxene–magnetite symplectites in gabbro of Gabal Taftafan, western Arabian Shield, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022. V. 15. P. 524. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09812-x>.
27. Kamenetsky V.S., Lygin A.V., Foster J.G., Meffre S., Maas R., Kamenetsky M.B., Goemann K., and Beresford S.W. A story of olivine from the McIvor Hill complex (Tasmania, Australia): Clues to the origin of the Avebury metasomatic Ni sulfide deposit // *American mineralogist*. 2016. V. 101. P. 1321–1331. <http://dx.doi.org/10.2138/am-2016-5509>.
28. Raymond M., Coveney JR., Edwin D., Goebel, Edward J. Zeller, Gisea A.M. Dreschooff and Ernest E. Angino. Serpentinization and the Origin of Hydrogen Gas in Kansas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1987. V. 71. No. 1. P. 39–48.
29. Suda K., Ueno Y., Yoshizaky M., Nakamura H., Kurokawa K., Nishiyama E., Youshino K., Hongoh Y., Kawachi K., Omori S., Yamada K., Yoshida N., Maruyama S. Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: The CH₄–H₂–H₂O hydrogen isotope systematic of the Hakuba Happo hot spring // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 386. P. 112–125. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.11.001.
30. Ulmer P., Trommsdorff V. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*. 1995. V. 268. P. 858–861.
31. Zelenski M., Plyasunov A.V., Kamenetsky V.S., Nekrylov N., Matveev D., Korneeva A. High-temperature water–olivine interaction and hydrogen liberation in the subarc mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2022. V. 177. No 47. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01910-z>.
32. Zhang L., Wang Q., Ding X., Li W.C. Diverse serpentinization and associated abiotic methanogenesis within multiple types of olivine-hosted fluid inclusions in orogenic peridotite from northern Tibet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 296. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.gca.2020.12.016.