



УДК 549, 552:11

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-3-1>

МИНЕРАЛОГИЯ ОЛИВИНОВЫХ ПОРОД И УСЛОВИЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ (О. ЖОХОВА, АРХ. НОВОСИБИРСКИЕ ОСТРОВА, РОССИЯ)

Н.И. Пономарева¹, Л.П. Никитина², В.Н. Бочаров¹, Н.С. Власенко¹, С.Ю. Янсон¹,
В.Ф. Проскурнин³, А.Н. Сироткин⁴, Н.М. Столбов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7-9-11,
г. Санкт-Петербург, 199034 Россия; n_ponomareva@mail.ru

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, наб. Макарова 2, г. Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Средний пр. 74, г. Санкт-Петербург, 199178 Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового
океана им. И.С. Грамберга, Английский пр. 1, г. Санкт-Петербург, 190121 Россия

Статья поступила в редакцию 03.08.2025 г., после доработки 05.09.2025 г., принята к печати 06.09.2025 г.

Аннотация. Настоящее сообщение посвящено результатам микроскопического изучения минералов из ксенолитов мантийных шпинелевых лерцолитов в кайнозойских базальтоидах о. Жохова (арх. Новосибирские острова, Россия), ранее не изученных с применением микроанализа и рамановской спектроскопии, а также оценке условий формирования (T , P , f_{O_2}) минеральной ассоциации оливин-шпинель. Изученный оливин является одним из основных минералов шпинелевых лерцолитов о. Жохова. Он содержит многочисленные сингенетические и более поздние минеральные и флюидные включения. Среди твердофазных включений установлены энстатит, диопсид, шпинель, апатит, сульфиды, а также твердые углеводороды (кероген и битумы), определенные с помощью рамановской спектроскопии. Во флюидных включениях на основе рамановской спектроскопии установлены CO_2 и, в ряде случаев, смесь газов – $CO_2 + CO$, при этом 97.5 % приходится на CO_2 и 2.5 % – на CO . Вычислена температура сосуществования оливин-шпинелевой ассоциации по различным геотермометрам. В среднем, она составляет 1010 K (737 °C) при давлении 1 ГПа. Фугитивность кислорода для лерцолитов о. Жохова (lgf_{O_2}) лежит в интервале от –13.9 до –14.6.

Ключевые слова: о. Жохов, оливин, пироксены, шпинель, минеральные, флюидные и углеводородные включения, геотермометры, фугитивность кислорода.

Финансирование. Исследования были поддержаны грантом СПбГУ № 124032000029-9.

Благодарности. Авторы благодарны А.М. Кулькову (РЦ Рентгенодифракционные методы исследования СПбГУ), Н.Р. Пинчук, К.А. Бенкину и О.В. Кашпар (РЦ Микроскопии и микроанализа СПбГУ) за консультации и помощь при выполнении исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью

Вклад авторов. Н.И. Пономарева – микроскопические исследования минералов, расчеты формул и P - T - f_{O_2} параметров, интерпретация результатов, написание черновика рукописи, редактирование финального варианта рукописи; Л.П. Никитина – формулировка идеи, постановка задач; В.Н. Бочаров – рамановская спектроскопия минералов и включений в них, анализ спектров и интерпретация результатов, редактирование финального варианта рукописи; Н.С. Власенко – электронно-микроскопические исследования, редактирование финального варианта рукописи; С.Ю. Янсон – аналитические работы, кластерный анализ, редактирование финального варианта рукописи; В.Ф. Проскурнин, А.Н. Сироткин, Н.М. Столбов – сбор и описание геологических данных; А.Н. Сироткин – написание геологической части статьи и редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Пономарева Н.И., Никитина Л.П., Боcharов В.Н., Власенко Н.С., Янсон С.Ю., Проскурнин В.Ф., Сироткин А.Н., Столбов Н.М. Минералогия оливиновых пород и условия их формирования (о. Жохова, арх. Новосибирские острова, Россия). Минералогия, 2025, 11(3), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-1

MINERALOGY OF OLIVINE ROCKS AND CONDITIONS OF THEIR FORMATION (ZHOKHOV ISLAND, NEW SIBERIAN ISLANDS, RUSSIA)

N.I. Ponomareva¹, L.P. Nikitina², V.N. Bocharov¹, N.S. Vlasenko¹, S.Yu. Yanson¹,
V.F. Proskurnin³, A.N. Sirotkin⁴, N.M. Stolbov⁴

¹ St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7-9-11, St. Petersburg, 199034 Russia; n_ponomareva@mail.ru

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, nab. Makarova 2, St. Petersburg, 199034 Russia

³ Karpinsky Russian Research Geological Institute, Sredniy pr. 74, St. Petersburg, 199178 Russia

⁴ Gramberg All-Russian Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean, Angliyskiy pr. 1, St. Petersburg, 190121 Russia

Received 03.08.2025, revised 05.09.2025 accepted 06.09.2025

Abstract. This paper is dedicated to results of microscopic study of minerals from xenoliths of mantle spinel lherzolites in Cenozoic basaltoids of Zhokhov Island (New Siberian Islands, Russia) using microanalysis and Raman spectroscopy, as well as the assessment of formation conditions (T, P, f_{O_2}) of the olivine-spinel mineral assemblage. Olivine is one of the major minerals of spinel lherzolites of the Zhokhov Island. It contains numerous syngenetic and later mineral and fluid inclusions. The solid-phase inclusions include enstatite, diopside, spinel, apatite, sulfides, and solid hydrocarbons identified by Raman spectroscopy as kerogen and bitumen. Based on results of Raman spectroscopy, fluid inclusions contain CO₂ and, locally, a mixture of CO₂ (97.5 %) and CO (2.5 %). According to various geothermometers, the average temperature of co-existence of the olivine-spinel assemblage is 1010 K (737 °C) at a pressure of 1 GPa. Oxygen fugacity ($\lg f_{O_2}$) for lherzolites of the Zhokhov Island ranges from –13.9 to –14.6.

Keywords: Zhokhov Island, olivine, pyroxenes, spinel, mineral, fluid and hydrocarbon inclusions, geothermometers, oxygen fugacity.

Funding. This work was supported by the St. Petersburg State University, grant no. 124032000029-9.

Acknowledgements. We are grateful to A.M. Kulkov (X-ray Diffraction Research Methods Recourse Center of the St. Petersburg State University) and N. R. Pinchuk, K.A. Benkin and O.V. Kashpar (Recourse Center of Microscopy and Microanalysis of the St. Petersburg State University) for advice and assistance in studies.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest related to the manuscript.

Author contribution. N.I. Ponomareva – microscopic studies of minerals, calculation of P - T - f_{O_2} parameters, analysis and interpretation of results, writing a draft of the manuscript, editing the final version of the manuscript; L.P. Nikitina – formulation of an idea, statement of tasks; V.N. Bocharov – Raman spectroscopy, analysis of Raman spectra and interpretation of results, editing the final version of the manuscript; N.S. Vlasenko – electron microscope studies, editing the final version of the manuscript; S.Y. Yanson – analytical work, cluster analysis, editing of the final version of the manuscript; V.F. Proskurnin, A.N. Sirotkin, N.M. Stolbov – collection and description of geological data; A.N. Sirotkin – writing the geological part of the paper and editing the final version of the manuscript. All the authors approved the final version of the article before publication.

For citation: Ponomareva N.I., Nikitina L.P., Bocharov V.N., Vlasenko N.S., Yanson S.Y., Proskurnin V.F., Sirotkin A.N., Stolbov N.M. Mineralogy of olivine rocks and conditions of their formation (Zhokhov island, New Siberian islands, Russia). Mineralogy, 2025, 11(3), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-1

ВВЕДЕНИЕ

Остров Жохова находится в арктическом архипелаге Новосибирские острова и входит в состав островов Де-Лонга (пять островов в северо-восточной части архипелага), являясь вторым по величине среди них (рис. 1). Большая часть (до 80%) острова сложена неогеновыми трахибазальтами (рис. 1). На

севере острова известны выходы щелочных ультраосновных фойдитов (лимбургитов) неоген-четвертичного возраста (Твердые..., 2010; Шманяк, 2021). Среди последних присутствуют ксенолиты мантийных шпинелевых перидотитов (рис. 2) по определению одних исследователей (Кораго и др., 2014) или шпинелевых лерцолитов по определению других (Силантьев и др., 1991).

Ранее было подтверждено присутствие ксенолитов, состоящих из двух частей, которые отличаются по текстуре, минералогическому и химическому составу одноименных минералов (Никитина и др., 2023). Одна часть ксенолита представляет собой породу мелкозернистой структуры с оливином, авгитом и титаномagnetитом (рис. 3). Другая часть ксенолита имеет массивную текстуру, крупнозернистую структуру и является шпинелевым лерцолитом, в котором основным минералом является оливин.

Микроскопическое изучение оливина позволило установить в нем многочисленные включения, в том числе и углеводов. В научной литературе существует дискуссия о происхождении углеводов в Арктическом шельфе и данная статья – это попытка найти подтверждение возможности абиотического происхождения нефти при помощи детального изучения включений, содержащих углеводороды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроскопическое изучение минералов из шпинелевых лерцолитов проведено в двусторонне-полированных пластинках на поляризационном микроскопе Leica DM4500 P, оснащенный цифровой камерой (РЦ Рентгендифракционные методы исследования, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, Россия). Состав минералов определен с помощью электронного сканирующего микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 20 при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1.5 нА, рабочем расстоянии 10 мм и продолжительности накопления спектра 20 с (РЦ Геомодель, СПбГУ). Для стандартизации использовались эталоны природных минералов, металлов и стекол (кварц, альбит, ортоклаз, волластонит, Al_2O_3 , MgO и самородные металлы). Для оптимизации условий измерений (приведение условий анализа к условиям измерения стандартов) использовался металлический кобальт.

Детальные исследования оливина, энстатита, хромистой шпинели и микроанализ присутствующих в них включений проводились на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM 3000 с приставкой для энергодисперсионного микроанализа OXFORD в режиме низкого вакуума, что позволяло использовать непроводящие образцы без предварительного напыления, а также с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D (FEI) с аналитическим комплексом

Pegasus 4000 (EDAX). Кроме того, использовался метод электронного кластерного анализа с помощью программного сервиса системы Quanta 200 3D (РЦ СПбГУ «Микроскопии и микроанализа»).

Состав включений в минералах определялся на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 (РЦ СПбГУ «Геомодель») при 100-кратном увеличении объектива. Регистрация спектров комбинационного рассеяния выполнена в спектральном диапазоне 4000–100 cm^{-1} . Источником возбуждения служил твердотельный лазер 532 нм с мощностью 1–50 мВт. Калибровка прибора осуществлялась по Si-эталону (520.7 cm^{-1}). Использовалась дифракционная решетка 1800 ш/мм, диаметр конфокального отверстия 300 мкм. Время накопления данных от 2 до 10 с с количеством повторов от 2 до 15. Включения идентифицировались по данным из работ (Филиппов, 2014; Frezzotti et al., 2012) и на основе сравнения полученных спектров со спектрами в базе RRUFF (Database of Raman ... <https://rruff.info>).

ХАРАКТЕРИСТИКА ВКЛЮЧЕНИЙ

Микроскопическое изучение двусторонне-полированных пластинок из шпинелевого лерцолита показало, что крупные зерна оливина содержат многочисленные тонкие коричневатые одинаково ориентированные включения пироксена (рис. 4а). По данным микроанализа и рамановской спектроскопии пироксен является энстатитом (рис. 4б). Он характеризуется низким содержанием железа, в среднем 5.82 ± 0.07 мас. % (табл. 1).

Как показано многими исследователями (Смирнова, 1971; Агафонов и др., 1974; Рябов, 1992), в оливине ультраосновных и основных пород часто встречаются закономерно ориентированные включения силикатов и рудных минералов, которые являются продуктами распада первичного твердого раствора оливина. Под микроскопом структуры распада представляют собой пластинчатые микровключения (ламели), реже они имеют вид скелетных кристаллов, которые иногда приобретают вид пунктирных линий.

Помимо включений энстатита в оливине наблюдаются единичные ярко-зеленые зерна хромдиопсида размером менее 0.2 мм (рис. 5). В зернах оливина и в межзерновом пространстве присутствуют многочисленные микрокристаллы шпинели размером менее 0.1 мм, в которой установлено до 25.0 мас. % Al_2O_3 и до 40.0 мас. % Cr_2O_3 (табл. 2). Грани микрокристаллов корродированны (рис. 6). Периферия зерен шпинели



Рис 1. Геологическая карта архипелага Новосибирские острова, с упрощением по (Твердые..., 2010).

Формации: 1 – позднелейстоценовые-голоценовые морские аллювиальные, дельтовые пески, галечники, гравийники; 2 – среднелейстоценовые-голоценовые алевроиты, реже пески, глины, торф «едомной» серии; 3 – плиоцен-раннелейстоценовые морские глины, алевроиты, реже пески; 4 – плиоцен-четвертичная формация ультраосновных фойдитов; 5 – неогеновая трахибазальтовая; 6 – эоцен-миоценовая лагунно-континентальная угленосная; 7 – сеноман-туронская лагунно-континентальная угленосная; 8 – позднемеловая лейкобазальтовая; 9 – раннемеловая терригенно-вулканогенная угленосная; 10, 11 – позднелюрская-раннемеловая (10) и пермо-триасовая (11) флишоидная; 12 – раннемезозойская натровых базальтов; 13 – среднекаменноугольная-юрская карбонатно-терригенная; 14 – каменноугольная (?) терригенно-вулканогенная; 15 – позднедевонская-раннекаменноугольная терригенная; 16 – ордовикская-среднедевонская известняково-доломитовая; 17 – среднекембрийская-среднеордовикская терригенная; 18 – протерозойская амфиболитовая; 19 – позднемеловая габбродиабазовая; 20 – раннемеловая гранит-гранодиоритовая; 21 – раннемеловая лейкогранитовая; 22 – раннемеловая диорит-гранодиоритовая; 23 – раннемезозойская дунит-перидотитовая; 24 – позднелюрская-четвертичная габбро-диабазовая; 25 – нескрытые интрузии кислого состава; 26–29: области развития отложений чехла (26) резко сокращенной мощности или их отсутствия, (27) преимущественно палеоген-четвертичного возраста, (28) позднемелового-четвертичного возраста, (29) с выпадением палеогеновых осадков; 30 – области повышенных мощностей позднемеловых-четвертичных отложений чехла в грабенообразных прогибах; 31 – разрывные нарушения, достоверные и предполагаемые; 32 – они же, скрытые под рыхлым чехлом, достоверные и предполагаемые; 33 – геологические границы, достоверные и предполагаемые; 34 – они же, скрытые под рыхлым чехлом, достоверные и предполагаемые.

Fig. 1. Geological map of the New Siberian Islands, simplified after (Mineral..., 2010).

Rock complexes: 1 – Late Pleistocene-Holocene marine alluvial and deltaic sand, pebble, gravel; 2 – Middle Pleistocene-Holocene silt, less often sand, clay and peat of the Yedomia Group; 3 – Pliocene-Early Pleistocene marine clay, silt, less often sand; 4 – Pliocene-Quaternary ultramafic foidite; 5 – Neogene trachybasalt; 6 – Eocene-Miocene lagoonal-continental coal-bearing; 7 – Cenomanian-Turonian lagoonal-continental coal-bearing; 8 – Late Cretaceous leucobasalt; 9 – Early Cretaceous terrigenous-volcanic coal-bearing; 10, 11 – Late Jurassic-Early Cretaceous (10) and Permian-Triassic (11) flyschoid; 12 – Early Mesozoic Na basalt; 13 – Middle Carboniferous-Jurassic carbonate-terrigenous; 14 – Carboniferous (?) terrigenous-volcanic; 15 – Late Devonian-Early Carboniferous terrigenous; 16 – Ordovician-Middle Devonian limestone-dolomite; 17 – Middle Cambrian-Middle Ordovician terrigenous; 18 – Proterozoic amphibolite; 19 – Late Cretaceous gabbrodiabase; 20 – Early Cretaceous granite-granodiorite; 21 – Early Cretaceous leucogranite; 22 – Early Cretaceous diorite-granodiorite; 23 – Early Mesozoic dunite-peridotite; 24 – Late Paleozoic gabbrodiabase; 25 – unexposed felsic intrusions; 26–29: cover deposits (26) of strongly reduced thickness or their absence, mainly of (27) Paleogene-Quaternary and (28) Late Cretaceous-Quaternary, and (29) without Paleogene sediments; 30 – areas of higher thickness of Late Cretaceous-Quaternary cover deposits in graben-like troughs; 31 – faults, proven and inferred; 32 – the same, hidden under loose cover, proven and inferred; 33 – geological boundaries, proven and inferred; 34 – the same, hidden under a loose cover, proven and inferred.

характеризуется трещиноватостью и присутствием червеобразных минеральных агрегатов, в составе которых установлены K, Na, Si и Al (рис. 7, 8). По данным рамановской спектроскопии K-Na алюмосиликатная фаза является стеклом. Здесь же установлены скопления твердых углеводов (УВ), что подтверждено методом электронного кластерного анализа с помощью программного сервиса системы Quanta 200 3D (рис. 9). В этом же кристалле шпинели установлен титанит (рис. 10).

Кроме хромистой шпинели в оливине отмечаются зерна апатита, содержащие многочисленные включения УВ, а также микроскопические (3–5 мкм) включения магнетита (рис. 11). В оливине также встречаются включения пентландита и халькопирита в виде изометричных зерен, размер которых не превышает 5–8 мкм (рис. 12).

В прожилках шириной не более 15–20 мкм, пересекающих оливин и шпинель, наблюдаются

твердые черные графитоподобные образования (рис. 13). С помощью рамановской спектроскопии установлено, что они представлены керогеном и битумами. Более крупные УВ включения (до 15 мкм) имеют сферическую или неправильную форму (рис. 14). Они не люминесцируют в ультрафиолетовом свете, но при исследовании на рамановском спектрометре с видимым источником возбуждения (532 нм) проявляется сильная флуоресценция, что не позволяет определить их точный состав.

В оливине наблюдаются многочисленные флюидные включения разного состава и разных размеров (Никитина и др., 2023б) – это расплавные не раскристаллизованные (газово-твердые) или частично раскристаллизованные с одной дочерней фазой (Мельников и др., 1999). Газово-твердые включения размером менее 20 мкм имеют трубчатую, каплеобразную или червеобразную форму (рис. 15, 16). По данным рамановской спектро-



Рис. 2. Ксенолит мантийного шпинелевого лерцолита (1) в базальтоидах (2). Образец В.Ф. Проскурнина.

Fig. 2. Xenolith of mantle spinel lherzolite (1) in basaltoids (2). Sample of V.F. Proskurnin.

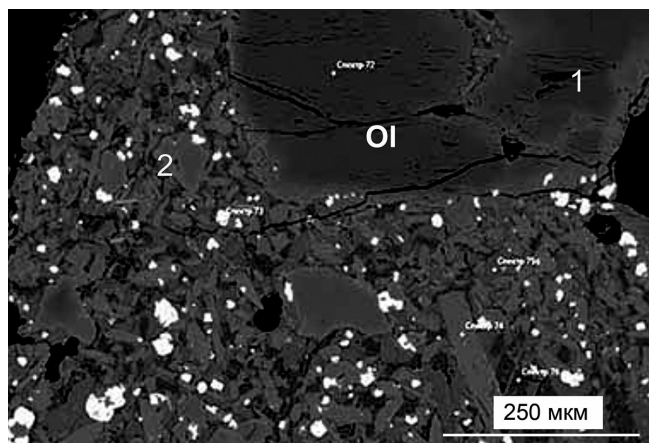


Рис. 3. Деталь рис. 2: крупное зерно оливина из шпинелевого лерцолита (1) на контакте с мелкозернистым оливин-пироксеновым щелочным базальтоидом (2) с многочисленными кристаллами титаномагнетита (светлое).

Фото в отраженных электронах. Здесь и далее: Ol – оливин; Ens – энстатит; C_nH_m – углеводороды (УВ), n и m – переменные количества элементов в УВ; Dp – хромдиопсид; CrSpl – шпинель; Gl – стекло; Sph – титанит; Ap – апатит; Mgt – магнетит.

Fig. 3. Detail of Fig. 2: coarse olivine grain from spinel lherzolite (1) at the contact with fine-grained alkali olivine-pyroxene basaltoid (2) with numerous titanomagnetite crystals (light).

BSE image. Hereinafter: Ol – olivine; Ens – enstatite; (C_nH_m) – hydrocarbons (HC), n and m – variable amounts of elements in HC; Dp – chromdiopside; CrSpl – spinel; Gl – glass; Sph – titanite; Ap – apatite; Mgt – magnetite.

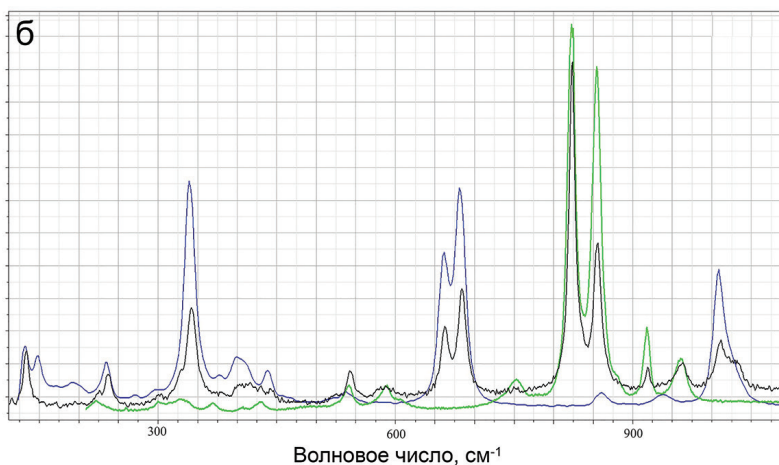
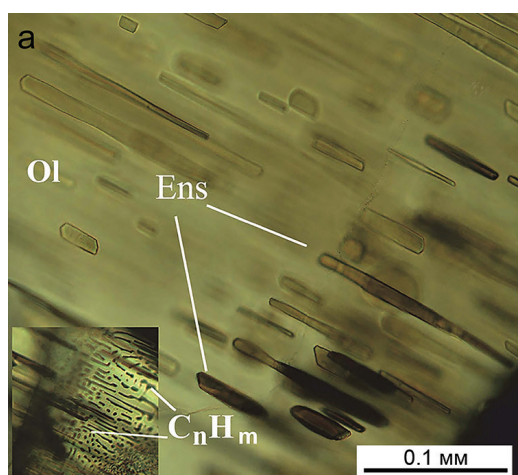


Рис. 4. Лейсты энстатита в оливине и включения УВ между лейстами энстатита (врезка) (а) и рамановский спектр оливина (зеленое – спектр форстерита) (б).

Fig. 4. Enstatite laths in olivine and HC inclusions between them (inset) (a) and Raman spectrum of olivine (green is the spectrum of forsterite) (b).

Таблица 1

Химический состав минералов по данным СЭМ-ЭДС анализа

Table 1

Chemical composition of minerals according to SEM-EDS analysis

Оксиды	Оливин (n = 20)	Энстатит (n = 12)		Клинопироксен (n = 15)	
SiO ₂	41.072 ± 0.43	57.04 ± 0.52		53.28 ± 0.63	
TiO ₂	—	0.09		0.70 ± 0.26	
Al ₂ O ₃	—	1.88 ± 0.10		3.04 ± 1.33	
Cr ₂ O ₃	—	0.47 ± 0.08		1.89 ± 0.62	
FeO	9.12 ± 0.55	5.82 ± 0.07		2.90 ± 0.23	
MnO	—	—		—	
MgO	48.75 ± 0.35	33.26 ± 0.48		16.58 ± 1.92	
CaO	—	0.43 ± 0.14		19.95 ± 0.91	
Na ₂ O	—	—		1.46 ± 1.08	
K ₂ O	—	—		—	
NiO	0.40 ± 0.01	—		—	
Сумма	99.34	98.90		99.79	
Количество атомов (а.ф.) в пересчете					
	на 4 (O)	на 6 (O)			
Si	1.00	1.98	Σ2.00	1.94	Σ 2.00
Al	—	0.02		0.06	
Al	—	0.06	Σ 2.00	0.07	Σ 2.00
Ti	0.000	0.00		0.02	
Cr	—	0.02		0.05	
Fe ²⁺	0.19	0.17		0.089	
Mg	1.79	1.72		0.90	
Mn	—				
Ca	0.000	0.02		0.78	
Na	—			0.10	
K	—				
Ni	0.01				

Примечание. Здесь и в табл. 2, прочерк – не обнаружено.

Note. Here and in Table 2, dash – not detected.

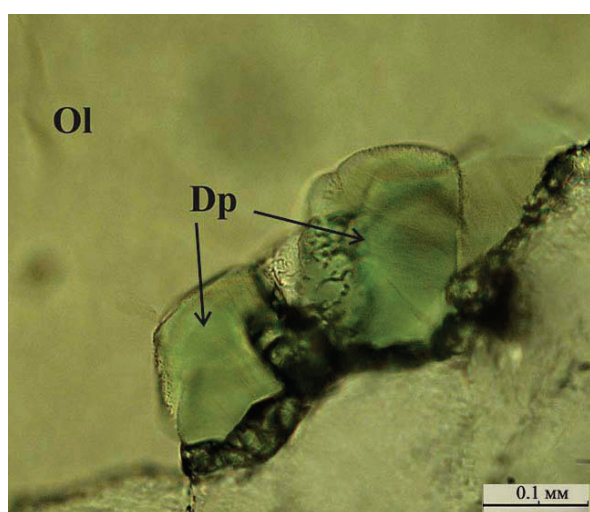


Рис. 5. Зерна хромдиопсида в оливине.
Fig. 5. Chromdiopside grains in olivine.

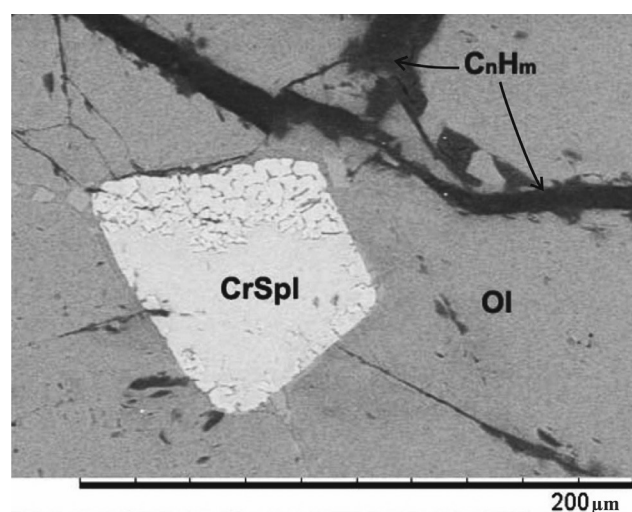


Рис. 6. Кристалл хромистой шпинели в оливине.
Fig. 6. Cr spinel crystal in olivine.

Chemical composition of spinel and parameters of olivine and spinel for calculating the temperatures and oxygen fugacity according to equations of (Ballhaus et al., 1991)

Оксиды	n = 10	Количество атомом в пересчете на 4 (O)				Минералы	Параметры				
SiO ₂	—	Si				Шпинель (Sp)	$X^{\text{Sp}}_{\text{Fe}^{2+}} = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$	$X^{\text{Sp}}_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$	$X^{\text{Sp}}_{\text{Cr}} = \text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$	$X^{\text{Sp}}_{\text{Al}} = \text{Al} / (\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$	$X^{\text{Sp}}_{\text{Fe}^{3+}} = \text{Fe}^{3+} / (\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$
Al ₂ O ₃	25.2 ± 0.79	Al ³⁺	0.91								
Cr ₂ O ₃	40.28 ± 0.99	Cr ³⁺	0.98		Σ2.00						
		*Fe ³⁺	0.10								
TiO ₂	0.3 ± 0.04	Ti ³⁺	0.01				0.39	0.61	0.49	0.05	0.07
FeO	17.62 ± 0.51	Fe ²⁺	0.30			Оливин (Ol)	$X^{\text{Ol}}_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$		$X^{\text{Ol}}_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$		
MnO	—	Mn ²⁺					0.097		0.903		
MgO	15.38 ± 0.64	Mg ²⁺	0.70		Σ1.00						
CaO	—	Ca ²⁺				$K_D^{\text{Ol:Sp}} = (X^{\text{Ol}}_{\text{Mg}} \cdot X^{\text{Sp}}_{\text{Fe}}) / (X^{\text{Ol}}_{\text{Fe}} \cdot X^{\text{Sp}}_{\text{Mg}})$					
Na ₂ O	—	Na ⁺									
K ₂ O	—	K ⁺									
NiO	—	Ni ⁺									
Сумма		100.01				5.99					

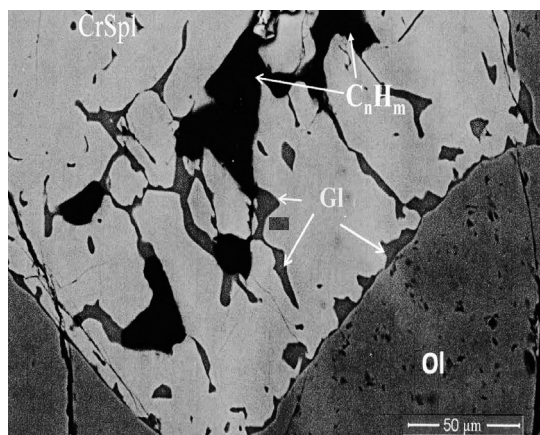


Рис. 7. Краевая зона кристалла хромистой шпинели в оливине с отчетливыми червеобразными выделениями стекла и УВ.

Fig. 7. Marginal zone of the Cr spinel crystal in olivine with evident worm-like aggregates of glass and HC.

скопии в своем составе они содержат CO_2 и, в отдельных случаях, смесь газов CO_2 и CO , при этом 97.5 % приходится на CO_2 и только 2.5 % – на CO (рис. 17) (Пономарева и др. 2024). Подобные включения установлены в оливине из ксенолита, представляющего собой амфиболсодержащий верлит, из вулканического поля Лунного кратера штата Невада, США (Bergman, Dubessy, 1984).

ОЦЕНКА РЕЖИМА ТЕМПЕРАТУРЫ И ФУГИТИВНОСТИ КИСЛОРОДА

По данным оливин-клинопироксенового и двупироксенового геотермометров (Никитина и др., 2023; Никитина, 2005) температуры образования этих ассоциаций для пород о. Жохова колеблются от 1250 до 1500 °С. В настоящей работе оценены температуры сосуществования оливин-шпинелевой ассоциации, вычисленные по следующим уравнениям:

1) T, K = [(3480X^{Sp}_{Cr} + 1018X^{Sp}_{Al} + 2400 - 1720X^{Sp}_{Fe3+}) / (2.23X^{Sp}_{Cr} + 2.56X^{Sp}_{Al} + 1.987ln K_D - 3.08X^{Sp}_{Fe3+} - 1.47)] + κX_{Ti3+} (Roeder et.al.,1979):
T = 1001 K;

$$2) \quad T_{\text{K}} = [(4250X_{\text{Cr}}^{\text{Sp}} + 1343)/(\ln K_{\text{D}}^{\text{O}} + 1.825X_{\text{Cr}}^{\text{Sp}} + 0.571)] + \kappa X_{\text{Ti}3+} \quad (\text{Fabries, 1979}); \quad T = 1009 \text{ K};$$

$$3) T_e K = [(6530 + 280P + 7000 + 108P) \cdot - (1 - 2X_{Fe}^{OI}) - 1960 \cdot (X_{Mg}^{Sp} - X_{Fe2+}^{Sp}) + 16150 X_{Cr}^{Sp} + 25150 \cdot (X_{Fe3+}^{Sp} + X_{Ti}^{Sp})] / 8.3144 \ln K^{OI-Sp_D + 4.705}$$

(Ballhaus et al., 1991): $T = 1016 K$.

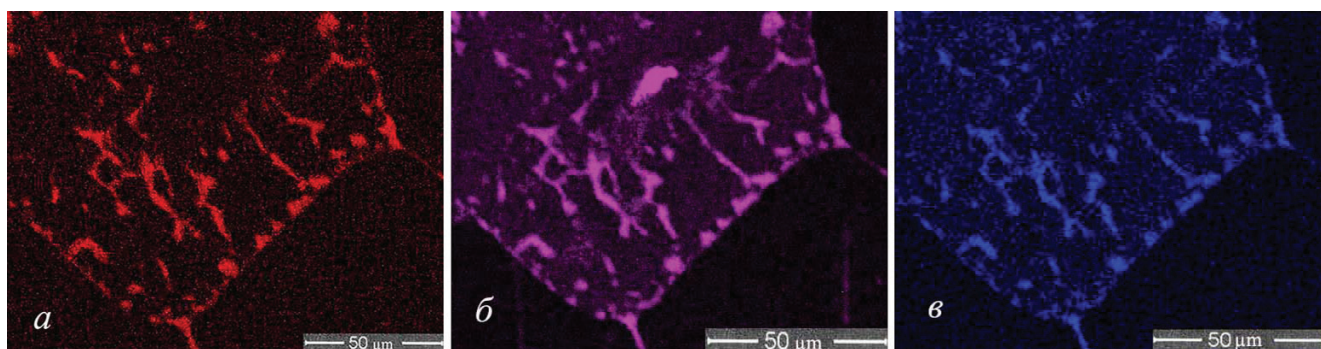


Рис. 8. Карты распределения К (а), Al (б) и Na (в) в краевой зоне кристалла хромистой шпинели с червеобразными выделениями стекла.

Fig. 8. Maps of distribution of K (a), Al (б) and Na (в) in the marginal zone of the Cr spinel crystal with worm-like glass.

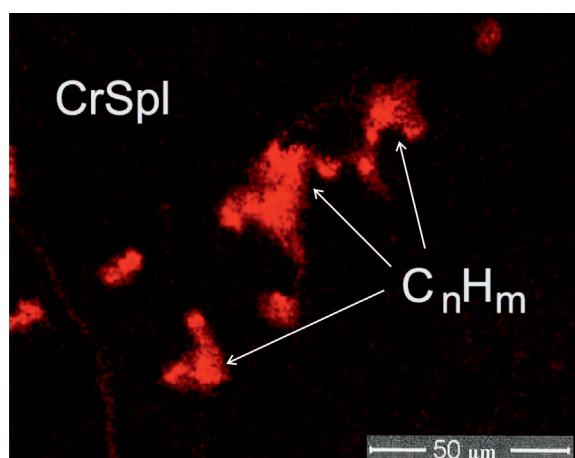


Рис. 9. Включения УВ (ярко-красное) в хромистой шпинели по результатам кластерного анализа.

Fig. 9. HC inclusions in Cr spinel (brightly red) according to results of cluster analysis.

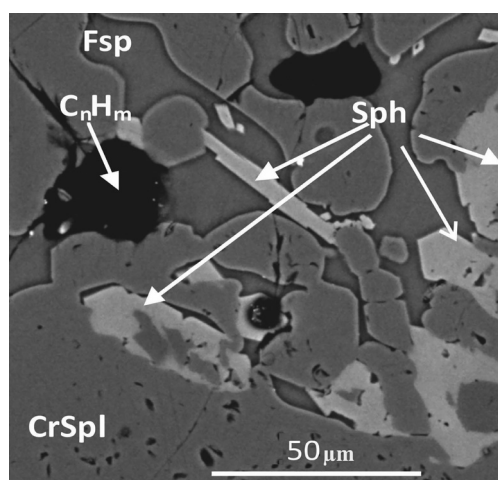


Рис. 10. Включения титанита, К-Na алюмосиликата и УВ в хромистой шпинели.

Fig. 10. Inclusions of titanite, K-Na aluminosilicate and HC in Cr spinel.

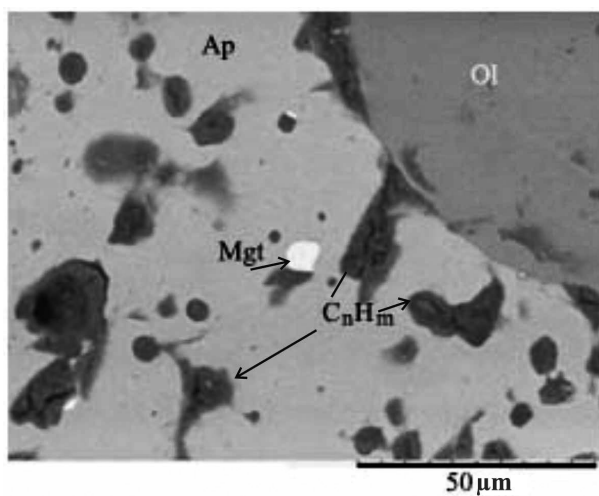


Рис. 11. Зерно апатита с включениями УВ и магнетита в оливине.

Fig. 11. Apatite grain with HC and magnetite inclusions in olivine.

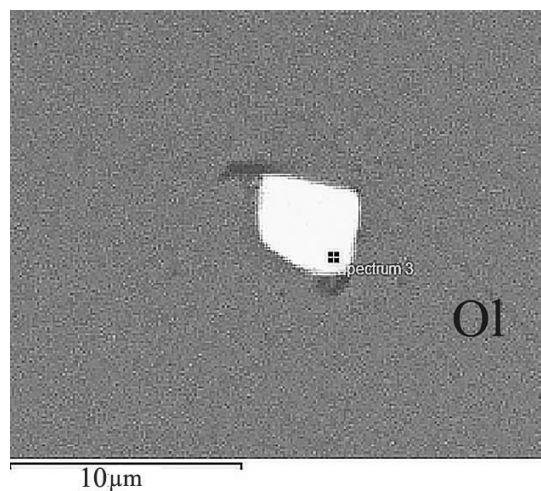


Рис. 12. Включения сульфида Fe и Ni в оливине.

Fig. 12. Inclusions of Fe and Ni sulfide in olivine.

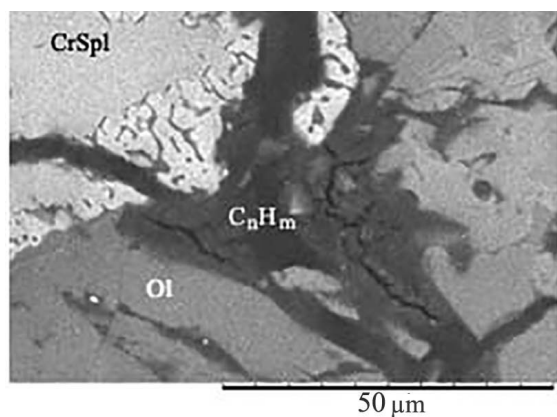


Рис. 13. Пржилки УВ в оливине и шпинели.
 Fig. 13. HC veinlets in olivine and spinel.

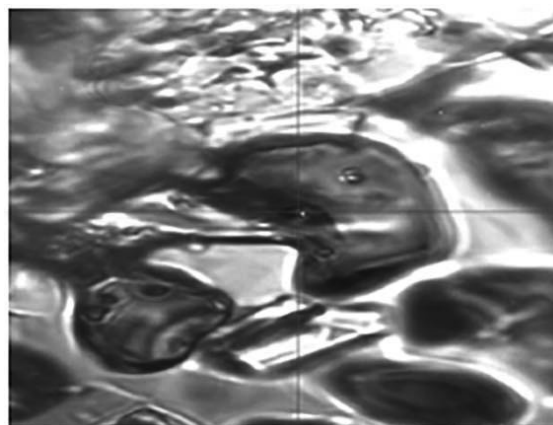


Рис. 14. Углеводородные включения размером 7–15 мкм с сильной флуоресценцией в оливине.
 Fig. 14. HC inclusions 7–15 μm in size with strong fluorescence in olivine.

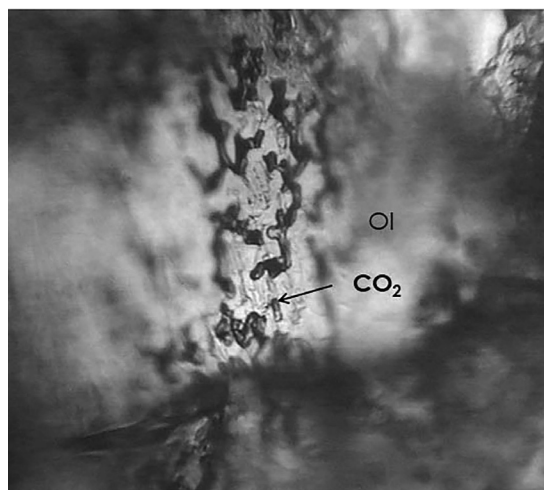


Рис. 15. Флюидные включения размером 3 мкм в оливине.
 Fig. 15. Fluid inclusions 3 μm in size in olivine.

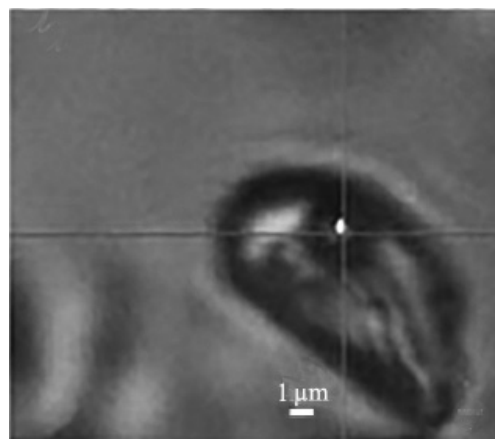


Рис. 16. Газово-твердое включение в оливине.
 Fig. 16. Gas-solid inclusion in olivine.

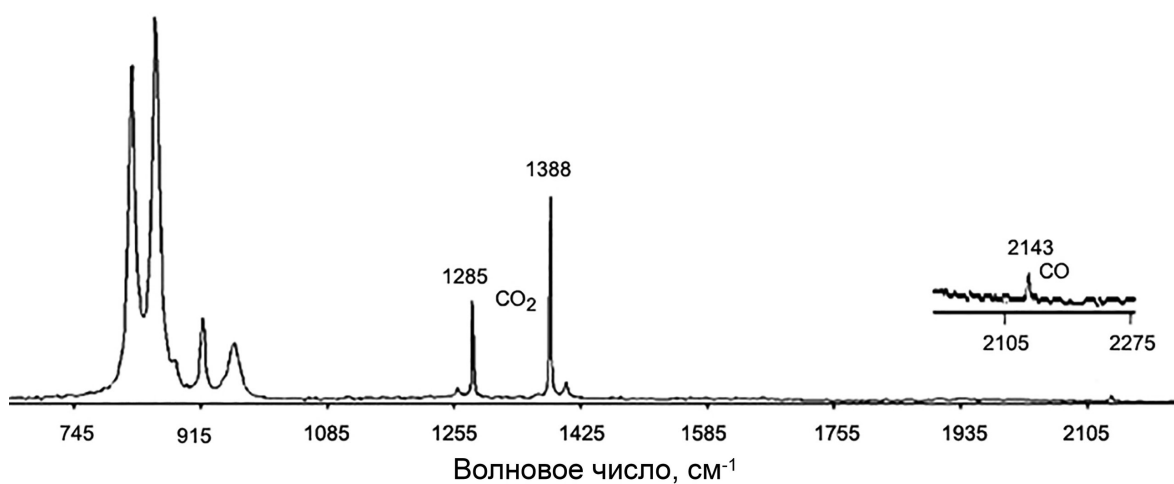


Рис. 17. КР спектр газовой фазы, состоящей из смеси CO₂ и CO, газово-твердого включения в оливине.
 Fig. 17. Raman spectrum of the CO₂ + CO mixture gas phase in gas-solid inclusion in olivine.

Здесь $K_D^{Ol-Sp} = (X_{Mg}^{Ol} \cdot X_{Fe}^{Sp}) / (X_{Fe}^{Ol} \cdot X_{Mg}^{Sp})$; $X_{Mg(Fe)}^{Ol}$, $X_{Mg(Fe2+)}^{Sp}$ – отношения $R^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$ в оливине и шпинели; X_{Fe3+}^{Sp} , X_{Al}^{Sp} , X_{Cr}^{Sp} – катионные доли $R^{3+} / (Fe^{3+} + Al + Cr)$ в шпинели.

Состав шпинели и соответствующие параметры минералов приведены в таблице 2. Количество Fe^{3+} в шпинели рассчитано по формуле $Fe^{3+} = 2 - Al - Cr - 2Ti$ (Округин, 2023). Средняя температура сосуществования оливин-шпинелевой ассоциации, рассчитанная для $P = 1$ ГПа по разным термометрам, принята 1010 К (757 °C).

Величина отклонения фугитивности кислорода от значения lgf_{O_2} для буферной реакции оценивалась по оксидометру (Ballhaus et al., 1991; Никитина, 2005): $\Delta lgf_{O_2} = 0.27 + 2505/T - 400P/T - 6lgX_{Fe}^{Ol} - 3200 \cdot (1 - X_{Fe}^{Ol})^2/T + 2lgX_{Fe2+}^{Sp} + 4lgX_{Fe3+}^{Sp} + 2630(X_{Al}^{Sp})^2/T$. Она соответствует 0.4 логарифмическим единицам.

Фугитивность кислорода (lgf_{O_2}) для буферных реакций FMQ (фаялит-магнетит-кварцевой), NNO (никель-оксид никеля) и CCO (углерод-оксид углерода) рассчитана по следующим уравнениям:

1) для буферной реакции FMQ фугитивность кислорода по уравнению (O'Neill, 1987a) равна: $82.75 + 0.00484 \cdot T - 30681/T - 24.45 \cdot lgT + 940 \cdot P/T - 0.02 \cdot P$, где T в К, P в ГПа;

2) для буферной реакции NNO: $12.78 - 25073/T - 1.1lgT + 450P/T + 0.025P$ по уравнению (O'Neill, Wall, 1987b), где T в К, P в ГПа;

3) для буферной реакции CCO расчет выполнен по уравнению (Jakobsson, Oskarsson, 1994): $4.325 = 21803/T + 0.171 \cdot [(P - 1)/T]$, где T в К, P в барах.

Фугитивность кислорода для буферных реакций рассчитана в диапазоне 1000–1500 К для $P = 1$ ГПа. Фугитивность кислорода (lgf_{O_2}) для буферных реакций для $P = 1$ ГПа и $T = 1010$ К (737 °C) равны –15.3, –14.9 и –15.6 для буферных реакций FMQ, NNO и CCO, соответственно.

Для оливин-шпинелевой ассоциации фугитивность кислорода определялась из уравнения, отражающего отклонение окислительно-восстановительного состояния от состояния, соответствующего буфера QFM, CCO и NNO: $\Delta lgf_{O_2} = lgf_{O_2} - lgf_{O_2}^{QFM(NNO, CCO)}$. Поскольку величина Δlgf_{O_2} , рассчитанная для лерцолитов о. Жохова, равна 0.4 логарифмических единицы (см. выше), исходя из выше приведенного уравнения, lgf_{O_2} лежит в интервале от –14.5 до –15.2).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроскопические исследования оливина показали, что он содержит многочисленные твердофазные и флюидные включения. Твердофазные включения представлены энстатитом, образующим закономерно ориентированные ламели, которые являются продуктами распада первичного твердого раствора оливина. В оливине установлены нераскристаллизованные газово-твердые включения, содержащие по данным рамановской спектроскопии CO_2 и смесь CO_2 и CO .

В зернах оливина и в межзерновом пространстве присутствуют многочисленные кристаллы шпинели, грани которых корродированы вследствие замещения ее по периферии К-Na алюмосиликатным стеклом. Нередко наблюдаются включения углеводородов, а также прожилки, пересекающие и оливин, и шпинель, сложенные твердыми УВ. Аналогичные включения УВ часто присутствуют в горных породах, минералах и метеоритах (Икорский, 1967, 1982; Доленко, 1988; Филиппов, 2014; Nandakumar, Jayanthi, 2021).

Как известно (Бескровный, 1967; Икорский, 1967, 1982; Доленко, 1988; Филиппов, 2014; Хисамов и др., 2022), органические вещества и углеводородные газы являются спутниками глубинных гидротермальных растворов, которые принимают непосредственное участие в процессах эндогенного минералообразования и по своей роли занимают третье место после воды и углекислоты. От захваченных сгустков УВ в процессе снижения температуры и давления начинают отделяться тяжелые смолистые и жидкие компоненты – потенциальные нефтяные УВ (Хисамов и др., 2022).

В Институте Геологии и геохимии горючих ископаемых АН УССР разработана теория минерального синтеза нефти и газа в условиях астеносферы мантии Земли. Согласно этой теории, синтез природного газа и нефтяных углеводородов осуществляется при высоких температурах (1200–1800 °C) и давлениях (6–9 ГПа) из летучих компонентов астеносферного слоя – метана, окиси углерода и водорода. На основе изучения органического вещества в метеоритах, в минералах лерцолитов, базальтов, кимберлитов, а также в пепле вулканических извержений вулканов Камчатки показано, что генерация нефтяных углеводородов в условиях астеносферы мантии Земли имеет под собой веские основания (Доленко, 1988).

Полученные параметры по редокс-состоянию для оливин-шпинелевой ассоциации из лерцолитов о. Жохова совпадает с данными (Округин, 2023), который показал, что для оливин-шпинелевой ассоциации из этих пород значение $\lg f_{O_2}$ соответствует буферу ССО с участием свободного углерода. По его мнению (Округин, 2023) такие восстановительные условия характерны для формирования перидотитов сублитосферной мантии (в том числе графит- и алмаз-содержащих). Они близки к величинам $\lg f_{O_2}$ в ультрамафитах Платиноносного пояса Урала, в частности, в дунитах Косьвинского тела, а также в гарцбургитах островных дуг (г. Торисима преддужья Идзу-Бонин, вулкан Мэгата, Япония) (Чашухин и др., 2002).

Таким образом, изучение минералогических особенностей пород острова Жохова, определение летучести кислорода на основе состава оливина и шпинели, установление расплавных и углеводородных включений дополняют данные, полученные ранее многими исследователями по этому региону.

ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Л.В., Чепуров А.И., Лаврентьев К.Г., Покачалова О.С. (1974) Закономерно ориентированные включения в оливинах гипербазитов Корьякии. *Геология и геофизика*, 6, 49–60.
- Бескровный Н.С. (1967) Нефтяные битумы и углеводородные газы как спутники гидротермальной деятельности. Ленинград, Недра, 200 с.
- Доленко Г.Н. (1988) Вопросы геохимии астеносферных углеводородных флюидов. *Геохимия и термобарометрия эндогенных флюидов*. Киев, Наукова думка, 104–112.
- Икорский С.В. (1967) Органическое вещество в минералах изверженных горных пород Ленинград. Наука, 120 с.
- Икорский С.В. (1982) Битумы в минералах изверженных горных пород (на примере эвдиалита Хибинского щелочного массива). *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений*. Москва, Недра, 22–28.
- Кораго Е.А., Верниковский В.А., Соболев Н.Н., Ларионов А.Н., Сергеев С.А., Столбов Н.М., Проскурнин В.Ф., Соболев П.С., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Травин А.В. (2014) Возраст фундамента островов Де-Лонга (архипелаг Новосибирские острова): новые геохронологические данные. *Доклады РАН*, 457(3), 315–322.
- Мельников Ф.П., Дороговин Б.А., Полянский Е.В. (1999). Атлас флюидных включений в минералах. Александров, 235 с.
- Никитина Л.П. (2005) Межфазовые геотермометры, геобарометры и геооксбарометры. СПб, СПбГУ, 126 с.
- Никитина Л.П., Марин Ю.Б., Сироткин А.Н., Столбов Н.М., Проскурнин В.Ф., Пономарева Н.И., Бочаров В.Н., Бабушкина М.С. (2023а) Петрография и минералогия мантийных ксенолитов в кайнозойских щелочных базальтах о. Жохова (арх. Новосибирские острова): процессы плавления и метасоматоза в мантии. *Материалы Годичного собрания РМО*. Санкт-Петербург, 48–50.
- Никитина Л.П., Пономарева Н.И., Бочаров В.Н., Янсон С.Ю. (2023б) Включения в минералах ксенолитов мантийных шпинелевых перидотитов в базальтах о. Жохова (арх. Новосибирские острова, Россия). *Материалы X Всероссийской научной конференции по геммологии*. Томск, ТГУ, 68–73.
- Округин А.В. (2023) Хромит-ферри-ульвошпинелевая серия минералов щелочных пикрит-базитовых пород Севера Сибирской платформы и их окситермобарометрия. *Записки РМО*, CLII(6), 80–94.
- Пономарева Н.И., Бочаров В.Н., Власенко Н.С., Янсон С.Ю. (2024) Минералогические особенности пород о. Жохова (арх. Новосибирские острова, Россия). *Материалы V Всероссийской научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы»*. Южно-Сахалинск, 72.
- Рябов В.В. (1992) Оливины сибирских траппов как показатели петрогенезиса и рудообразования. Новосибирск, Наука, 116 с.
- Силантьев С.А., Богдановский О.Г., Савостин Л.А., Кононкова Н.Н. (1991) Магматизм Архипелага Де-Лонга (Восточная Арктика); петрология и петрохимия эффузивных пород и ассоциирующих с ними ксенолитов (острова Жохова и Вилькицкого). *Геохимия*, 2, 267–277.
- Смирнова Т.А. (1971) Структуры распада твердого раствора в оливине ультраосновных пород. *Записки ВМО*, 2, 209–212.
- Твердые полезные ископаемые архипелагов и островов арктической континентальной окраины Евразии (2010) СПб, ВНИИОкеангеология. 336 с.
- Филиппов М.М. (2014) Рамановская спектроскопия как метод изучения глубокоуглефицированного органического вещества. Часть 1. Основные направления использования. *Труды Карельского научного центра РАН*, 1, 115–134.
- Хисамов Р.С., Бурханов И.О., Скибицкая Н.А., Базаревская В.Г., Навроцкий О.К., Никулин Б.А. (2022) Методика оценки содержания керогена и битумоидов в артинских отложениях газонефтяного месторождения Оренбургской области по данным ГИС. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 3(38), 3–17.
- Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Миронов А.Б., Уймин С.Г. (2002) Окситермобарометрия ультрамафитов платиноносного пояса Урала. *Геохимия*, 8, 846–863.

Шманык А.В. (2021) Кайнозойский магматизм островов Жохова и Вилькицкого (Новосибирские острова). *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и северо-запада России*, 8, 281–294.

Ballhaus C., Berry R., Green D. (1991) High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107, 27–40. <https://doi.org/10.1007/BF00311183>

Bergman S.C., Dubessy J. (1984) CO₂–CO fluid inclusions in a composite peridotite xenolith: implications for upper mantle oxygen fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85, 1–13. <https://doi.org/10.1007/BF00380216>

Database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. <https://rruff.info/dolomite/display=default/R100118> (дата посещения 13 июля 2023)

Fabries J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 329–336. <https://doi.org/10.1007/BF00372258>

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>

Jakobsson S., Oskarsson N. (1994) The system C–O in equilibrium with graphite at high pressure and temperature: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 9–17. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90442-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90442-1)

O'Neill H.St.C. (1987) The quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energies of formation of fayalite (Fe₂SiO₄) and magnetite (Fe₃O₄). *American Mineralogist*, 72, 67–75.

O'Neill H. St. C., Wall V.J. (1987) The olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve, and the oxygen fugacity of the Earth's upper mantle. *Journal of Petrology*, 28, 1169–1191.

Nandakumar V., Jayanthi J.L. (2021) Hydrocarbon fluid inclusions in petroliferous basins. Elsevier, 286 p.

Roeder P., Campbell I., Jamieson H. (1979) A reevaluation of the olivine-spinel geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68, 325–334. <https://doi.org/10.1007/BF00371554>

REFERENCES

Agafonov L.V., Chepurov A.I., Lavrentiev K.G., Pokachalova O.S. (1974) Regularly oriented inclusions in olivines of the Koryak ultramafic rocks. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 6, 49–60. (in Russian)

Ballhaus C., Berry R., Green D. (1991) High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107, 27–40. <https://doi.org/10.1007/BF00311183>

Bergman S.C., Dubessy J. (1984) CO₂–CO fluid inclusions in a composite peridotite xenolith: implications

for upper mantle oxygen fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85, 1–13. <https://doi.org/10.1007/BF00380216>

Beskrovny N.S. (1967) *Petroleum bitumen and hydrocarbon gases as satellites of hydrothermal activity*. Leningrad, Nedra, 200 p. (in Russian)

Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Pushkarov E.V., Anikina E.V., Mironov A.B., Uimin S.G. (2002). Oxithermobarometry of ultramafic rocks of the Urals platinum-bearing belt. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 8, 846–863 (in Russian)

Database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. <https://rruff.info/dolomite/display=default/R100118> (access on July 13, 2023)

Dolenko G.N. (1988) Issues of geochemistry of asthenospheric hydrocarbon fluids. *Geokhimiya i termobarometriya endogennykh fluidov (Geochemistry and Thermobarometry of Endogenic Fluids)*. Kiev, Naukova dumka, 104–111. (in Russian)

Fabries J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 329–336. <https://doi.org/10.1007/BF00372258>

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>

Filippov M.M. (2014) Raman spectroscopy as a method of study of strongly coalified organic matter. Part 1. Main directions of use. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN (Proceedings of the Karelian Scientific Center RAS)*, 1, 115–134. (in Russian).

Ikorsky S.V. (1967) Organic matter in minerals of igneous rocks. Leningrad, Nauka, 120 p. (in Russian)

Ikorsky S.V. (1982) Bitumen in minerals of igneous rocks (on example of eudialyte of the Khibiny alkaline massif). *Ispolzovanie metodov termobarogeokhimii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdenii (Use of Thermobarogeochimistry in Searching and Study of Ore Deposits)*. Moscow, Nedra, 22–28. (in Russian).

Jakobsson S., Oskarsson N. (1994) The system C–O in equilibrium with graphite at high pressure and temperature: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 9–17. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90442-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90442-1)

Khisamov R.S., Burkhanov I.O., Skibitskaya N.A., Bazarevskaya V.G., Navrotsky O.K., Nikulin B.A. (2022) Methodology for estimating the kerogen and bitumen content in the Arta sediments of a petroleum deposit in the Orenburg region according to GIS data. *Aktualnye problemy nefii i gaza (Actual Problems of Oil and Gas)*, 3(38), 3–17. (in Russian)

Korago E.A., Vernikovskiy V.A., Sobolev N.N., Larionov A.N., Sergeev S.A., Stolbov N.M., Proskurnin V.F., Sobolev P.S., Metelkin D.V., Matushkin N.Yu., Travin A.V. (2014) Age of the basement beneath the De Long Islands (New Siberian Archipelago): new geochronological

data. *Doklady Earth Sciences*, 457, 803–809. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14070228>

Melnikov F.P., Dorogovin B.A., Poliansky E.V. (1999) *Atlas of fluid inclusions in minerals*. Aleksandrov, 235 p. (in Russian)

Mineral deposits of archipelagos and islands of the Arctic continental margin of Eurasia (2010) St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya. 336 p. (in Russian)

Nandakumar V., Jayanthi J.L. (2021) *Hydrocarbon fluid inclusions in petroliferous basins*. Elsevier, 286 p.

Nikitina L.P. (2005) Interphase geothermometers, geobarometers and geooxobarometers. St. Petersburg, SPbGU, 126 p. (in Russian).

Nikitina L.P., Marin Yu.B., Sirotkin A.N., Stolbov N.M., Proskurnin V.F., Ponomareva N.I., Bocharov V.N., Babushkina M.S. (2023a) Petrography and mineralogy of mantle xenoliths in Cenozoic alkaline basalts of the Zhokhov Island (New Siberian Archipelago): melting and metasomatism processes in mantle. *Materialy Godichnogo sobraniya RMO (Proceedings of the Annual Meeting of the Russian Mineralogical Society)*. St. Peterburg, 48–50. (in Russian)

Nikitina L.P., Ponomareva N.I., Bocharov V.N., Yanson S.Y. (2023b) Mineral inclusions of mantle spinel peridotite xenoliths in basalts of the Zhokhov Island (New Siberian Archipelago, Russia). *Materialy X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po gemmologii (Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference on Gemology)*. Tomsk, TGU, 68–73. (in Russian)

Okrugin A.V. (2023) Chromite-ferry-ulvoshpinel mineral series of alkaline picrite-mafic rocks of the north of the Siberian platform and their oxithermobarometry. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, CLII(6), 80–94. (in Russian)

O'Neill H.St.C. (1987) The quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energies of formation of fayalite (Fe_2SiO_4) and magnetite (Fe_3O_4). *American Mineralogist*, 72, 67–75.

O'Neill H.St.C., Wall V.J. (1987) The olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve, and the oxygen fugacity of the Earth's upper mantle. *Journal of Petrology*, 28, 1169–1191.

Ponomareva N.I., Bocharov V.N., Vlasenko N.S., Yanson S.Yu. (2024) Mineralogical peculiarities of rocks of the Zhokhov Island (New Siberian Archipelago, Russia). *Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*

“Geodinamicheskie processy i prirodnye katastrofy” (*Proceedings of the V All-Russian Scientific Conference “Geodynamic Processes and Natural Disasters”*). Yuzhno-Sakhalinsk, 72. (in Russian)

Roeder P., Campbell I., Jamieson H. (1979) A reevaluation of the olivine-spinel geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68, 325–334. <https://doi.org/10.1007/BF00371554>

Ryabov V.V. (1992) *Olivines of Siberian traps as indicators of petrogenesis and ore formation*. Novosibirsk, Nauka, 116 p. (in Russian).

Silantyev S.A., Bogdanovskiy O. G., Savostin L. A., Kononkova N. N. (1991) Magmatism of the De Long Archipelago (Eastern Arctic); petrology and petrochemistry of effusive rocks and associated xenoliths (Zhokhov and Vilkitsky islands). *Geokhimiya (Geochemistry)*, 2, 267–277. (in Russian)

Shmanyak A.V. (2021) Cenozoic magmatism of the Zhokhov and Vilkitsky islands (New Siberian Archipelago). *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i severo-zapada Rossii (Relief and Quaternary complexes of Arctic, Subarctic, and Northwestern Russia)*, 8, 281–294. (in Russian)

Smirnova T.A. (1971) Exsolution structures in olivine of ultramafic rocks. *Zapiski VMO (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*, 2, 209–212. (in Russian)

Информация об авторах

Пономарева Наталья Игоревна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; n_ponomareva@mail.ru

Никитина Лариса Петровна – профессор, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, . Санкт-Петербург, Россия

Бочаров Владимир Николаевич – специалист РЦ «Геомодель», Научный парк СПбГУ, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; bocharov@molsp.phys.spbu.ru

Власенко Наталия Сергеевна – инженер РЦ «Геомодель», Научный парк СПбГУ, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; n.vlasenko@spbu.ru

Янсон Светлана Юрьевна – кандидат геолого-минералогических наук, и. о. директора РЦ «Микроскопия и микроанализ», Научный парк СПбГУ, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; svetlana.janson@spbu.ru

Проскурнин Василий Федорович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия; Vasily_Proskurnin@karpinskyinstitute.ru

Сироткин Александр Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург, Россия; pechenga-67@yandex.ru

Столбов Николай Макарьевич – кандидат геолого-минералогических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург, Россия

Information about the authors

Natalia I. Ponomareva – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Lecturer, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; n_ponomareva@mail.ru

Larisa P. Nikitina – Professor, Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg, Russia

Vladimir N. Bocharov – Specialist, Resource Center «Geomodel», Scientific Park, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; bocharov@molsp.phys.spbu.ru

Natalia S. Vlasenko – Engineer, Resource Center «Geomodel», Scientific Park, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; n.vlasenko@spbu.ru

Yanson Svetlana Yuryevna – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Acting Director of the Resource Center «Microscopy and Microanalysis», Scientific Park, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; svetlana.janson@spbu.ru

Vasily F. Proskurnin – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Head of Department, Karpinsky Russian Research Geological Institute, St. Petersburg, Russia; Vasily_Proskurnin@karpinskyinstitute.ru

Aleksander N. Sirotkin – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Head of Sector, Gramberg All-Russian Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean, St. Petersburg, Russia; pechenga-67@yandex.ru

Nikolay M. Stolbov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Gramberg All-Russian Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean, St. Petersburg, Russia