

*Р. М. Новаков*¹, *В. В. Иванов*², *Ю. П. Трухин*¹, *Е. Г. Панова*³

МЕДНО-НИКЕЛЕВАЯ И БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ОЛИВИНОВЫХ ВЕБСТЕРИТАХ п-ова КАМЧАТСКИЙ МЫС (КАМЧАТКА)

1 Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Российская Федерация, 683002, Петропавловск-Камчатский, Северо-восточное шоссе, 30

2 Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Российская Федерация, Приморский край, 690022, Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159

3 Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

На п-ове Камчатский Мыс в гипербазитовом массиве г. Солдатской установлена медно-никелевая минерализация с платиноидами и золотом, локализованная в оливиновых вебстеритах. Из рудных минералов преобладает пентландит, а также железоникелевые сульфидные фазы с повышенным содержанием меди (предположительно гороманиит и сугакиит). Самородные минералы и интерметаллиды представлены медью, платинистой медью, золотом и аваруитом. Рудная минерализация сформировалась в результате ликвационного отделения от силикатной магмы капель сульфидной жидкости. В результате постмагматических процессов, в том числе серпентинизации, происходили распад, перекристаллизация и частичное перераспределение сульфидных и самородных фаз. Библиогр. 19 назв. Ил. 5. Табл. 4.

Ключевые слова: Камчатский Мыс, вебстериты, офиолиты, сульфидная минерализация, медь, никель, платиноиды, золото.

*R. M. Novakov*¹, *V. V. Ivanov*², *Yu. P. Trukhin*¹, *E. G. Panova*³

COPPER-NICKEL AND NOBLE METALS MINERALIZATION IN OLIVINE WEBSTERITE FROM THE KAMCHATSKY MYS PENINSULAR (KAMCHATKA)

¹ Geotechnological Science Research Center of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences, 30, Severo-Vostochnoe schosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russian Federation

² Far Eastern Geological Institute of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences, 159, pr. 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

A copper-nickel mineralization with platinoids and gold was found in the olivine websterite of the Soldatskaya Mountain located in the Kamchatsky Mys Peninsular. The dominant ore components are pentlandite, as well as nickel-iron sulfide phases with high-copper content (presumably horomanite and sugakiite). Native minerals and intermetallics are presented by copper, platinum-bearing copper, gold and awaruite. The mineralization is a result of liquid immiscibility during which drops of sulfide separated from silica magma. Post-magmatic process including serpentinization provoked decomposition, recrystallization and partial redistribution of both sulfide and native mineral phases. Refs 19. Figs 5. Tables 4.

Keywords: Kamchatsky Mys, websterite, ophiolite, sulfide mineralization, copper, nickel, platinoids, gold.

Введение. На Восточной Камчатке проявления эпигенетических никелево-медных и медных руд, связанные с серпентинизированными гипербазитами офиолитовых комплексов, известны с 60–70-х годов прошлого века (о-в Карагинский и п-ова Озерный и Кроноцкой) благодаря работам С. А. Мельниковой, Б. К. Долматова, Г. И. Родных, Б. И. Сляднева, А. Ф. Литвинова, Ю. В. Назимовой, Е. Г. Сидорова и др. [1–4]. Минерализация тяготеет к наиболее серпентинизированным гипербазитам и, по-видимому, формировалась в результате их преобразования под воздействием металлоносных флюидов, циркулировавших по зонам разрывных нарушений [2, 4, 5].

Нами на п-ове Камчатский Мыс в гипербазитовом массиве г. Солдатской детально изучена медно-никелевая с платиноидами и золотом минерализация, известная после тематических исследований [6] и геологосъемочных работ [7]. Вкрапленники пентландита, аваруита, самородной меди, платинистой меди и тонкие выделения самородного золота локализованы в оливиновых вебстеритах. От других никелево-медных проявлений, ассоциирующихся с гипербазитами Восточной Камчатки, минерализация отличается сингенетичностью по отношению к вмещающим вебстеритам и слабой степенью серпентинизации пород, вмещающих оруденение (серпентин развит в виде редких тонких прожилков). Полученная информация важна для расшифровки закономерностей формирования никелевой, медной и благороднометалльной минерализации, связанной с подобными ультрамафитами региона.

Образцы пород и руд детально изучены в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, в том числе на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 и аналитическом сканирующем электронном микроскопе EVO 50XVP с системой INCA Energy 350.

Локализация оливиновых вебстеритов. Оливиновые вебстериты входят в состав офиолитовой ассоциации, развитой в южной части п-ова Камчатский Мыс (рис. 1), включающей дуниты, гарцбургиты, вебстериты, пироксениты, габбро, долериты и вулканогенно-осадочные породы ранне-позднемиоценового возраста [2]. Находясь в зоне сочленения структур Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, офиолитовый разрез интенсивно тектонически дислоцирован, в результате чего отдельные его части сохранились в виде разрозненных фрагментов. При этом блоки гипербазитов нередко обрамлены зонами меланжа, мощность которых в ряде случаев составляет сотни метров.

Коренные выходы оливиновых вебстеритов, несущих медно-никелевую и благороднометалльную минерализацию, встречаются на северном склоне г. Голая на площади 100×100 м среди гарцбургитов гипербазитового массива г. Солдатской. Они представляют собой обособления неправильной формы размером от десятков сантиметров до нескольких метров. Установление морфологии вебстеритовых обособлений при отсутствии их контрастных ограничений в коренных выходах гарцбургитов затруднено склоновыми осыпями. Отсутствие выраженных контактовых изменений позволяет рассматривать вебстериты в качестве фациальной разности в составе пород офиолитового комплекса. Не исключено, что они близки к жильным разностям ультрамафитов, которые в нашем случае не имеют характерных выраженных ограничений.

Вещественная характеристика оливиновых вебстеритов. Рассматриваемые оливиновые вебстериты — массивные зеленовато-серые среднезернистые породы с видимыми вкрапленниками сульфидов и самородной меди (рис. 2, А). Структура панидиоморфнозернистая, участками пойкилитовая. Породы сложены на 70–80% энстатитом ($\text{En}_{88,3}\text{Fs}_{9,7}\text{Wo}_{2,0}$), на 10% форстеритом (Fo от 90,05 до 92,72 мол.%) и на 10–15% диопсидом ($\text{En}_{48,7}\text{Wo}_{47,4}\text{Fs}_{4,0}$), а также сульфидами (до 5–10%), акцессорными хромшпинелидами и самородными фазами (до 1%). Наиболее магниезильные форстериты образуют округлые включения в кристаллах хромшпинелидов. Оливин и клинопироксен часто отмечаются в виде тонких (0,1–0,3 мм) вростков в ортопироксене (рис. 2, В, С, D, E). Встречаются участки размером 1–2 см, в которых оливин преобладает (рис. 2, А). Серпентин, заполняющий редкие трещины в породе, соответствует формуле $(\text{Mg,Fe})_6[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$. Оценка по пироксеновому геотермометру [8] показывает для ортопироксенов из вебстеритов температуры кристаллизации

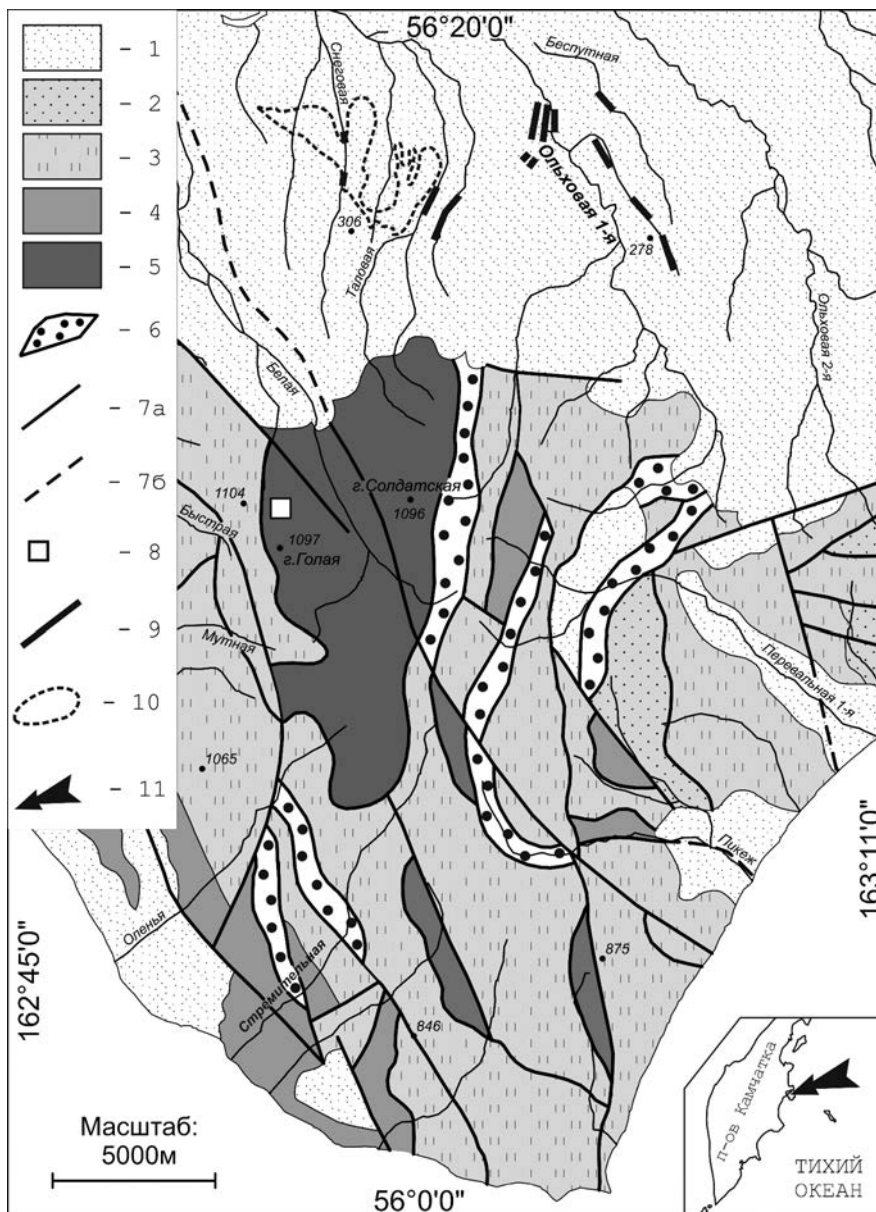


Рис. 1. Обзорная схема геологического строения (по [7], с изменениями):

1 — рыхлые плиоцен-четвертичные отложения (морские, аллювиально-морские, аллювиальные, флювиогляциальные); 2 — верхнемеловые песчаники пикижской свиты. Офиолитовая ассоциация: 3 — нижне-верхнемеловые вулканогенно-кремнистые отложения смагинской свиты; 4 — габброиды; 5 — гипербазиты; 6 — полимиктовый и мономиктовый серпентинитовый меланж. 7 — разрывные нарушения: а — установленные, б — предполагаемые; 8 — место находки вебстеритов с медно-никелевой минерализацией; 9 — россыпи золота с сопутствующими платиноидами [Нодия, Шапиро, 1969]; 10 — контур развития магнетит-хромитовых (с золотом и платиноидами) прослоев в рыхлых плиоцен-четвертичных отложениях [Нодия, Шапиро, 1969]; 11 — местоположение района исследований (на врезке).

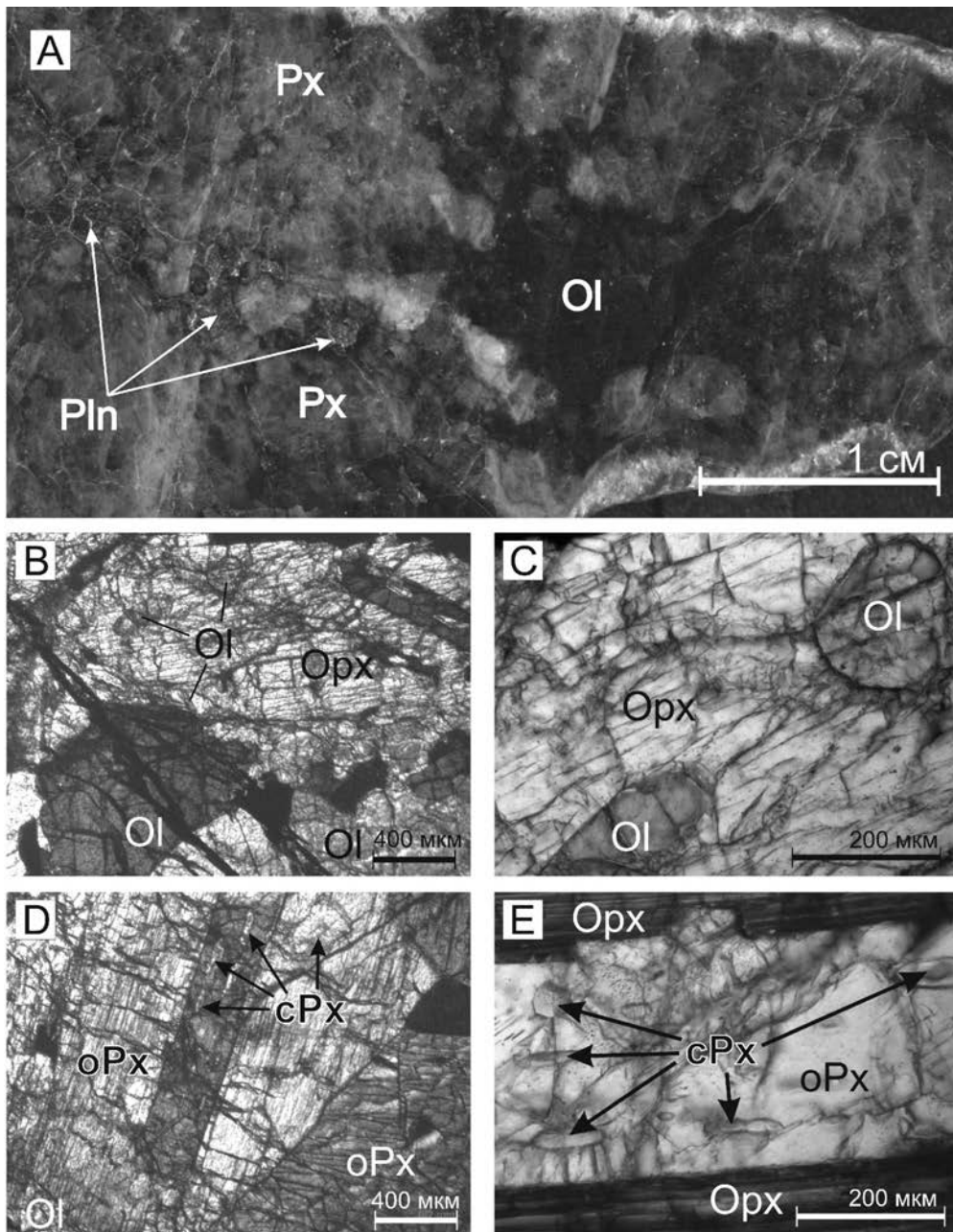


Рис. 2. Оливиновые вебстериты

А — фото образца. Светлые участки сложены преимущественно пироксенами (Px), темные — оливином (Ol). Хорошо видно, что выделения пентландита (Pln) тяготеют к участкам, сложенным пироксенами. В, С, D, Е — оливиновые вебстериты под микроскопом в проходящем свете (никколи скрещены). В — пойкилитовые вростки оливина в ортопироксене (Opx); С — то же, увеличенный участок зерна ортопироксена с вростками оливина; D — двойник кристаллов ортопироксена с вростками клинопироксена (сPx); Е — то же, увеличенный фрагмент двойника ортопироксена; в одной из двойниковых полос (светлое) видны вростки клинопироксена.

порядка 900–950 °С, более низкие в сравнении с вмещающими гарцбургитами (1000–1200 °С, [6]).

Оливиновые вебстериты с сульфидной минерализацией представляют собой высокомагнезиальные породы нормального ряда. По результатам рентгенофлуоресцентного анализа, содержание петрогенных оксидов в породе составляет (мас. %): SiO₂ — 51,35; TiO₂ — 0,028; Al₂O₃ — 2,1; ΣFeO — 7,17; CaO — 2,39; MgO — 33,12; MnO — 0,13; Na₂O — 0,02; K₂O — 0,018. Содержание серы достигает 0,65 мас. %. Повышенные концентрации меди (1389 г/т) и никеля (6411 г/т) отражают присутствие сульфидной минерализации и самородных фаз. Высокое содержание хрома (6384 г/т) обусловлено хромсодержащими пироксенами и хромшпинелидами. Ванадий (113 г/т) изоморфно входит в состав шпинелидов. Концентрация кобальта составляет 123 г/т, цинка — 44 г/т. По данным М. Е. Бояриновой [7], породы содержат до 0,3 г/т платины и палладия, до 0,01 г/т родия и до 0,015 г/т рутения.

Рудная минерализация в оливиновых вебстеритах. Рудные минералы в характеризуемых породах представлены хромшпинелидами, пентландитом, халькопиритом, медно-никелевыми сульфидами, троилитом, макинавитом, кубанитом и борнитом, с подчиненными количествами аваруита, самородной и платинистой меди, а также самородного золота.

Хромшпинелиды образуют округлые и резорбированные зерна неправильной формы размером 0,5–1,5 мм. Отмечается слабо проявленная зональность — к краевой части зерен уменьшается содержание хрома и возрастает алюминия. При этом состав изменяется от алюмохромита до хромпикотита (табл. 1). Отмечается обрастание хромшпинелидов выделениями пентландита (рис. 3, А).

Сульфидные, самороднометалльные и интерметаллидные фазы. Сульфиды в ортопироксенах образуют цепочки тонких выделений вытянутой и округлой формы размером до 5–20 мкм (рис. 3, В), а также ксеноморфные обособления размером до 2–5 мм (рис. 3, С). В цепочках вкрапленников преобладает пентландит при подчиненной роли медно-никелевых сульфидов и борнита. Крупные выделения сложены пентландитом (Fe_{5,7}Ni_{3,3}S₈) и минералами, сходными с ним по составу, но с повышенным содержанием меди (табл. 2). Подобные медно-никелевые сульфиды были исследованы в лерцолитах перидотитового массива Гороман на о-ве Хоккайдо в ассоциации с магнетитом, пентландитом, троилитом, хизлевудитом, борнитом и самородной медью [9]. В отличие от пентландита они представляют собой тетрагональные сульфидные фазы — сугакиит Cu(Fe, Ni)₈S₈, гороманиит (Fe, Ni, Co, Cu)₉S₈ и саманиит Cu₂(Fe, Ni)₇S₈ [10].

Крупные зерна пентландита замещаются по трещинам аваруитом (рис. 3, D, E), образование которого связано с восстановлением сульфидных фаз. Возможность подобного процесса подтверждают данные экспериментальных исследований — при нагреве в восстановительной обстановке во всех газовых средах в диапазоне температур 800–950 °С одним из продуктов восстановления пентландита является ферро-никелевый сплав [11]. В зернах, сложенных пентландитом и медно-никелевыми сульфидами, наблюдаются неправильной формы выделения самородной меди (рис. 3, F). Аваруит при этом отмечается в меньшей степени. Самородная медь развивается по краям сульфидных выделений и выполняет трещины в рудных (рис. 3, G) и силикатных минералах (рис. 3, H), образуя дендриты. Она содержит незначительную примесь железа, иногда — никеля (табл. 3).

Таблица 1. Химические составы хромшпинелидов из вебстеритов (мас. %)

Компонент	Номер анализа										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Номер зерна										
	7 ц	7 к	8 ц	8 к	14 ц	14 к	17 ц	17 к	18 ц	18 к	1
Al ₂ O ₃	28,06	28,70	27,54	28,43	31,36	33,85	26,19	27,48	26,66	28,05	23,30
FeO	15,36	15,46	15,55	15,52	17,22	19,41	16,48	15,98	15,55	14,91	24,85
Fe ₂ O ₃ **	1,72	1,73	0,20	1,43	1,51	2,20	0,72	0,66	0,83	0,72	0,76
Cr ₂ O ₃	40,48	39,03	41,86	39,66	36,03	30,69	42,01	41,20	42,25	39,92	42,22
MgO	13,64	13,46	13,66	13,41	12,67	10,96	12,79	12,99	13,23	13,49	7,26
V ₂ O ₃	нпо	нпо	0,36	нпо	нпо	нпо	0,37	нпо	нпо	нпо	0,62
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,42	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	99,26	98,38	99,17	98,45	98,79	97,53	98,56	98,31	98,52	97,09	99,01
Al	7,97	8,20	7,84	8,13	8,88	9,70	7,58	7,92	7,68	8,12	7,05
Fe ²⁺	3,10	3,13	3,14	3,15	3,46	3,95	3,38	3,27	3,18	3,06	5,34
Fe ³⁺	0,31	0,32	0,04	0,26	0,27	0,40	0,13	0,12	0,15	0,13	0,15
Cr	7,72	7,48	8,00	7,61	6,85	5,90	8,16	7,96	8,17	7,75	8,57
Mg	4,90	4,87	4,92	4,85	4,54	3,97	4,68	4,73	4,82	4,94	2,78
V	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,07	нпо	нпо	нпо	0,12
Ni	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,08	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00

Примечание. нпо — ниже предела обнаружения; ц — центр зерна, к — край зерна. ** рассчитано по стехиометрии.

На рис. 4, А–D, иллюстрируется сложный сросток сульфидов железа, меди и никеля. Отдельные участки в зерне образованы сульфидно-оксидно-силикатными микроагрегатами. Зафиксированы единичные резорбированные включения хромшпинелидов с диффузионной реакционной каймой, платинистая медь и соединения висмута и теллура. Сульфидные медно-никелевые фазы представлены предположительно гороманиитом, сугакиитом и саманиитом, а также троилитом, халькопиритом и кубанитом. В составе сульфидно-оксидно-силикатных микроагрегатов установлены серпентин, магнетит, халькопирит, халькозин и макинавит, а также ковеллин, оксиды и гидроксиды железа. Платинистая медь представлена твердыми растворами системы Cu–Pt со средним содержанием платины 29 мас. % (табл. 4), иногда с незначительной примесью палладия (до 1,15 мас. %). Ею по краю зерна слагается кайма шириной порядка 10 мкм (рис. 4, D) и обособление размером 20–50 мкм (рис. 4, C), в центральной части которого находится агрегат теллурита и платинистой меди, а также выделение хромшпинелида размером менее 3 мкм (рис. 4, C). Вблизи края данного сложного сульфидного сростка установлена фаза с теллуrom, висмутом и палладием размером менее 5 мкм, развивающаяся вдоль просечки серпентина (рис. 4, D).

Полученная новая информация дополняет сведения по минералогии платиноидов из россыпей золота п-ова Камчатский Мыс (см. рис. 1). Три четверти минералов ЭПГ в рыхлых отложениях представлены соединениями рутения, иридия

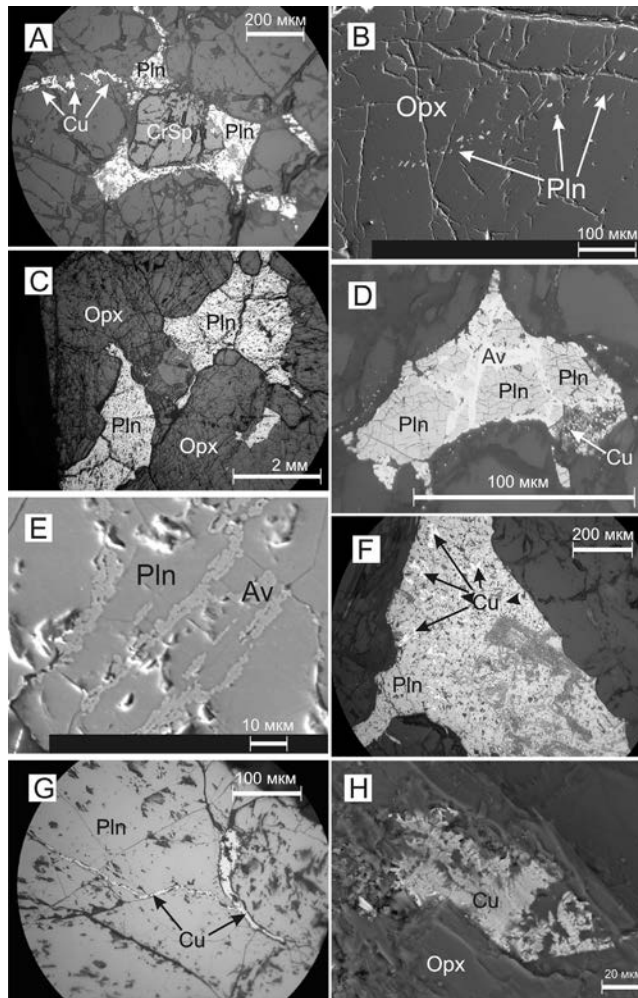


Рис. 3. Морфология выделений рудных минералов в оливиновых вебстеритах:

А — пентландит обрастает кристалл хромшпинелида (CrSp). По трещинам в породообразующих минералах в обрамлении пентландита видны выделения самородной меди. В, С — морфология сульфидных выделений: В — цепочка тонких выделений сульфидов (светлое) в ортопироксене; С — форма крупных выделений пентландита среди ортопироксенов. Отчетливо виден ксеноморфизм сульфидных выделений по отношению к силикатным минералам. D, E — замещение пентландита вдоль трещин аваруитом (Av): D — частично замещенный аваруитом (светлое) пентландит, по краю зерна — самородная медь; E — характер замещения пентландита аваруитом (светло-серое) вдоль трещин отдельности — выделения аваруита разрастаются от трещин. F–H — характер выделений самородной меди: F — выделения самородной меди в зерне, сложенном пентландитом и медно-никелевыми сульфидами; серое в сульфиде — тени разложенных и замещенных минералов, вероятно — силикатов. G — самородная медь по трещинам в пентландите. H — дендриты самородной меди по трещинам спайности в ортопироксене. B–D, F, G — фото в отраженном свете; A, E — фото в отраженных и вторичных электронах, рентгеноспектральный микроанализатор JXA-8100; H — фото в отраженных электронах, сканирующий электронный микроскоп EVO 50XVP.

Таблица 2. Химический состав сульфидов из вебстеритов (мас. %)

Компонент	Номер анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
	Номер зерна						
	110	111	30	2	13	2	29
Fe	40,24	40,76	40,94	42,44	42,66	41,35	39,92
Ni	25,18	24,94	25,75	23,61	23,28	24,97	25,97
Cu	0,07	0,07	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
S	34,27	34,70	32,81	33,00	33,09	32,60	32,72
Сумма	99,76	100,47	99,50	99,05	99,03	98,92	98,61
Компонент	Номер анализа						
	8	9	10	11	12	13	14
	Номер зерна						
	1	13	21	21	32	21	21
Fe	40,30	40,97	43,87	42,95	7,90	55,56	62,33
Ni	22,52	23,03	16,43	16,22	нпо	8,90	нпо
Cu	2,85	2,87	5,31	6,54	65,38	нпо	0,23
S	32,53	32,64	33,26	31,99	23,39	34,94	35,79
Сумма	98,21	99,51	98,87	97,70	96,67	99,40	98,35

Пр и м е ч а н и е. 1–7 — пентландит с низким содержанием меди; 8–11 — медно-никелевые сульфиды: 8 и 9 — составы, сходные с гороманиитом, 10 и 11 — составы, сходные с сугакиитом, 12 — борнит, 13 — макинавит; 14 — троилит. нпо — ниже предела обнаружения.

Таблица 3. Химический состав аваруита и самородной меди из вебстеритов (мас. %)

Компонент	Номер анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Номер зерна								
	2	13	13	1	21	21	21	30	33
Fe	34,98	28,74	32,12	1,63	0,60	0,73	0,60	3,15	1,72
Ni	64,00	70,36	66,57	1,61	нпо	нпо	нпо	0,71	нпо
Cu	нпо	нпо	нпо	96,01	98,41	98,87	100,14	96,49	98,85
Сумма	98,98	99,1	98,69	99,25	99,01	100,60	100,74	100,35	100,57

Пр и м е ч а н и е. 1–3 — аваруит; 4–9 — самородная медь. нпо — ниже предела обнаружения.

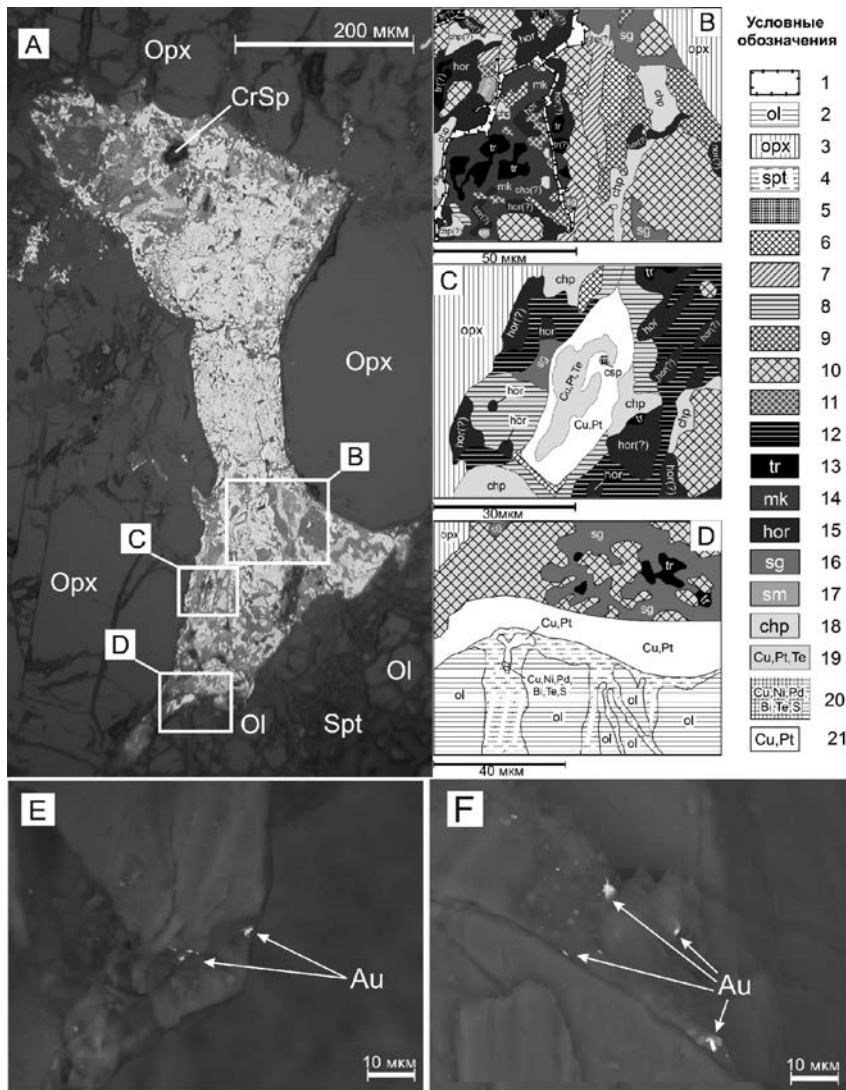


Рис. 4. Сульфидный сросток сложного состава с платиноидами и схемы соотношений минералов внутри сростка

A — морфология выделения и соотношения с породообразующими силикатами (CrSp — хромшпинелид, Spt — серпентин); B, C, D — схемы соотношений минералов в полисульфидных участках в сростке сложного состава: 1 — трещина; 2 — оливин; 3 — ортопироксен; 4 — серпентин; 5 — хромшпинелид; 6 — агрегат халькозина, ковеллина, оксидов железа и серпентина (?); 7 — агрегат халькопирита и магнетита; 8 — агрегат халькопирита, магнетита и серпентина (?); 9 — агрегат сульфидов меди, железа и серпентина (?); 10 — агрегат сульфидов меди, железа и неуставленных силикатов; 11 — агрегат сульфидов меди, никеля, железа и серпентина (?); 12 — агрегат троилита, магнетита и серпентина; 13 — троилит; 14 — никелистый макинавит; 15 — гороманиит; 16 — суакиит; 17 — саманиит; 18 — халькопирит; 19 — агрегат твердого раствора платины в меди и теллурита; 20 — фаза состава Cu, Ni, Pd, Bi, Te, S; 21 — твердый раствор платины в меди. E, F — самородное золото (белое) в ортопироксене, размер выделений — менее 3 мкм (фото в отраженных электронах, сканирующий электронный микроскоп EVO 50XVP).

Таблица 4. Состав минералов благородных металлов оливиновых вебстеритов (мас. %)

Компонент	Номер анализа									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер зерна									
	21	21	21	21	21	21	21	25	25	25
Pt	25,70	26,78	30,19	31,25	30,14	29,82	нпо	нпо	нпо	нпо
Pd	нпо	нпо	нпо	1,15	0,45	0,67	6,74	нпо	нпо	нпо
Au	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	88,13	92,79	96,73
Ag	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	6,71	7,21	2,07
Cu	69,08	73,22	69,81	67,60	69,42	69,51	16,17	0,74	нпо	1,20
Hg	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	4,42	нпо	нпо
Te	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	9,05	нпо	нпо	нпо
Bi	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	27,84	нпо	нпо	нпо
Fe	2,90	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	24,88	нпо	нпо	нпо
Ni	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	7,45	нпо	нпо	нпо
S	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	7,87	нпо	нпо	нпо
Сумма	97,68	100,00	100,00	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание. 1–6 — твердый раствор Pt–Cu; 7 — фаза сложного состава с Cu, Ni, Pd, Bi, Te и S; 8–10 — самородное золото. Анализы выполнены: 1–7 — на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100; 8–10 — на аналитическом сканирующем электронном микроскопе EVO 50XVP, Carl Zeiss с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350. нпо — ниже предела обнаружения.

и осмия, а остальные — минералами платины (преимущественно природными сплавами Pt–Fe). В зернах самородных платиноидов в виде включений встречаются лаурит, ирарсит, сперрилит, куперит, твердые растворы ирарсит—лаурит, а также кейтконит Pd₃Te, Au–Pt–Pd сплавы, Pd₃S и Pd₃(As, Te) [4]. На диаграмме (рис. 5) видно, что среди минералов платиноидов из россыпи р. 1-я Ольховая нет различий с составом, подобным платинистой меди в оливиновых вебстеритах.

В ортопироксенах оливиновых вебстеритов развиты тончайшие (1–3 мкм) выделения высокопробного золота (880–970‰, табл. 4), иногда с примесью меди и ртути (рис. 4, Е, F), которые сходны по морфологии и составу с самородным золотом из хромититов Нижнетарлашкинского и Копсекского массивов альпинотипных гипербазитов Тувы [12]. Самородное золото тувинских массивов также содержит ртуть в количестве от 0,02 до 3,13 мас.%. Его образование связывается с лиственизацией и родингитизацией гипербазитов. При отсутствии серпентинизации пироксенов в оливиновых вебстеритах п-ова Камчатский Мыс выделение тонкого самородного золота, вероятно, произошло в ходе постмагматических процессов, не связанных с гидратацией пород.

О природе рудной минерализации оливиновых вебстеритов. В оливиновых вебстеритах выделяются три гипогенные рудные минеральные ассоциации. Ранняя, магматогенного этапа, представлена преимущественно пентландитом и медно-никелевыми сульфидами, а также халькопиритом и троилитом.

К продуктам постмагматических процессов, происходивших до начала гидратации пород гипербазитового массива, принадлежат аваруйт и самородное золото.

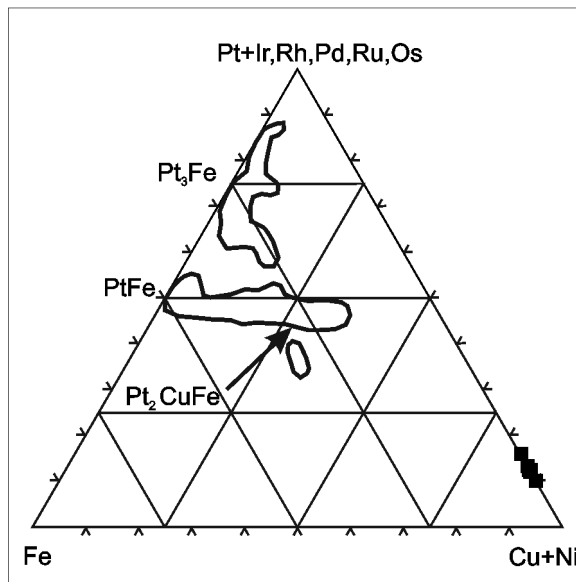


Рис. 5. Составы платинистой меди из вебстеритов в координатах Fe–Pt+Ir, Rh, Pd, Ru, Os–Cu+Ni, ат. % (черные квадраты). Оконтурены составы минералов платиноидов из россыпи р. 1-я Ольховая, п-ов Камчатский Мыс [16]

В ходе последующей серпентинизации отлагались самородная медь, твердые растворы Cu–Pt, халькогениды с теллуром, висмутом и палладием, золото, а также магнетит и макинавит. В гипергенный этап были развиты теллуриды, ковеллин, халькозин, оксиды и гидроксиды железа.

Оливиновые вебстериты, как и вмещающие гарцбургиты, являются частью офиолитовой ассоциации, формирование которой рассматривается нами в рамках модели селективного плавления [13, 14]. Структурно-текстурные [15], геохимические особенности вебстеритов и вариации составов породообразующих минералов указывают, что их образование связано с эволюцией и условиями становления расплава, сформировавшегося в результате частичного плавления мантийного субстрата. По мере охлаждения и сульфуризации расплава халькофильные элементы, прежде всего Ni и Cu, легко образовывали соединения с серой и отделялись от силикатной жидкости. В дальнейшем происходила сульфидно-силикатная ликвация с сегрегацией рудных капель и кристаллизация остаточного расплава при температуре порядка 900 °С.

Состав сульфидов закономерно менялся по мере выделения наиболее тугоплавких компонентов. Ранние продукты кристаллизации обогащены никелем, поздние – медью, платиной, палладием и теллуром. Вследствие этого сульфидные зерна ранней генерации (тонкие цепочки сульфидов внутри ортопироксенов) сложены преимущественно пентландитом, а последующие относительно крупные ксеноморфные выделения — пентландитом и медно-никелевыми сульфидами. Наиболее поздние сульфидные фазы, обогащенные медью, платиной, палладием и теллуром, после распада образовывали сложные сульфидные сростки.

В ходе постмагматических процессов, вероятно, до серпентинизации, пентландит по трещинам замещался аваруитом, а в ортопироксенах формировались тончайшие выделения самородного золота. С серпентинизацией связаны развитие и перераспределение самородных фаз меди и платинистой меди, различных халькогенидов с теллуrom, висмутом и палладием, а также магнетита и макинавита.

Указанный генезис платинистой меди вебстеритов дополняет схему формирования платиноидной минерализации в гипербазитах п-ова Камчатский Мыс, предложенную в результате изучения минералов платиноидов из золотоносных россыпей и рыхлых отложений в обрамлении массивов гипербазитов [4]. В соответствии с этой схемой сначала формируется осмий-иридиевый парагенезис, по мере кристаллизации которого поздние фазы обогащаются рутением. Затем кристаллизуется изоферроплатина в сростании с рутением или рутенистым осмием [16]. Тетраферроплатина, ферроникельплатина и туламинит, а также сульфиды и сульфоарсениды элементов платиновой группы (ЭПГ) отлагались в ходе последующей серпентинизации ультраосновных пород. В исследованных оливиновых вебстеритах платина, палладий и теллур концентрировались в остаточном сульфидном расплаве. Соотношения минералов указывают на перераспределение рудных компонентов при серпентинизации и последующих изменениях. Как следствие Cu–Pt — твердый раствор, окаймляет сульфиды и граничит с серпентином (рис. 4, D). Там же, в серпентине, отмечена фаза сложного состава с Cu, Ni, Pd, Bi, Te и S. Агрегат теллурида и платинистой меди, по-видимому, сформировался в результате распада соединения теллура, меди и платины, неустойчивого в условиях гипергенеза.

Заключение. В развитии магматических систем офиолитовых ассоциаций и рудоносных расслоенных интрузивов отмечаются общие черты, несмотря на принципиальные различия в механизме генерации расплавов и тектонических обстановках становления [17]. Соответственно, можно допустить, что формирование сульфидной и платиноидной минерализации в обоих случаях имеет сходный характер.

Предполагается, что в процессе частичного плавления мантийного субстрата происходило обогащение формирующегося расплава серой, сидерофильными и халькофильными элементами, в том числе платиноидами. В результате ликвационного отделения сульфидной жидкости и кристаллизации остаточного расплава при температурах порядка 900 °C сформировались оливиновые вебстериты с рудной минерализацией. В ходе постмагматических процессов (в том числе при серпентинизации) в восстановительных условиях при недостатке серы и низкой активности кислорода в оливиновых вебстеритах происходил распад рудных минералов, устойчивых при высоких температурах и давлениях, а также частичное перераспределение сульфидных и металлических фаз.

Изученная рудная минерализация проявляет некоторые черты сходства с сульфидной минерализацией месторождения Акуже в офиолитовом комплексе Замбалес (Филиппины) [18, 19], а также минерализацией на о-ве Хоккайдо (Япония) в перидотитовом массиве Гороман [9].

Проведенное исследование позволило детально охарактеризовать состав развитых в оливиновых вебстеритах рудных минералов и установить последовательность их отложения, показав место этой халькогенидной и благороднометалльной минерализации в процессе формирования офиолитовой ассоциации в южной части п-ова Камчатский Мыс.

Литература

1. Назимова Ю. В. Геохимия, минералогия и генезис медно-никелевого оруденения в альпино-типных гипербазитах острова Карагинского (Восточная Камчатка): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб., 1992. 16 с.
2. Сляднев Б. И. Актуализированная легенда Корякско-Курильской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение) / под ред. В. К. Ротмана, А. Ф. Литвинова. Петропавловск-Камчатский, 2007. 238 с.
3. Сидоров Е. Г. Самородные никелевые металлы в гипербазитах // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 6. С. 1456–1459.
4. Сидоров Е. Г. Платиноносность базит-гипербазитовых комплексов Корякско-Камчатского региона: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Петропавловск-Камчатский, 2009. 46 с.
5. Назимова Ю. В. Основные факторы и поисковые критерии сульфидного медно-никелевого оруденения альпинотипных гипербазитов Восточной Камчатки // Базит-гипербазитовые комплексы Корякско-Камчатского региона: материалы научного совещания и сессии Камчатского отделения Всероссийского минералогического общества, посвященных памяти ученого-вулканолога Ф. Ш. Кутыева. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 86–87.
6. Высоцкий С. В. Минералогические критерии магматического генезиса ультрабазитов офиолитовых ассоциаций (на примере Восточной Камчатки) // Новые данные по петрологии магматических и метаморфических пород Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. С. 134–156.
7. Бояринова М. Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Восточно-Камчатская серия, листы О–58–XXVI, XXXI, XXXII / под ред. Б. А. Марковского. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 190 с.
8. Lindsley D. H. Pyroxene thermometry // American Mineralogist. 1983. Vol. 68. P. 477–493.
9. Kitakaze A., Itoh H., Komatsu R. Horomanite, $(\text{Fe,Ni,Co,Cu})_9\text{S}_8$, and samaniite $\text{Cu}_2(\text{Fe,Ni})_7\text{S}_8$ new mineral species from the Horoman peridotite massif, Hokkaido, Japan // Journal of Mineralogical and Petrological Sciencs. 2011. Vol. 106. P. 204–210.
10. Kitakaze A. Sugakiite $\text{Cu}(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_8$, a new mineral. IMA General Meeting. Kobe, July 2006, poster № 31–3, abstract № 90551.
11. Ерцева Л. Н., Дьяченко В. Т., Сухарев С. В. Восстановительная термообработка пентландита из пирротинсодержащего медно-никелевого сульфидного сырья // Цветные металлы. 1997. № 6. С. 24–26.
12. Агафонов Л. В., Кужугет К. С., Ойдуп Ч. К., Ступаков С. И. Самородные металлы в гипербазит-базитах Тувы. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 86 с.
13. Осипенко А. Б., Крылов К. А. Геохимическая гетерогенность мантийных перидотитов в офиолитах Восточной Камчатки: причины и геодинамические следствия // Базит-гипербазитовые комплексы Корякско-Камчатского региона: материалы научного совещания и сессии Камчатского отделения Всероссийского минералогического общества, посвященных памяти ученого-вулканолога Ф. Ш. Кутыева. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 48–50.
14. Осипенко А. Б., Новаков Р. М. Хромитовая минерализация в ультрамафитах п-ова Камчатский Мыс, Восточная Камчатка // ЗВМО. 2002. № 2. С. 84–98.
15. Пейве А. А. Гипербазиты полуострова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Тихоокеан. геология. 1987. № 2. С. 41–46.
16. Tolstykh N., Sidorov E., Kozlov A. Platinum-group minerals from the Olkhovaya–1 placers related to the Karaginsky ophiolite complex, Kamchatskiy Mys peninsula, Russia // The Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 47. P. 1057–1074.
17. Шарков Е. В., Богатиков О. А. Механизмы концентрирования элементов платиновой группы в расслоенных интрузивах Карело-Кольского региона // Геология рудных месторождений. Т. 40. 1998. № 5. С. 419–439.
18. Mustansir V. Manjoorsa, Graciano P. Yumul Jr. Platinum-Group Element and Base Metal-related Mineralization in the Acoje Block, Zambales Ophiolite Complex // Journal of the Geological Society of the Philippines. 1996. Vol. LI, N 3–4. P. 153–177.
19. Graciano P. Yumul Jr. The Acoje Block Platiferous Dunite Horizon, Zambales Ophiolite Complex, Philippines: Melt Type and Associated Geochemical Controls // Resource Geology. 2001. Vol. 51, N 2. P. 165–174.

References

1. Nazimova Iu. V. *Geokhimiia, mineralogiia i genezis medno-nikelevogo orudeneniia v al'pinotipnykh giperbazitakh ostrova Karaginskogo (Vostochnaia Kamchatka)*. Autoref. Diss. ... kand. geol.-miner. nauk [Geochemistry, mineralogy and genesis of copper-nickel mineralization in alpinotype ultrabasites of the Karaginsky island (Eastern Kamchatka)]. Thesis of PhD diss.]. St. Petersburg, 1992. 16 p. (In Russian)
2. Sliadnev B. I. *Aktualizirovannaia legenda Koriaksko-Kuril'skoi serii listov Gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1000000 (tre'e pokolenie)* [Updated legend of Koryak-Kuril sheets series of the State geological map of the Russian Federation of 1:1000000 scale (the third generation)]. Eds V. K. Rotman, A. F. Litvinov. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2007. 238 p. (In Russian)
3. Sidorov E. G. Samorodnye nikelovye metally v giperbazitakh [Native nickel metals in ultrabazit]. *Dokl. AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1987, vol. 295, no. 6, pp. 1456–1459. (In Russian)
4. Sidorov E. G. *Platinonost' bazit-giperbazitovykh kompleksov Koriaksko-Kamchatskogo regiona*. Autoref. Diss. doct. geol.-miner. nauk [Platinum-bearing of basite-ultrabazit complexes of Koryak-Kamchatka region. Thesis of Dr. geol.-miner. sci. diss.]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2009. 46 p. (In Russian)
5. Nazimova Iu. V. *Osnovnye faktory i poiskovye kriterii sul'fidnogo medno-nikelevogo orudeneniia al'pinotipnykh giperbazitov Vostochnoi Kamchatki* [Main factors and prospecting criteria of sulfide copper-nickel mineralization of alpinotype ultrabasites of Eastern Kamchatka]. *Bazit-giperbazitovye komplekсы Koriaksko-Kamchatskogo regiona: materialy nauchnogo soveshchaniia i sessii Kamchatskogo otdeleniia Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva, posviashchennykh pamiati uchenogo-vulkanologa F. Sh. Kutyeva* [Mafic-ultramafic complexes of the Korjak-Kamchatka region: Proceeding on the scientific conference and session of the Russian mineralogical society, Kamchatka branch held in the memory of scientist-volcanologist F. Sh. Kutyev]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2001, pp. 86–87. (In Russian)
6. Vysotskii S. V. *Mineralogicheskie kriterii magmaticheskogo genezisa ul'trabazitov ofiolitovykh assotsiatsii (na primere Vostochnoi Kamchatki)* [Mineralogical criteria of magmatic genesis of ophiolitic associations ultrabasites (Eastern Kamchatka is as example)]. *Novye dannye po petrologii magmaticheskikh i metamorficheskikh porod Kamchatki* [New data on petrology of magmatic and metamorphic rocks of Kamchatka]. Vladivostok, DVNTs AN SSSR Publ., 1989, pp. 134–156. (In Russian)
7. Boiarinova M. E. *Gosudarstvennaia geologicheskaiia karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200000. Vostochno-Kamchatskaia seriia, listy O-58-XXVI, XXXI, XXXII* [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200 000 East Kamchatka series, sheets O-58-XXVI, XXXI, XXXII]. Ed. by B. A. Markovskiy. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1999. 190 p. (In Russian)
8. Lindsley D. H. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 1983, vol. 68, pp. 477–493.
9. Kitakaze A., Itoh H., Komatsu R. Horomanite, $(\text{Fe,Ni,Co,Cu})_9\text{S}_8$, and samaniite $\text{Cu}_2(\text{Fe,Ni})_7\text{S}_8$ new mineral species from the Horoman peridotite massif, Hokkaido, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciens*, 2011, vol. 106, pp. 204–210.
10. Kitakaze A. Sugakiite $\text{Cu}(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_8$, a new mineral. *IMA General Meeting, Kobe, July 2006, poster № 31-3, abstract № 90551*.
11. Ertseva L. H., D'iachenko V. T., Sukharev C. B. *Vosstanovitel'naia termoobrabotka pentlandita iz pirrotinsoderzhashchego medno-nikelevogo sul'fidnogo syr'ia* [Reconstructive thermal processing of pentlandite from pyrrhotine-containing copper-nickel sulfide material]. *Tsvetnye metally [Ferrous metals]*, 1997, no. 6, pp. 24–26. (In Russian)
12. Agafonov L. V., Kuzhuguet K. S., Oidup Ch. K., Stupakov S. I. *Samorodnye metally v giperbazit-bazitakh Tuvy* [Native metals in ultrabasites-basites Tuva region]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN Publ., 1993. 86 p. (In Russian)
13. Osipenko A. B., Krylov K. A. *Geokhimicheskaiia geterogenost' mantiinykh peridotitov v ofiolitakh Vostochnoi Kamchatki: prichiny i geodinamicheskie sledstviia* [Geochemical heterogeneity of mantle peridotites in ophiolites of Eastern Kamchatka: reasons and geodynamic results]. *Bazit-giperbazitovye komplekсы Koriaksko-Kamchatskogo regiona: materialy nauchnogo soveshchaniia i sessii Kamchatskogo otdeleniia Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva, posviashchennykh pamiati uchenogovulkanologa F. Sh. Kutyeva* [Mafic-ultramafic complexes of the Korjak-Kamchatka region: Proceeding on the scientific conference and session of the Russian mineralogical society, Kamchatka branch held in the memory of scientist-volcanologist F. Sh. Kutyev]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2001, pp. 48–50. (In Russian)
14. Osipenko A. B., Novakov R. M. *Khromitovaia mineralizatsiia v ul'tramafitakh poluostrova Kamchatskogo mysa, Vostochnaia Kamchatka* [Chromite mineralization in ultramafites of Kamchatsky Mys peninsula (Kamchatka)]. *ZVMO [Proc. RMS]*, 2002, no. 2, pp. 84–98. (In Russian)
15. Peive A. A. *Giperbazity poluostrova Kamchatskii Mys (Vostochnaia Kamchatka)* [Hyperbasites

peninsula Kamchatka Cape (Eastern Kamchatka)]. *Tikhookean. geologiya* [*Pacific Geology*], 1987, no. 2, pp. 41–46. (In Russian)

16. Tolstykh N., Sidorov E., Kozlov A. Platinum-group minerals from the Olkhovaya-1 placers related to the Karaginsky ophiolite complex, Kamchatskiy Mys peninsula, Russia. *The Canadian Mineralogist*, 2009, vol. 47, pp. 1057–1074.

17. Sharkov E. V., Bogatkov O. A. Mekhanizmy kontsentrirvaniia elementov platinovoi gruppy v rassloennykh intruzivakh Karelo-Kol'skogo regiona [Concentration mechanisms of platinum group elements in laminated intrusives of Karelia-Kola regions]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [*Geology of Ore Deposits*], 1998, vol. 40, no. 5, pp. 419–439. (In Russian)

18. Mustansir V. Manjoorsa, Graciano P. Yumul Jr. Platinum-Group Element and Base Metal-related Mineralization in the Acoje Block, Zambales Ophiolite Complex. *Journal of the Geological Society of the Philippines*, 1996, Vol. LI, no. 3–4, pp. 153–177.

19. Graciano P. Yumul Jr. The Acoje Block Platiniferous Dunite Horizon, Zambales Ophiolite Complex, Philippines: Melt Type and Associated Geochemical Controls. *Resource Geology*, 2001, vol. 51, no. 2, pp. 165–174.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2015 г.

Контактная информация:

Новаков Роман Михайлович — старший научный сотрудник; brom6@mail.ru

Иванов Владимир Викторович — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией; d159327@yandex.ru

Трухин Юрий Петрович — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией; ytrukhin@yandex.ru

Панова Елена Геннадиевна — доктор геолого-минералогических наук, профессор; e.panova@spbu.ru

Novakov R. M. — Senior Researcher; brom6@mail.ru

Ivanov V. V. — PhD, head of Laboratory; d159327@yandex.ru

Trukhin Yu. P. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, head of Laboratory; ytrukhin@yandex.ru

Panova E. G. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor; e.panova@spbu.ru