

УДК 553.086, 553.087

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-5

**БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ГАББРОИДАХ
КУМБИНСКОГО МАССИВА, ПЛАТИНОНОСНЫЙ ПОЯС УРАЛА
(СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)****В.В. Михайлов¹, С.Ю. Степанов¹, С.В. Петров², Р.С. Паламарчук³**¹ *Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15,
г. Екатеринбург, 620016 Россия; palamarchuk22@yandex.ru*² *Санкт-Петербургский государственный университет, пер. Декабристов 16,
г. Санкт-Петербург, 199155 Россия*³ *Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Ильменский
государственный заповедник, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия*

Статья поступила в редакцию 07.07.2022 г., принята к печати 15.11.2022 г.

**NOBLE METAL MINERALIZATION IN GABBROIDS
OF THE KUMBA INTRUSIVE, THE URALIAN PLATINUM BELT
(NORTH URALS)****V.V. Mikhailov¹, S.Yu. Stepanov¹, S.V. Petrov², R.S. Palamarchuk³**¹ *Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg,
620016 Russia; palamarchuk22@yandex.ru*² *St. Petersburg State University, per. Dekabristov 16, St. Petersburg, 199034 Russia*³ *South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Ilmeny State Reserve,
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia*

Received 07.07.2022, accepted 15.11.2022

Аннотация. В работе приводится первая комплексная характеристика минералов медно-благороднометалльной ассоциации в габброидах Кумбинского массива (Северный Урал). Установлено, что с дигенит-борнитовыми, халькопирит-борнитовыми и пирит-халькопиритовыми рудами связаны минералы благородных металлов. Впервые для амфиболовых и амфибол-оливиновых габбро Кумбинского массива установлено девять видов минералов благородных металлов и их разновидностей. Среди них диагностированы самородное золото и его сплавы, теллуриды Ag и Pd (гессит, меренскиит), а также висмутотеллуриды (котульскит), арсенидо-антимониды (изомертиит), арсениды (арсенопалладинит, сперрилит) и станниды (атокит) Pt и Pd. Минералы благородных металлов из всех сульфидных ассоциаций в концентратах сопровождаются антимонитом и минералами Bi (самородный висмут, висмутин), реже встречаются баксанит и цумоит. Полученные результаты позволяют на новом уровне оценить перспективы выявления новых медно-благороднометалльных месторождений в габбро Платиноносного пояса. С учетом закономерностей проявления благороднометалльной и медной минерализации, большинство габбровых плутонов Платиноносного пояса Урала могут быть рассмотрены как перспективные объекты для выявления крупнотоннажных месторождений меди с попутными рудными концентрациями золота и палладия.

Ключевые слова: Кумбинский массив, золото, палладий, медь, теллуриды, минералы благородных металлов, медно-благороднометалльные руды, Платиноносный пояс Урала, Северный Урал.

Abstract. The paper presents the first data on the distribution and composition of copper-noble metal mineralization in gabbroids of the Kumba intrusive (North Urals). The noble metal mineralization is associated with digenite-bornite, bornite-chalcopyrite, and pyrite-chalcopyrite ores and mainly occur minerals of precious metals. Nine noble metal mineral species are found for the first time in amphibole and amphibole-olivine gabbro of the Kumba intrusive: native gold, Au-Ag alloys, Au, Ag, and Pd tellurides (hessite, merenskiite), Bi tellurides (kotulskite), antimonide-arsenides (isomertieite), arsenides (arsenopalladinite, sperrilite), and

stannides (atokite) of Pt and Pd. Noble metal minerals from all sulfide assemblages in heavy concentrates are often accompanied by antimonides (stibnite) and Bi mineralization represented mainly by native bismuth and bismuthinite and less common sulfotellurides (baksanite) and tellurides (tsumoite). Our results make it possible to estimate the prospects of the discovery of new copper-noble metal deposits hosted in gabbro of the Uralian Platinum Belt. Taking into account the principles of occurrence of noble metal and copper mineralization, most gabbro intrusives of the Uralian Platinum Belt can be considered the promising objects for large-tonnage copper deposits with associated ore Au and Pd grades.

Keywords: Kumba intrusive, gold, palladium, copper, tellurides, noble metal minerals, copper-noble metal ores, Platinum belt of the Urals, North Urals.

Введение

Вопрос о платиноносности пород дунит-клинопироксенит-габбровых концентрически-зональных интрузивов Платиноносного пояса Урала (ППУ) стоит перед учеными-геологами уже более 150 лет, еще со времени начала крупномасштабной разработки уральских платиновых россыпей. Установлено, что наибольшее значение с точки зрения формирования платиновых россыпей имели хромит-платиновые рудные зоны в дунитах дунит-клинопироксенит-габбровых концентрических массивах (Высоцкий, 1913). Во многом именно этот фактор стал причиной научного интереса к ультраосновным породам в составе массивов, и долгое время исследования габброидов как потенциально-го источника металлов платиновой группы не проводились. Повышенные содержания благородных металлов в габброидах определены для Качканарского, Кумбинского, Кытлымского, Павдинского, Чистопольского и других массивов ППУ (Бобров, 1978, Золоев и др., 2001; Волченко и др., 2007). Однако при обилии геохимических данных и анализов с повышенными концентрациями благородных металлов в пробах, минералы-концентраторы благородных металлов охарактеризованы только для рудоносных габброидов Волковского и Баронского месторождений (Аникина, Алексеев, 2010; Мурзин и др., 2021), а также рудопроявлений массива Серебрянский Камень (Михайлов и др., 2021а).

В отчете о комплексных поисковых работах на медно-титаномagnetитовые и титаномagnetитовые руды, проведенных Североуральской комплексной геологоразведочной партией в период с 1976–

1978 гг. (Бобров, 1978), Кумбинский массив обозначен как перспективный на выявление волковского типа руд, при этом данные о содержаниях благородных металлов не приводятся.

Недостаточная изученность габброидов северного сегмента ППУ, отмеченная перспективность Кумбинского массива, а также отсутствие детальных минералогических исследований определили цель данной работы – выявление форм нахождения и закономерностей распространения благородных металлов в габброидах массива. Были решены следующие задачи: детализировано геологическое строение габбровой части Кумбинского массива; выявлены закономерности размещения медно-благороднометалльной минерализации в различных типах габбро, слагающих массив; описаны ассоциации минералов благородных металлов.

Геологическое положение района исследований

Платиноносный пояс Урала – это структура, объединяющая магматические дунит-клинопироксенит-габбровые интрузивы (Иванов, 1997; Ферштатер, 2013). Он протягивается вдоль Главного Уральского разлома на Среднем и Северном Урале и расположен в западном борту Тагило-Магнитогорской мегазоны (рис. 1а, б). Основной объем магматических интрузивных пород ППУ слагают габбровые массивы (Ферштатер, 2013). Одним из их представителей является Кумбинский массив, расположенный в 20 км западнее г. Североуральска. Массив обладает полифазным строением, и по последним представлениям в его сложении прини-

Для цитирования: Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Петров С.В., Паламарчук Р.С. Благороднометалльная минерализация в габброидах Кумбинского массива, Платиноносный пояс Урала (Северный Урал). Минералогия, 8(4), 79–93. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-5

For citation: Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Petrov S.V., Palamarchuk R.S. Precious metal mineralization in gabbroids of the Kumba intrusive, the Uralian platinum belt (North Urals) Mineralogy, 8(4), 79–93. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-5.

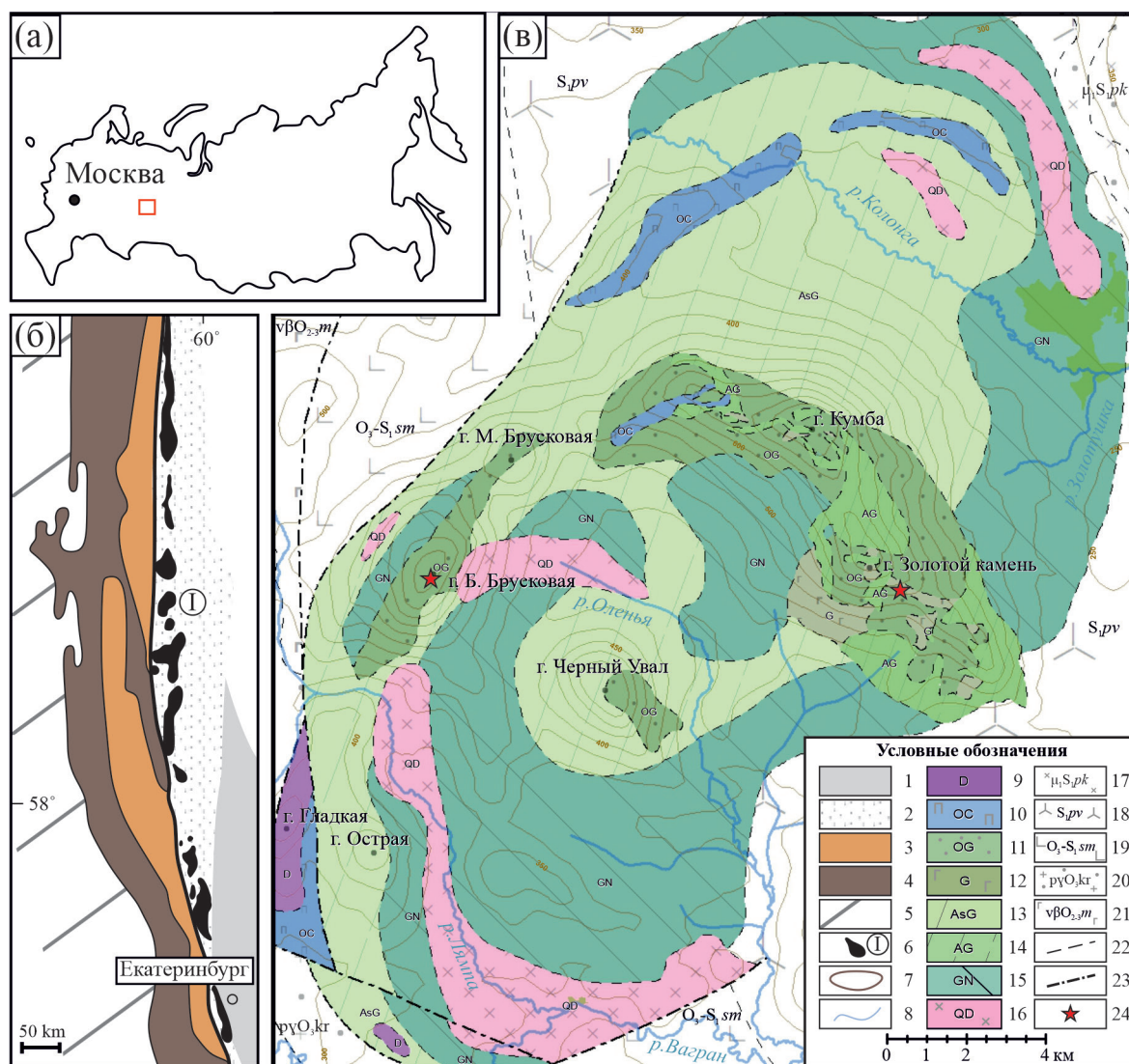


Рис. 1. Положение Кумбинского массива в структуре Платиноносного пояса Урала и особенности его геологического строения (схема составлена авторами с использованием материалов (Бобров, 1978)): а – положение массива на карте России; б – расположение массивов Платиноносного пояса Урала, тектоническая зональность показана по (Пучков, 2010); в – схема геологического строения Кумбинского массива.

1 – Восточно-Уральская мегазона; 2 – Тагильская мегазона; 3 – Центрально-Уральская мегазона; 4 – Западно-Уральская мегазона; 5 – Восточно-Европейская платформа; 6 – массивы Платиноносного Пояса Урала (римской цифрой I отмечено положение Кумбинского массива); 7 – линии горизонталей рельефа; 8 – современные водотоки; 9 – дуниты; 10 – оливиновые клинопироксениты; 11 – оливиновые габбро; 12 – габбро; 13 – амфиболсодержащие габбро; 14 – амфиболовые габбро; 15 – габбронориты; 16 – кварцевые габбродiorиты; 17 – диориты покровского комплекса; 18 – вулканические образования павдинской свиты; 19 – базальты шемурской свиты; 20 – плагииграниты кривинского комплекса; 21 – метаморфизованные породы мариинской свиты; 22 – предполагаемые геологические границы; 23 – разрывные нарушения; 24 – места отбора проб.

Fig. 1. Position of the Kumba intrusive in structure of the Platinum-bearing belt of the Urals and peculiarities of its geological structure, composed by the authors using materials of (Bobrov, 1978): a – position of the intrusive in Russia; б – position of massifs of the Platinum belt of the Urals (Roman numeral I indicates the position of the Kumba intrusive); в – scheme of geological structure of the Kumba intrusive.

1 – East Uralian Megazone; 2 – Tagil Megazone; 3 – Central Uralian Megazone; 4 – West Uralian Megazone; 5 – East European Platform; 6 – massifs of the Platinum belt of the Urals (Roman numeral I indicates the position of the Kumba intrusive); 7 – topographic lines; 8 – rivers; 9 – dunite; 10 – olivine pyroxenite; 11 – olivine gabbro; 12 – gabbro; 13 – amphibole-bearing gabbro; 14 – amphibole gabbro; 15 – gabbronorite; 16 – quartz gabbrodiorite; 17 – diorite of the Pokrovsky complex; 18 – volcanic rocks of the Pavda Formation; 19 – basalt of the Shemur Formation; 20 – plagiogranite of the Krivinsky complex; 21 – metamorphosed rocks of the Mariinsky Formation; 22 – inferred geological boundaries; 23 – faults; 24 – sampling sites.

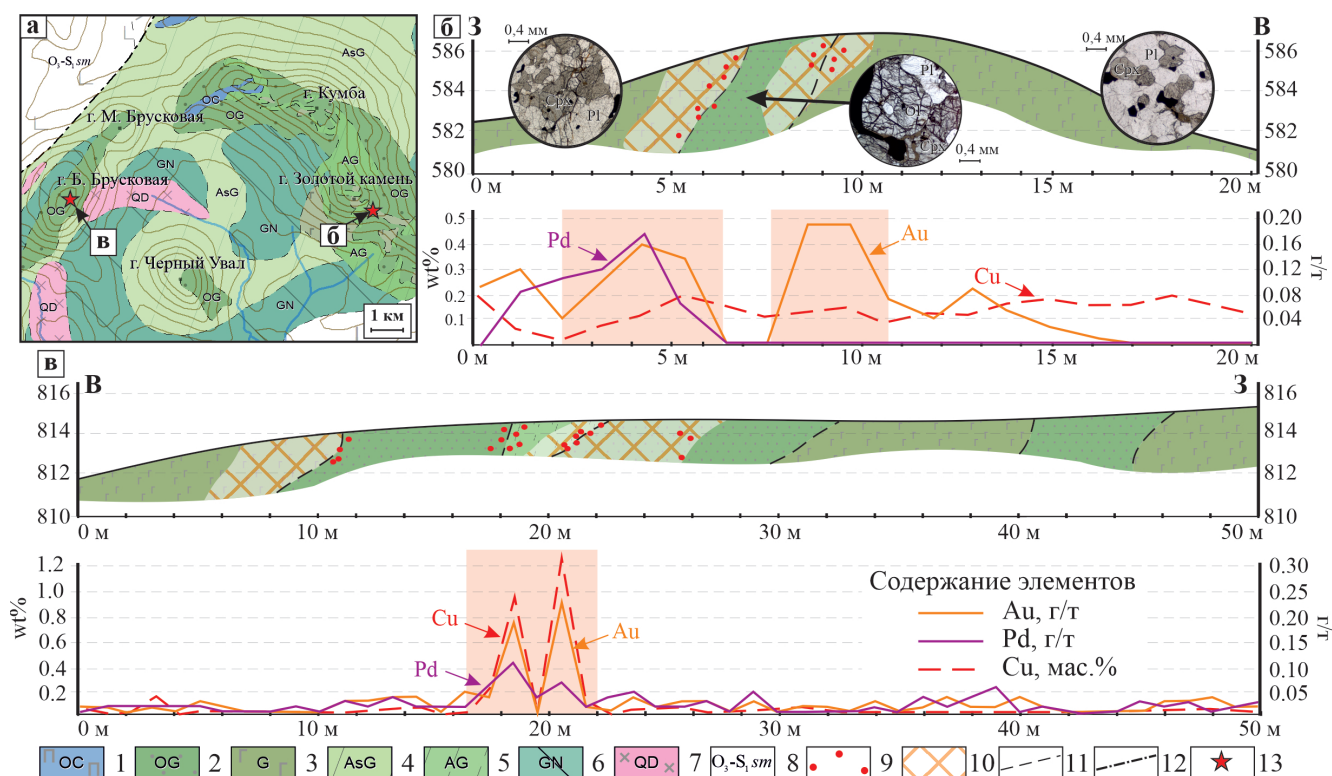


Рис. 2. Расположение обнажений (а) на г. Золотой Камень и г. Большая Брусковая и их зарисовки (б, в) с результатами определения содержаний Cu, Au и Pd.

1 – оливиновые клинопироксениты; 2 – оливиновое габбро; 3 – габбро; 4 – амфиболсодержащее габбро; 5 – амфиболовое габбро; 6 – габбронорит; 7 – кварцевые габбродиориты; 8 – базальты шемурской свиты; 9 – проявления видимой медно-сульфидной вкрапленности в породах; 10 – зоны распространения пород с такситовыми текстурами; 11 – предполагаемые геологические границы; 12 – разрывные нарушения; 13 – места отбора проб.

Fig. 2. Position of outcrops (a) of Mt. Zolotoy Kamen and Mt. Bolshaya Bruskovaya and their sketches (б, в) with Cu, Au and Pd contents of rocks.

1 – olivine pyroxenite; 2 – olivine gabbro; 3 – gabbro; 4 – amphibole-bearing gabbro; 5 – amphibole gabbro; 6 – gabbronorite; 7 – quartz gabbrodiorite; 8 – basalt of the Shemur Formation; 9 – visible inclusions of Cu sulfides in rocks; 10 – zones of taxitic rocks; 11 – inferred geological boundaries; 12 – faults; 13 – sampling sites.

мают участие магматиты различной формационной принадлежности (Петров и др., 2008). В рамках данного исследования не стояла задача детальной характеристики геологического строения Кумбинского массива. В качестве ключевых особенностей строения этого интрузивного тела отметим расположение в юго-западной части небольшого клинопироксенит-дунитового тела (рис. 1в), чашеобразное строение основного интрузива (Свешникова, 1961), сложенного различными разновидностями габбро, и более поздние тела диоритов, прорывающие габброиды. Габбронориты преобладают в строении массива и слагают в плане эллипсовидное тело размерами 25×12 км с общим северо-восточным простиранием и концентрической структурой.

Материалы и методы исследования

В ходе научно-исследовательских работ 2020–2021 гг. на территории Кумбинского массива были описаны обнажения гг. Золотой Камень и Большая Брусковая (рис. 2). Основой для проведения минералогических исследований послужили штучные и сколковые пробы (масса каждой пробы ~15 кг). Из штучных проб были изготовлены аншлифы и прозрачно-полированные шлифы, детально изученные методами оптической микроскопии. Из крупнообъемных проб после дробления до крупности 1.0 мм и последующего гравитационного обогащения были получены концентраты рудных минералов, в которых изучены минералы благородных металлов.

Химический состав минералов определен при помощи СЭМ JSM-6390LV (JEOL) с ЭДС (ЦКП «Геоаналитик», ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитики Л.В. Леонова, Н.С. Чебыкин), состав минералов завершен при помощи электронно-зондового микроанализатора Camebax SX100 (ЦКП «Геоаналитик», ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик И.А. Готтман). При записи эталонных профилей серий линий характеристического рентгеновского излучения использовались следующие эталоны: для элементов платиновой группы – чистые металлы (по L-линии); Cu – Cu_{мет}; Fe – Fe_{мет}; Ni – Ni_{мет}; Co – CoAsS; S – FeS_{2синт}; As – InAs; Sb – CuSbS₂; Te, Pb – PbTe; Bi – Bi_{мет}. При рентгеноспектральном микроанализе были использованы следующие параметры измерения: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА. Измерение пика основных элементов проводилось в течение 20 с, фона – по 10 с с каждой стороны, для элементов-примесей – по 40 с на пик и 20 с на фон. Использовались следующие эталоны: МПГ – чистые металлы; Cu, Sb – CuSbS₂; Fe, S – FeS; Ni – NiS; Co, As – CoAsS; Hg – HgTe; Pb – PbS; Bi – Bi₂S₃.

Содержания благородных металлов в пробах проанализированы пробирно-атомно-эмиссионным методом (ЗАО «РАЦ МИА»): пробирное концентрирование по СТП 1402.151.1-2014 (серебряный королек), атомно-эмиссионное определение по инструкции НСАМ 366-С на атомно-эмиссионном спектрометре ICAP 6300.

Результаты исследований

В строении Кумбинского массива наиболее распространены оливиновые габбро, габбро и габбронориты, в меньшей степени, амфиболовые и амфибол-оливиновые габбро (рис. 1в, 2). С такситовыми меланократовыми разновидностями амфиболовых и амфибол-оливиновых габбро гг. Большая Брусковая и Золотой Камень связана видимая медно-сульфидная минерализация (рис. 2). Минерализованные породы на 80 % состоят из фемических минералов (амфибола, клинопироксена и оливина) и на 20 % – из высококальциевого плагиоклаза.

Для этих пород характерна неравномернозернистая структура и пятнистая, такситовая текстура. По результатам минералогических и геохимических исследований установлено, что повышенные содержания Cu и благородных металлов в габбро, слагающих гг. Золотой Камень (рис. 2б) и Большая

Брусковая (рис. 2в), пространственно связаны с зонами проявления такситовых текстур. В минерализованных зонах суммарное содержание платиноидов и Au в такситовых габбро гг. Золотой Камень составляет, в среднем, 0.36 г/т при содержании меди около 0.1–0.2 %, для такситовых пород гг. Большая Брусковая суммарное содержание благородных металлов составляет 0.5 г/т при содержании Cu не менее 0.2 %.

Медно-сульфидное оруденение. Анализ взаимоотношения сульфидных медных и других рудных минералов в габброидах Кумбинского массива позволил выделить три типа медно-сульфидного оруденения: халькопирит-борнитовый, дигенит-борнитовый, пирит-халькопиритовый.

Халькопирит-борнитовый тип широко распространен в меланократовых оливиновых или оливин-амфиболовых габбро на гг. Большая Брусковая. Среди сульфидных минералов в этом типе преобладают халькопирит и борнит (рис. 3а–в). В минерализованных габброидах сульфиды составляют 5–15 об. %. Размер зерен минералов – 0.1–1.3 мм (0.6 мм в среднем). Структура в наиболее богатых разновидностях руд – сидеронитовая; текстуры – густовкрапленная, вкрапленная.

Дигенит-борнитовый тип оруденения встречается в меланократовых амфиболовых или оливин-амфиболовых (реже оливиновых) габбро гг. Большая Брусковая. Повышенные концентрации медных сульфидов связаны с меланократовыми разновидностями. Среди сульфидов преобладают борнит и дигенит, образующие мирмекитовые сростания (рис. 3г–е); халькопирит и титаномagnetит распространены ограничено. Структуры руд – графическая, распада твердого раствора; текстура – вкрапленная.

Пирит-халькопиритовая минерализация в пределах гг. Золотой Камень характерна для мезократового габбро с небольшими скоплениями халькопирита и пирита. Халькопирит образует зернистые интерстициальные агрегаты размером до нескольких миллиметров между силикатами и титаномagnetитом (рис. 3ж). Наиболее широко минерал распространен в ассоциации с пиритом и гидроксидами железа (рис. 3з, и). Халькопирит обладает сложными границами на контакте с силикатами и образует прожилки или цепочки мелких зерен, при этом часто замещается гидроксидами железа по периферии зерен. Наибольшее содержание халькопирита в этом типе габбро составляет 4.5 об. %. Тек-

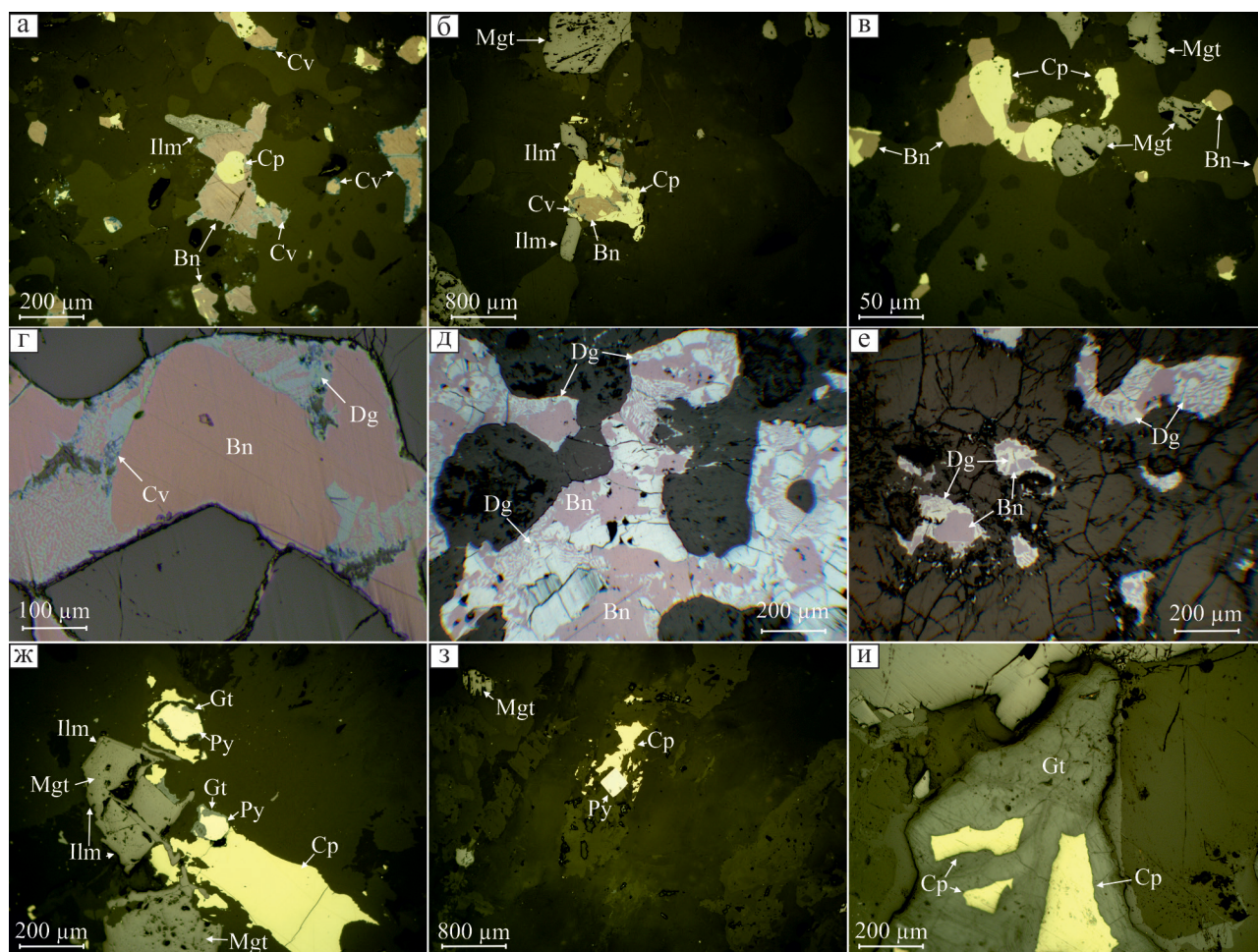


Рис. 3. Типы ассоциаций рудных минералов в габбро Кумбинского массива: а–в – халькопирит-борнитовый; г–е – дигенит-борнитовый; ж–и – пирит-халькопиритовый.

Здесь и далее: Bn – борнит, Cp – халькопирит, Cv – ковеллин, Dg – дигенит, Gt – гетит, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Py – пирит. Отраженный свет.

Fig. 3. Types of ore mineral assemblages in gabbro of the Kumba intrusive: а–в – chalcopyrite-bornite; г–е – digenite-bornite; ж–и – pyrite-chalcopyrite.

Hereinafter: Bn – bornite, Cp – chalcopyrite, Cv – covellite, Dg – digenite, Gt – goethite, Ilm – ilmenite, Mag – magnetite, Py – pyrite. Reflected light.

стур рудных сростаний чаще всего прожилковая, реже прожилково-вкрапленная.

Ассоциации минералов благородных металлов. В аншлифах и рудных концентратах полученных из минерализованных габброидов гг. Большая Брусковая и Золотой Камень, диагностированы минералы благородных металлов. Среди них широко распространены самородное золото, Au-Ag твердые растворы и арсениды и арсенидо-антимониды Pt и Pd. Реже обнаруживаются гессит, меренскиит, котульскит, изомертиит, сперрилит и атоцит. В рудных концентратах также установлены антимонит, самородный висмут и висмутин.

Зерна минералов благородных металлов присутствуют в виде рассеянной вкрапленности разме-

ром от первых десятков до 200 мкм, реже в виде более крупных гнездообразных скоплений размером до 250 мкм. Минералы платиновой группы (МПП) образуют отдельные индивиды. Относительно редко обнаруживаются агрегаты из двух-трех минералов. Облик кристаллов чаще всего изометрический, реже таблитчатый. Самородное золото и Au-Ag сплавы сопровождают все ассоциации МПП, образуя самостоятельные зерна или находясь в сростаниях с силикатами, сульфидами и теллуридами Pd и Pt. В отдельную группу можно отнести минералы Bi, сопровождающие благороднометалльную минерализацию.

Наиболее распространенными среди изученной ассоциации минералов благородных металлов

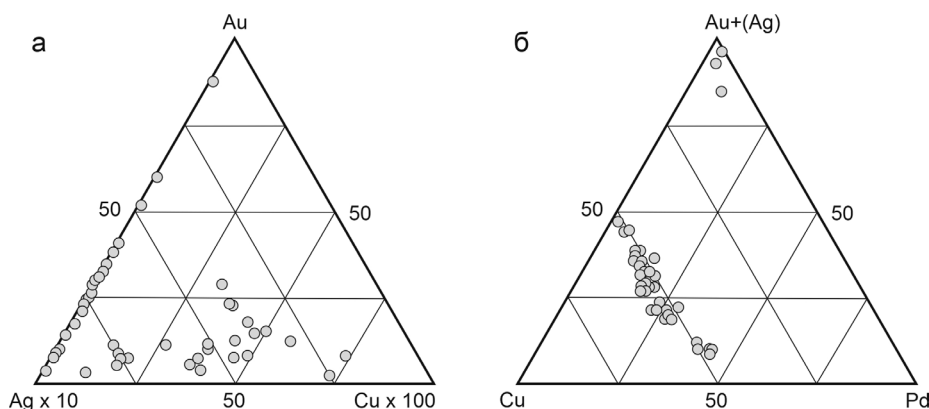


Рис. 4. Состав медистых (а) и палладистых (б) сплавов золота из габбро Кумбинского массива.

Fig. 4. Composition of Cu (a) and Pd (b) gold alloys from gabbro of the Kumba intrusive.

являются минералы Au. Химический состав Au-Ag сплавов непостоянный, содержание Ag в минералах варьирует в широких пределах (рис. 4), часто присутствуют Cu и Pd. Содержание Cu в самородном золоте может составлять первые атомные проценты. Относительно широко распространено самородное золото с примесью Pd (до 43 ат. % и выше), образуя Cu-Pd-Au сплав с формулой наиболее близкой к Cu_2PdAu (табл. 1). Медистое и палладистое золото обычно встречается в халькопирит-борнитовой и реже в дигенит-борнитовой ассоциации. Такое золото может образовывать как самостоятельные зерна, так и находиться в сростании с минералами Pd, а также сростаться с сульфидами Cu. Самородное золото без изоморфных примесей встречается в этих ассоциациях редко. Для пирит-халькопиритовой ассоциации характерно самородное золото без примеси Cu и Pd.

Арсенидо-антимониды и арсениды Pd и Pt широко распространены. Арсенопалладинит $Pd_8(As,Sb)_3$ встречается во всех типах руд. Минерал образует зональные почковидные зернистые агрегаты размером до 75 мкм. Зональность в нем обусловлена неравномерным распределением Pd, As, и Sb (табл. 2). В арсенопалладините иногда отмечается примесь Cu до 4 ат. %. Изомертиит $Pd_{11}Sb_2As_2$ является основным благороднометалльным минералом в дигенит-борнитовых рудах. Для минерала характерна постоянная примесь Cu до 3 ат. %. Сперрилит $PtAs_2$ развивается по трещинам в изомертиите и по периферии зерен других минералов благородных металлов. Для сперрилита характерна примесь Cu и Fe, суммарно составляющая не более 3 ат. %. В этих же рудах обнаружены единичные зерна атокиита Pd_3Sn , местами с примесью Te до 3 ат. %.

Теллуриды и висмутотеллуриды Pd и Ag встречаются реже. Меренскиит $PdTe_2$ и гессит Ag_2Te встречаются в сульфидах Cu в виде рассеянных включений размером менее 50 мкм. Для меренскиита иногда отмечается примесь Pt, содержание которой достигает первых ат. %. Котульскит $PdTe$, как правило, образует крупные зерна до 150 мкм, встречается в сростках с сульфидами Cu и Au-Ag сплавами, постоянно содержит изоморфную примесь Bi.

Для различных типов минерализации в габброидах Кумбинского массива характерны ассоциации благородных металлов, обладающие набором специфических особенностей. Например, для ассоциации благородных металлов, связанных с халькопирит-борнитовыми рудами в такситовых габбро г. Большая Брусковая, характерно преобладание самородного золота, Au-Ag сплавов и арсенопалладинита. Отдельные зерна самородного золота имеют размер до 50 мкм (рис. 5а). Почти все Au-Ag сплавы обнаружены в сростании с сульфидами Cu (рис. 5б-д). Менее распространенным является арсенопалладинит, встречающийся в виде единичных ксеноморфных зерен на периферии зерен борнита (рис. 5е) и в виде единичных зерен размером до 50 мкм со сложным пористым строением (рис. 5ж). Меренскиит распространен в подчиненном количестве и образует изометричные зерна размером до 50 мкм в сростании с борнитом (рис. 5з). Часто минерал огранен или имеет округлые границы на контакте с борнитом (рис. 5з). Гессит рассеян в зернах медно-сульфидных минералов, размер его зерен редко превышает первые десятки микрометров.

В дигенит-борнитовых рудных габбро г. Большая Брусковая среди минералов благородных металлов преобладают изомертиит, сперрилит и арсенопалладинит, встречаются единичные зерна атокиита.

Таблица 1

Состав сплавов золота из габброидов Кумбинского массива

Table 1

Composition of gold alloys from gabbroids of the Kumba intrusive

№	мас. %					ат. %			
	Cu	Ag	Pd	Au	Сумма	Cu	Ag	Pd	Au
1	31.4	1.6	47.4	16.3	96.6	47.6	1.4	43.0	8.0
2	33.1	—	45.3	19.3	97.8	49.8	—	40.8	9.4
3	1.3	3.0	1.8	91.6	97.6	3.7	5.2	3.2	87.9
4	25.5	—	1.4	73.1	100.0	51.1	—	1.7	47.2
5	—	0.6	—	99.3	99.9	—	1.1	—	98.9
6	—	10.9	—	89.8	100.6	—	18.1	—	81.9
7	—	13.0	—	86.8	99.8	—	21.5	—	78.5
8	—	15.2	—	84.7	99.8	—	24.6	—	75.4
9	—	17.2	—	82.2	99.4	—	27.7	—	72.3
10	—	18.9	—	78.0	96.9	—	30.7	—	69.3
11	—	22.1	—	76.9	99.0	—	34.4	—	65.6
12	1.3	34.5	—	63.2	99.0	3.0	48.4	—	48.6
13	5.8	33.6	—	59.7	99.2	13.0	44.1	—	42.9
14	0.7	10.4	—	88.5	99.6	2.1	17.3	—	80.6
15	0.5	40.4	—	58.1	99.0	1.2	55.2	—	43.5
16	1.7	42.4	—	55.5	99.6	3.9	56.0	—	40.1

Таблица 2

Состав минералов благородных металлов из габброидов Кумбинского массива (мас. %)

Table 2

Composition of noble metal minerals from gabbroids of the Kumba intrusive (wt. %)

Минерал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Asp	Asp	Asp	Asp	Ism	Spr	Kt	Mer	Hes	Atk
Cu	—	—	2.5	2.4	1.1	—	—	—	—	—
As	10.1	9.8	9.3	9.7	9.3	44.8	—	—	—	—
Pd	73.1	73.7	73.2	71.0	73.9	—	41.3	29.5	—	51.9
Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	62.8	—
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23.6
Sb	16.5	16.5	15.0	14.7	15.9	—	—	—	—	—
Te	—	—	—	—	—	—	36.5	69.3	37.3	—
Pt	—	—	—	—	—	55.2	—	—	—	22.7
Bi	—	—	—	—	—	—	21.9	—	—	—
Сумма	99.7	100.0	100.0	97.7	100.2	100.0	99.7	98.8	100.1	98.2
1	Pd _{7.90} (As _{1.55} Sb _{1.55}) _{3.10}									
2	Pd _{7.95} (As _{1.49} Sb _{1.56}) _{3.05}									
3	(Pd _{7.77} Cu _{0.44}) _{8.21} (As _{1.40} Sb _{1.39}) _{2.79}									
4	(Pd _{7.69} Cu _{0.43}) _{8.12} (As _{1.49} Sb _{1.39}) _{2.88}									
5	(Pd _{10.78} Cu _{0.27}) _{11.05} Sb _{2.03} As _{1.92}									
6	Pt _{0.96} As _{2.04}									
7	Pd _{1.00} (Te _{0.73} Bi _{0.27}) _{1.00}									
8	Pd _{1.01} Te _{1.99}									
9	Ag _{2.00} Te _{1.00}									
10	(Pd _{2.43} Pt _{0.58}) _{3.01} Sn _{0.99}									

Примечание. Формулы рассчитаны на сумму формульных коэффициентов в стехиометрической формуле. Asp – арсенопалладинит, Atk – атоцит, Au – самородное золото, Au, Ag – золотосеребряные сплавы, Hes – гессит, Ism – изомерптит, Kt – котульскит, Mer – меренскийит, Spr – сперрилит.

Note. Formulas are recalculated to sum of formula coefficients in stoichiometric formulas. Asp – arsenopalladinite, Atk – atokite, Au – native gold, Au, Ag – Au-Ag alloys, Hes – hessite, Ism – isomertieite, Kt – kotulskite, Mer – merenskyite, Spr – sperrylite.

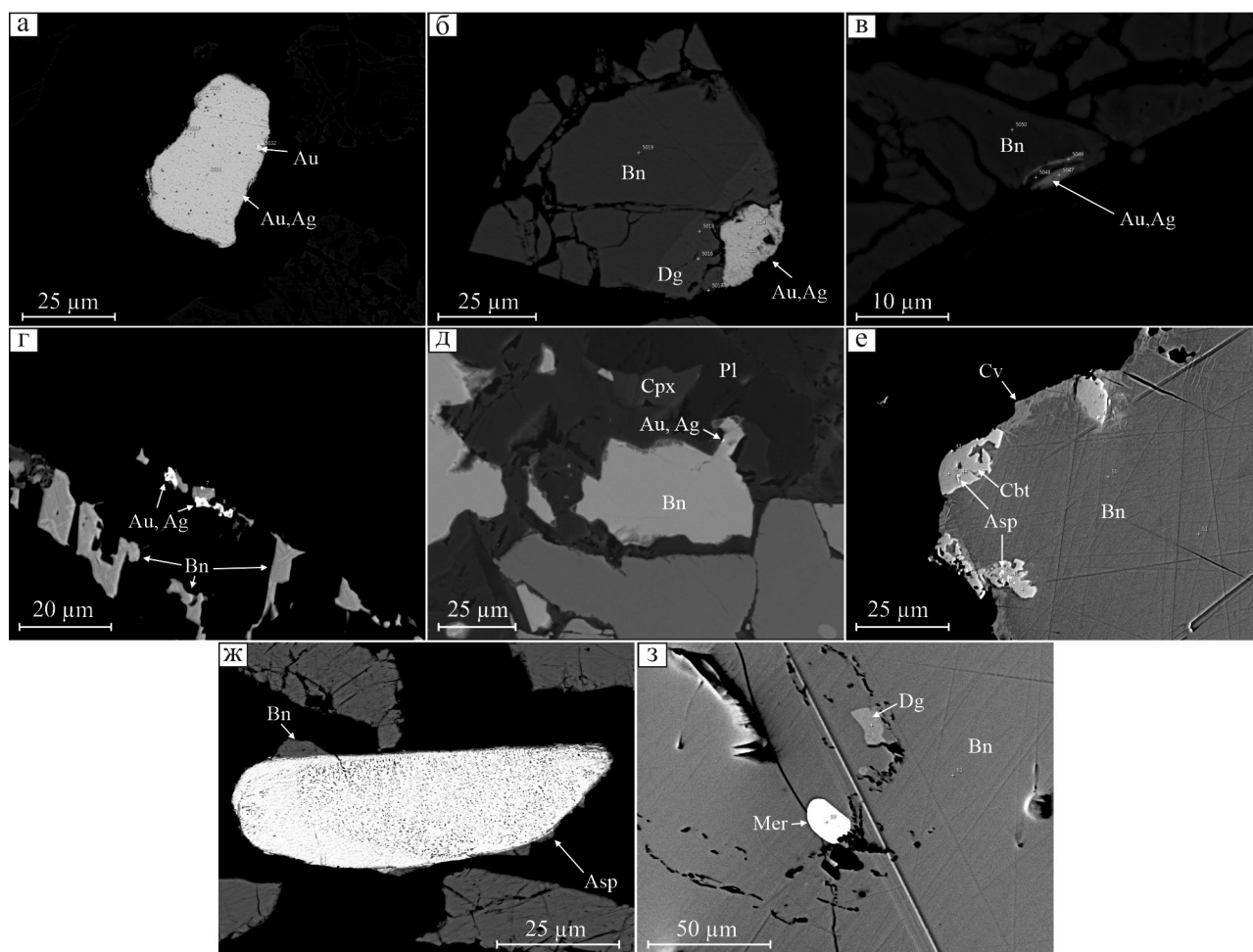


Рис. 5. Минералы благородных металлов в такситовых габбро г. Большая Брусковая (пояснения в тексте).

Здесь и далее: Asp – арсенопалладинит, Au – самородное золото, Au, Ag – золотосеребряные сплавы, Cbt – кобальтин, Cpx – клинопироксен, Mer – меренскиит, Pl – плагиоклаз.

Fig. 5. Noble metal minerals in taxitic gabbro of Mt. Bolshaya Bruskovaya (see text for explanations).

Hereinafter: Asp – arsenopalladinite, Au – native gold, Au, Ag – gold–silver alloys, Cbt – cobaltite, Cpx – clinopyroxene, Mer – merenskiite, Pl – plagioclase.

С ними ассоциирует висмутовая минерализация, среди которой установлены висмутин и цумоит.

Среди МПГ в этой ассоциации преобладает изомертиит. Он образует изометричные зерна, размером до 150 мкм, часто ассоциирует с самородным золотом и сперрилитом (рис. 6а-в). Изомертиит часто находится в сростании с золото-серебряными минералами, которые часто тяготеют к периферии зерен изомертиита (рис. 6а, б). Сперрилит развивается по трещинам в изомертиите (рис. 6а) или по периферии его зерен (рис. 6в). Атоцит в виде единичных зерен размером до 50 мкм (рис. 6д) рассеян в сульфидах Cu. Среди минералов Bi, ассоциирующих с благороднометалльной минерализацией, преобладает висмутин $\text{Bi}_{2.00}\text{S}_{3.00}$. Встречены единичные сростания висмутина с цумоитом $\text{Bi}_{1.00}\text{Te}_{1.00}$

и сульфовисмутитами свинца по составу наиболее близкими к канницариту $\text{Pb}_{8.51}\text{Bi}_{10.00}\text{S}_{22.49}$ (рис. 6е).

В габбро на территории г. Золотой Камень, характеризующихся широким распространением пирит-халькопиритовой минерализации, относительно широко распространены минералы золота. Реже встречаются котульскит, изомертиит, арсенопалладинит и сперрилит. Благороднометалльная ассоциация сопровождается антимонитом, самородным висмутом и бисмоклитом. В этой ассоциации золотосеребряные сплавы встречены в виде крупных пластинчатых зерен (рис. 7а-г). Зерна этих минералов часто содержат в себе включения клинопироксена (рис. 7а), гетита (рис. 7а), а также котульскита (рис. 7в), изомертиита и арсенопалладинита (рис. 7г, д). Среди арсенидов палладия и платины

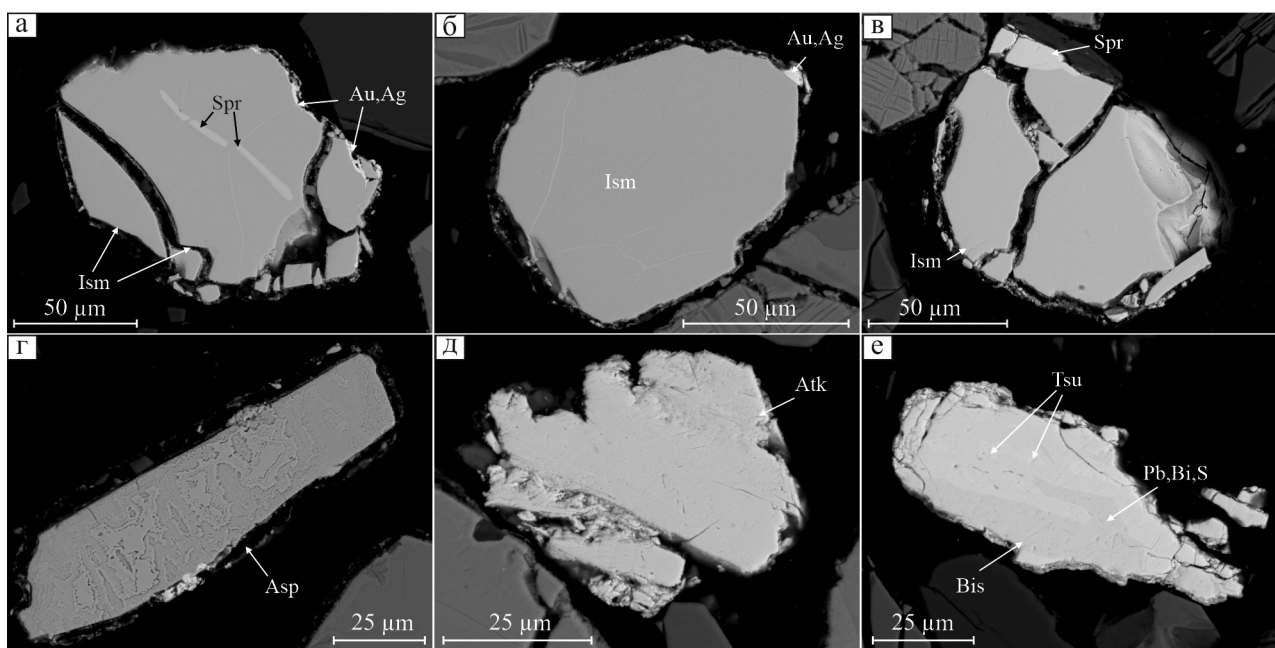


Рис. 6. Минералы благородных металлов в оливиновых габбро г. Большая Брусковая (пояснения в тексте).

Atk – атоцит, Bis – висмутин, Ism – изомертиит, Pb,Bi,S – сульфовисмутит свинца, Spr – сперрилит, Tsu – цумоит.

Fig. 6. Noble metal minerals in amphibole-olivine gabbro of Mt. Bolshaya Bruskovaya (see text for explanations).

Atk – atokite, Bis – bismuthinite, Ism – isomertieite, Pb,Bi,S – Pb sulfobismuthite, Spr – sperrylite, Tsu – tsumoite.

в пирит-халькопиритовых рудах г. Золотой Камень обнаружены арсенопалладинит и сперрилит. Арсенопалладинит образует крупные зональные агрегаты (рис. 7е), сростается с минералами благородно-металлической ассоциации (рис. 7г), реже встречается в виде включений в золоте (рис. 7д). Сперрилит встречен в виде единичных зерен, размером около 50 мкм (рис. 7ж). В рудных концентратах наряду с МПГ и самородным золотом обнаружен антимонит Sb_2S_3 (рис. 7з) и минералы Bi (рис. 7и). Среди них обнаружен сросток самородного висмута с бисмоклитом $BiOCl$, заварицкитом $(BiO)F$ и баксанитом $Bi_{6,00}Te_{1,90}S_{3,10}$. Эти минералы Bi чаще всего развиты на периферии зерен самородного висмута (рис. 7и).

Обсуждение результатов

Ассоциация минералов благородных металлов в габбро Кумбинского массива, обогащенных сульфидами Cu, по многим характеристикам аналогична ранее описанным минеральным ассоциациям в габброидах зональных дунит-клинопироксенит-габбровых массивов (Золоев и др., 2001; Zaccarini et al., 2004; Аникина, Алексеев, 2010 и др.). Исходя из особенностей распределения минералов благородных металлов, габбро Кумбинского массива наиболее близки вкрапленным рудам Баронского

рудопоявления и габброидам Волковского массива. В Баронском рудопоявлении в ассоциации минералов благородных металлов установлены сульфиды, теллуриды, сульфоселениды, арсениды, арсенидо-антимониды и арсенотеллуриды Pd, сульфиды и арсениды Pt, самородное золото и серебро – всего 28 минералов и их разновидностей (Золоев и др., 2001; Zaccarini et al., 2004; Аникина, Алексеев, 2010). Широкий набор минералов благородных металлов, близкий к ассоциации в габброидах Кумбинского массива, описан вместе с сульфидной медной минерализацией в амфиболовых габбро Серебрянского камня (Михайлов и др., 2021а).

Аналогичные примеры проявления благородно-металлической минерализации в габбро зональных массивов установлены и за пределами ППУ, например, в клинопироксенитах и габбро зональных комплексов урало-аляскинского типа в Северной Америке (массив Солт Чак – Аляска и Турнагиан в Британской Колумбии) и в массиве Восточная пустыня, расположенном в Египте (O'Driscoll, González-Jiménez, 2016). Аналогичный медно-благороднометаллический тип оруденения выявлен в горнблендитах и клинопироксенитах Чемпионской площади, расположенной в западной части массива Туламин (Nixon et al., 2020), где минералы благородных металлов связаны с халькопирит-борнит-

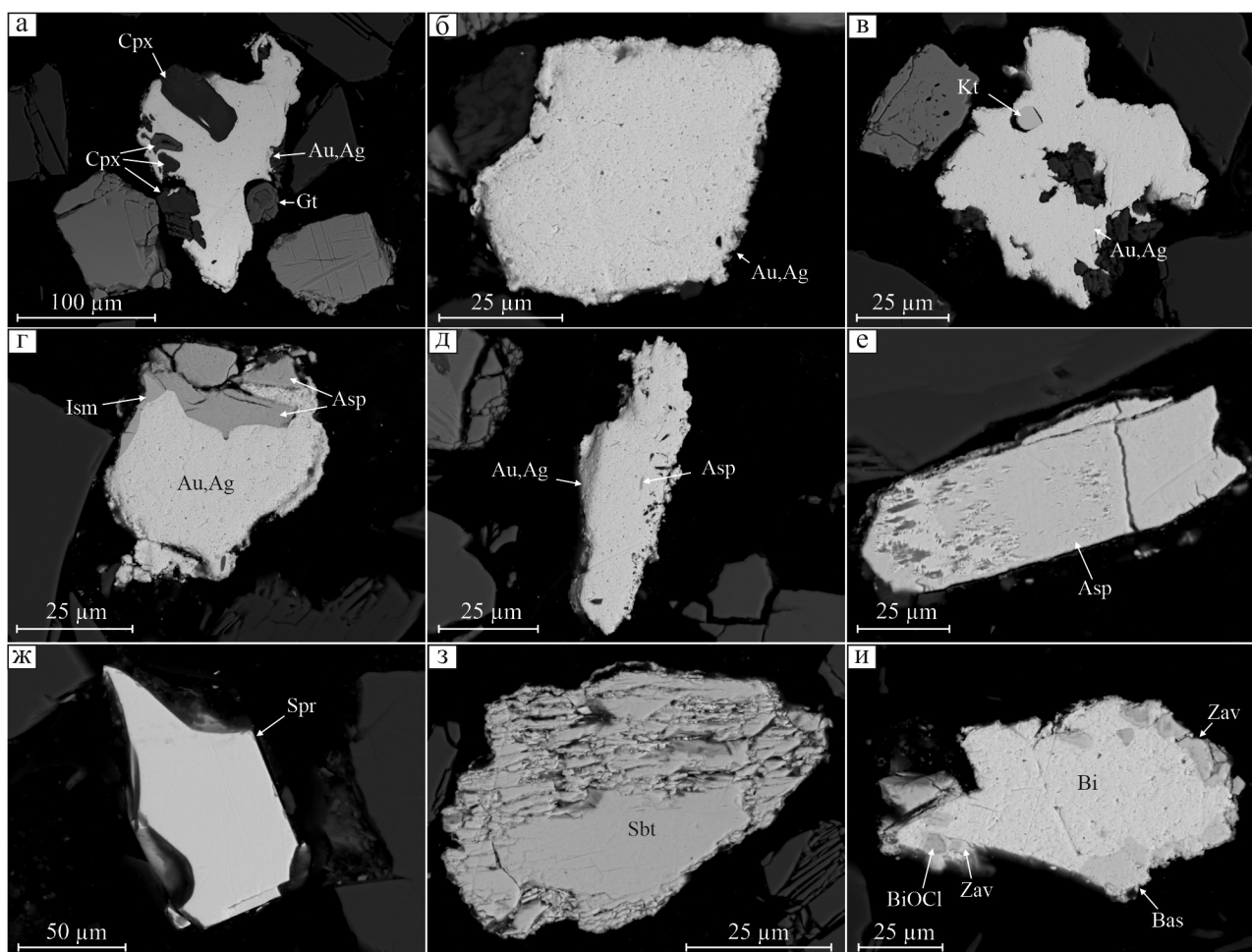


Рис. 7. Минералы благородных металлов в амфиболовом габбро г. Золотой Камень (пояснения в тексте).

Bas – баксанит, Bi – самородный висмут, BiOCl – бисмоклит, Kt – котульскит, Sbt – стибнит, Zav – заварицкит.

Fig. 6. Noble metal minerals in amphibole gabbro of Mt. Zolotoy Stone (see text for explanations).

Bas – baksanite, Bi – native bismuth, BiOCl – bismoclite, Kt – kotulskite, Sbt – stibnite, Zav – zavaritskite.

пиритовой минерализацией в магнетит-амфиболовых клинопироксенитах и оливиновых габбро. В ассоциации минералов из клинопироксенитов Туламинского массива установлены сперрелит, изомертиит, а также неназванные фазы состава Pd-Te-Sb.

Вопрос о природе медно-благороднометалльной минерализации в связи с габбро массивов урало-аляскинского типа в последнее время широко обсуждается. Необходимо отметить, что генезис самих габбро, вмещающих оруденение, также является предметом дискуссии. В настоящее время с наибольшей степенью детальности разработаны две петрологические модели формирования габброидов. В рамках одной из них определяющую роль в формировании амфиболовых габброидов отводят метаморфическим процессам (Ефимов, Ефимова, 1967). Другая геолого-генетическая модель предпо-

лагает образование и эволюцию габброидов, в том числе с образованием медно-благороднометалльного оруденения, в ходе магматических и позднемагматических процессов (Кашин, 1941; Полтавец и др., 2011; Михайлов и др., 2021a). Закономерности геологического строения Кумбинского массива (Свешникова, 1961), а также результаты минералого-петрографических и геохимических исследований (Михайлов и др., 2021b) с наибольшей степенью вероятности указывают на ключевую роль магматогенных процессов в формировании медно-благороднометалльного оруденения в породах Кумбинского массива.

Модель образования медных сульфидов и концентрирование в них благородных металлов в породах ультрамафит-мафитовых ассоциаций в настоящее время наиболее детально разработана для массивов Туламин и Полярис в Британской Колум-

бии (Milidragovic et al., 2021). Для понимания генезиса медно-благороднометалльного оруденения в породах зональных массивов ключевыми являются несколько факторов. Первый из них – это установленные содержания S в примитивных островодужных базальтовых магмах, достигающие 2000 г/т (Bai et al., 2020). Второй – это нахождение S в расплавах преимущественно в сульфатной форме (Jugo, 2009). И третий, наиболее важный – это время начала кристаллизации магнетита в габбро, что приводит к изменению окислительно-восстановительных условий. Расплавы, из которых формируются магматические породы зональных массивов, являются окисленными (Milidragovic et al., 2021). Последовательная кристаллизация расплавов с образованием в начале ультраосновных, а затем основных пород сопровождается возрастанием фугитивности кислорода, что приводит к началу кристаллизации магнетита в рудных клинопироксенитах или габбро. Повсеместное зарождение и кристаллизация магнетита, выступающего в роли восстановителя, в расплавах основного состава приводит к локальному снижению фугитивности кислорода и возникновению восстановительных условий (Milidragovic et al., 2021), что приводит в том числе к восстановлению серы из сульфатной формы в сульфидную с обособлением сульфидного расплава. Этот сульфидный расплав насыщается благородными металлами – прежде всего Pd и Au, в меньшей степени Pt. Последующий процесс кристаллизации сульфидных расплавов приводит к образованию медно-благороднометалльного оруденения в габброидах. При этом формирование дигенита, борнита или халькопирит-борнитовых агрегатов объясняется дефицитом железа в минералообразующей среде вследствие кристаллизации магнетита (Jenner et al., 2010) ранее или совместно с сульфидами.

Совокупность полученных результатов, а также анализ данных предшественников позволяют предположить, что МПГ в габбровых массивах Платиноносного пояса Урала распределяются зонально. Установлено, что Кумбинский массив в незначительной мере подвержен эрозии и сохранил первичную структуру магматического тела (Свешникова, 1961). Выявленные в результате исследований минерализованные зоны локализованы в апикальных частях Кумбинского массива. В этих зонах в различных сульфидных парагенезисах из числа МПГ преобладают ар-

Таблица 3
Table 3Распространенность минералов благородных металлов в габброидах Платиноносного Пояса Урала
Distribution of minerals of the noble metals in gabbroids of the Platinum belt of the Urals

Минерал	Теоретическая формула	Кумбинский массив				Рудопоявление Серебрянский Камень (Михайлов и др., 2021a)	Баронское рудопоявление (Аникина, Алексеев, 2010)		Волковское месторождение (Мурзин и др., 2021)
		Борнит-халькопиритовые руды	Дигенит-борнитовые руды	Пирит-халькопиритовые руды			Сульфидная ассоциация	Арсенидо-антимонидная ассоциация	
Самородное золото	Au	++	+	++	++	++	+	+	++
Au-Ag сплавы	(Au,Ag)	++	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Высоцит	(Pd,Ni)S					+	+	+	+++
Меренский	PdTe ₂	++	++			++	++	++	++
Гессит	Ag ₂ Te	++	++			+	++	++	+
Кейтконнит	Pd ₂₀ Te ₇					++	++	++	
Котульский	Pd(Te,Bi) ₂					++	++	++	
Арсенопалладинит	Pd ₈ (As,Sb) ₃	+++	++			+	++	++	
Изомертрит	Pd ₁₁ Sb ₂ As ₂	+	++	++	++	+	++	++	
Сперрит	PtAs ₂	+	+	+	+	+	+	+	+
Атокит	Pd ₃ Sn	+	+	+	+	+	+	+	+
Минералы Bi						+			

Примечание. Минералы: +++ – главные, ++ – второстепенные, + – редкие.
Note. Minerals: +++ – major, ++ – abundant, + – rare.

сено-антимонидные соединения. Эта особенность отличает минерализованные зоны Кумбинского массива от подобных зон, выявленных ранее в габбро Волковского массива и массива Серебрянского камня. Описанные нами ассоциации минералов благородных металлов Кумбинского массива наиболее близки к поздним, низкотемпературным парагенезисам Баронского рудопоявления (табл. 3) (Золоев и др., 2001; Zaccarini et al., 2004; Аникина, Алексеев, 2010). Выявленные особенности позволяют сделать предположение о проявлении рудной или минералогической зональности в пределах габбровых интрузивов и о многостадийном процессе становления ассоциаций минералов благородных металлов в габброидах зональных массивов.

Заключение

В результате исследований впервые охарактеризованы структурно-вещественные признаки благороднометалльной минерализации в габбро Кумбинского массива. Повышенные содержания благородных металлов связаны с медно-сульфидной минерализацией, пространственно сопряженной с зонами проявления такситовых текстур в габброидах.

Впервые для габброидов Кумбинского массива описано девять минералов Pd, Au и Ag, включая самородное золото и его сплавы, теллуриды Ag и Pd (гессит, меренскиит), а также висмутотеллуриды (котульскит), антимонидоарсениды (изомертиит), арсениды (арсенопалладинит, сперрилит) и станиды (атокит) Pt и Pd. Ассоциация благородных металлов в габбро Кумбинского массива наиболее близка к поздним низкотемпературным арсенидо-антимонидным парагенезисам Баронского рудопоявления.

Обнаружение медно-благороднометалльной минерализации в породах Кумбинского массива позволяет говорить о его высоком рудном потенциале. Наряду с Волковским месторождением и Баронским рудопоявлением за последние несколько лет медно-благороднометалльное оруденение было выявлено в габбро, по меньшей мере, еще двух габбровых интрузивов, что позволяет говорить о широком распространении вкрапленных сульфидных медных руд, обогащенных благородными металлами, в мафитах зональных массивов урало-аляскинского типа.

Авторы выражают глубокую признательность рецензенту статьи д.г.-м.н. Н.Д. Толстых. Ее кон-

структивные замечания во многом позволили улучшить текст рукописи.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ № 20-77-00073.

Литература

Аникина Е.В., Алексеев А.В. (2010) Минерало-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала). *Литосфера*, 5, 75–100.

Бобров В.И. (1978) Отчет о результатах комплексных поисковых работ на медно-титаномагнититовые и титаномагнетитовые руды в районе Серебрянского камня. Уральское территориальное геологическое управление, I, 111 с.

Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Иванов К.С., Неустроева И.И. (2007) Платиноносный и Палладиеносный пояса Урала: петрологические и рудогенетические следствия. Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей. Международная конференция. Иркутск: Институт геохимии СО РАН, 361–367.

Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Нестерова С.И. (2009) Сравнительная характеристика платиноносности ферроклинопироксенитовых комплексов Уральского подвижного пояса. *Ежегодник-2008*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 209–216.

Высоцкий Н.К. (1913) Месторождения платины Исовского и Нижне-Тагильского районов на Урале. *Труды Геологического комитета. Новая серия № 62*. Санкт-Петербург, 692 с.

Ефимов А.А., Ефимова Л.П. (1967) Кытлымский платиноносный массив. М., Недра, 336 с.

Золоев К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Малахов И.А., Мардиросьян А.Н., Хрыпов В.Н. (2001) Платинометалльное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург, ДПР по Уральскому округу, ОАО УГЭС, ИГГ УрО РАН, УГГГА, 199 с.

Иванов О.К. (1997) Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала: Минералогия, петрология, генезис. Екатеринбург, Уральский университет, 488 с.

Кашин С.А. (1941) Проблема медных вкрапленных руд на Урале, связанных с габброидами. *Советская геология*, (2), 63–68.

Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Козлов А.В., Петров С.В., Паламарчук Р.С., Шиловских В.В., Абрамова В.Д., Корнеев А.В. (2021a) Новое медно-благороднометалльное рудопоявление в габбро массива Серебрянского Камня, Платиноносный пояс Урала (Северный Урал). *Геология рудных месторождений*, 63(6), 520–550.

Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С. (2021b) Петрохимические особенности и гео-

динамическая интерпретация условий образования габброидов Кумбинского массива, Северный Урал. *Новое в познании процессов рудообразования: Десятая Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием*. Москва: ИГЕМ РАН, 191–194.

Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Молошаг В.П. (2021) Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, **21**(5), 653–659.

Петров Г.А., Ильясова Г.А., Тристан Н.И. и др. (2008) Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист Р-40-XXXVI (Североуральск). Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 124 л.

Полтавец Ю.А., Полтавец З.И., Нечкин Г.С. (2011) Волковское месторождение титаномagnetитовых и медно-титаномagnetитовых руд с сопутствующей благороднометалльной минерализацией (Средний Урал, Россия). *Геология рудных месторождений*, **53**(2), 143–157.

Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 280 с.

Свешникова Е.В. (1961) Структура Кумбинского габброидного массива Северный Урал. *Труды ИГЕМ*, **41**, 49–66.

Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург, РИО УрО РАН, 368 с.

Bai Z.J., Zhong H., Hu R.Z., Zhu W.G. (2020) Early sulfide saturation in arc volcanic rocks of southeast China: Implications for the formation of co-magmatic porphyry-epithermal Cu–Au deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **280**, 66–84.

Jenner F.E., O'Neill H.C., Arculus R.J., Mavrogenes J.A. (2010), The magnetite crisis in the evolution of arc-related magmas and the initial concentration of Au, Ag, and Cu. *Journal of Petrology*, **51**(12), 2445–2464.

Jugo P.J. (2009) Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas. *Geology*, **37**, 415–418.

Milidragovic D., Nixon G.T., Scoates J.S., Nott J.A., Spence D.W. (2021) Redox-controlled chalcophile element geochemistry of the Polaris alaskan-type mafic-ultramafic complex, British Columbia, Canada. *The Canadian Mineralogist*, **59**, 1627–1661.

Nixon G.T., Manor M.J., Scoates J.S. (2018) Cu-PGE-sulphide mineralization in the Tulameen Alaskan type complex: analogue for Cu-PGE reefs in layered complexes? Br Columbia. *Geological Survey Geofile*. P. 2.

Nixon G.T., Scoates J.S., Milidragovic D., Nott J.A., Moerhuis N., Ver Hoeve T.J., Manor M.J., Kjarsgaard I.M. (2020) Convergent margin Ni-Cu-PGE-Cr ore systems: U-Pb petrochronology and environments of Cu-

PGE vs Cr-PGE mineralization in Alaskan type intrusions. *Geological Survey of Canada, Open File*, **8722**, 197–218.

O'Driscoll B., González-Jiménez J. M. (2016) Petrogenesis of the platinum-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **81**(1), 489–578.

Zaccarini F., Anikina E. V., Pushkarev E. V., Rusin I., Garuti G. (2004) Palladium and gold minerals from the Baronskoe-Kluevsky ore deposit (Volkovsky complex, Central Urals, Russia). *Mineralogy and Petrology*, **82**, 137–156.

References

Anikina E.V., Alekseev A.V. (2010) [Mineralogical-geochemical characteristic of Au-Pd mineralization of the Volkovsky gabbro intrusive (Pt-bearing Uralian belt)]. *Litosfera [Lithosphere]*, **5**, 75–100. (in Russian)

Bai Z.J., Zhong H., Hu R.Z., Zhu W.G. (2020) Early sulfide saturation in arc volcanic rocks of southeast China: Implications for the formation of co-magmatic porphyry-epithermal Cu–Au deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **280**, 66–84.

Bobrov V.I. (1978) [Report on the results of complex prospecting works for copper-titanium-magnetite and titanomagnetite ores in area of Serebryansky Kamen]. Ural'skoe territorialnoe geologicheskoe upravlenie, I, 111 p. (in Russian)

Efimov A.A., Efimova L.P. (1967) [Kytlym Pt-bearing massif]. Moscow, Nedra, 336 p. (in Russian)

Fershtater G.B. (2013) [Paleozoic intrusive magmatism of Central and South Urals]. Yekaterinburg, RIO UrO RAN, 368 p. (in Russian)

Ivanov O.K. (1997) [Concentric-zonal pyroxenite-dunite massifs of the Urals: Mineralogy, petrology, genesis]. Yekaterinburg, Uralsky universitet, 488 p. (in Russian)

Jenner F.E., O'Neill H.C., Arculus R.J., Mavrogenes J.A. (2010), The magnetite crisis in the evolution of arc-related magmas and the initial concentration of Au, Ag, and Cu. *Journal of Petrology*, **51**(12), 2445–2464.

Jugo P.J. (2009) Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas. *Geology*, **37**, 415–418.

Kashin S.A. (1941) [Problem of disseminated copper ores associated with gabbroids of the Urals]. *Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]*, (2), 63–68. (in Russian)

Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Kozlov A.V., Petrov S.V., Palamarchuk R.S., Shilovskikh V.V., Abramova V.D., Korneev A.V. (2021a) New copper-precious metal occurrence in gabbro of the Serebryansky Kamen massif, Ural Platinum Belt, Northern Urals. *Geology of Ore Deposits*, **63**(6), 528–555.

Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S. (2021b) [Petrochemical features and geodynamic interpretation of formation conditions of gabbroids of the Kumba intrusive, Northern Urals]. *Novoye v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: Desyataya Rossiyskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya shkola s*

mezhdunarodnym uchastiyem [New in the knowledge of ore formation processes: The Tenth Russian Youth Scientific and Practical School with International Participation]. Moscow, IGM RAN, 191–194.

Milidragovic D., Nixon G.T., Scoates J.S., Nott J.A., Spence D.W. (2021) Redox-controlled chalcophile element geochemistry of the Polaris alaskan-type mafic-ultramafic complex, British Columbia, Canada. *The Canadian Mineralogist*, **59**, 1627–1661.

Murzin V.V., Palyanova G.A., Anikina E.V., Moloshag V.P. (2021) [Mineralogy of precious metals (Au, Ag, Pd, Pt) of the Volkovskoe Cu-Fe-Ti-V deposit (Central Urals)]. *Litosfera [Lithosphere]*, **5**, 653–659. (in Russian)

Nixon G.T., Manor M.J., Scoates J.S. (2018) Cu-PGE-sulphide mineralization in the Tulameen Alaskan type complex: analogue for Cu-PGE reefs in layered complexes? Br Columbia. *Geological Survey Geofile*. P. 2.

Nixon G.T., Scoates J.S., Milidragovic D., Nott J.A., Moerhuis N., Ver Hoeve T.J., Manor M.J., Kjarsgaard I.M. (2020) Convergent margin Ni-Cu-PGE-Cr ore systems: U-Pb petrochronology and environments of Cu-PGE vs Cr-PGE mineralization in Alaskan type intrusions. *Geological Survey of Canada, Open File*, **8722**, 197–218.

O'Driscoll B., González-Jiménez J.M. (2016) Petrogenesis of the platinum-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **81**(1), 489–578.

Petrov G.A., Ilyasova G.A., Tristan N.I. et al. (2008) [Explanatory note. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. Sredneural'skaya series. Sheet P-40-XXXVI (Severouralsk)]. St. Petersburg, VSEGEI, 124 p. (in Russian)

Poltavets Yu.A., Poltavets Z.I., Nechkin G.S. (2011) [Volkovsky deposit of titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores with accompanying noble-metal mineralization the Central Urals, Russia]. *Geology of Ore Deposits*, **53**, 126–139.

Puchkov V.N. (2010) [Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, DesignPolygraphService, 280 p. (in Russian)

Sveshnikova E.V. (1961) [Structure of the Kumba gabbroid intrusive, Northern Urals]. *Trudy IGM [Proceedings of IGM]*, **41**, 49–66. (in Russian)

Volchenko Yu.A., Koroteev V.A., Ivanov K.S., Neustroeva I.I. (2007) [Pt- and Pd-bearing belts of the Urals: petrological and ore genetic consequences]. *Ultrabazit-bazitovye komplekсы skladchatykh oblastey. Mezhdunarodnaya konferentsiya. [Ultramafic-mafic complexes of folded areas. International Conference]*. Irkutsk, Institut geokhimii SO RAN, 361–367. (in Russian)

Volchenko Yu.A., Koroteev V.A., Nesterova S.I. (2009) [Comparative characteristics of Pt potential of ferroclinopyroxenite complexes of the Ural mobile belt]. *Ezhegodnik-2008 [Yearbook-2008]*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 209–216. (in Russian)

Vysotsky N.K. (1913) [Pt deposits of the Isovsky and Nizhny Tagil regions in the Urals]. *Trudy geologicheskogo komiteta. Novaya seriya № 62 [Proceedings of the Geological Committee. New series no. 62]*. St. Petersburg, 692 p. (in Russian)

Zaccarini F., Anikina E.V., Pushkarev E.V., Rusin I., Garuti G. (2004) Palladium and gold minerals from the Baronskoe-Kluevsky ore deposit (Volkovsky complex, Central Urals, Russia). *Mineralogy and Petrology*, **82**, 137–156.

Zoloev K.K., Volchenko Yu.A., Koroteev V.A., Malakhov I.A., Mardirosoyan A.N., Khrypov V.N. (2001) [Pt mineralization in geological complexes of the Urals]. Yekaterinburg, DPR po Uralskomu okrug, OAO UGSE, IGG UrO RAN, UGGGA, 199 p. (in Russian)