

УДК 553.3

К 140-летию А.Н. Заварицкого
и 100-летию организации им экспедиции
по поискам платиноидов на Полярном Урале

ПЛАТИНО-ПАЛЛАДИЕВОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ ВАСИЛИНОВСКОЕ – НОВЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ОФИОЛИТАХ ПОЛЯРНОГО УРАЛА. СООБЩЕНИЕ 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

©2024 г. И. В. Викентьев^{1, 2*}, Е. Э. Тюкова^{1, 3}, В. Д. Мокрый¹, Ю. Н. Иванова^{1, 2},
А. С. Шуйский⁴, И. Д. Соболев¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

²Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

³Научный геоинформационный центр РАН, ул. Новый Арбат, 11, стр.1, Москва, 119019 Россия

⁴Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН,
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

*E-mail: viken@igem.ru

Поступила в редакцию 18.06.2024 г.

После доработки 25.07.2024 г.

Принята к публикации 30.08.2024 г.

Приводится детальное описание нового благороднометалльного (Pt-Au-Pd) проявления Василюновское, обнаруженного вблизи пос. Харп Ямало-Ненецкого автономного округа. Оно связано с амфиболитизированными габброидами и клинопироксенитами. В этих породах развиты зоны наложенной минерализации видимой мощностью от 0.5 до 50 м (сульфидов 1–3 об.%, изредка более). В участках с рассеянной или мелко-гнездовой сульфидной вкрапленностью нередко присутствуют полевошпат-кварцевые, эпидотовые и другие прожилки. Сообщение 1 включает общегеологическую и подробную минералогическую характеристику рудопроявления, а также краткие сведения по валовой геохимии пород и руд объекта. В качестве рудных макрокомпонентов, часто встречающихся в валовых пробах минерализованных габбро-амфиболитов, наряду с Си, достигающей первых мас. %, отмечаются (мас. %) V до 0.2, Со до 0.06 и Ni до 0.02. По данным пробирного анализа, в валовых 0.5–1 кг пробах с сульфидной вкрапленностью содержания Pd достигают 1.4 г/т, Au – 0.8 г/т, а Pt – 0.2 г/т. Элементы платиновой группы в них представлены выделениями минералов палладия микронного размера – теллуридов (меренскиита, темагамита, котульскита, сопчеита), антимонидов (стибиопалладинита, садберрита) и арсеноантимонидов (мышьяковистый стибипалладинит, изомертиит), а также иных – мончеита, самородного осмия и нек. др. В магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации помимо них присутствуют микровключения самородных серебра, висмута и олова. В поздней полисульфидно-полевошпат-карбонатно-кварцевой ассоциации встречаются теллуриды Au и Ag, самородное золото (в том числе ртутистое), Se-содержащий аргентит, гринокит. В зонах сульфидной вкрапленности участка Подгорненский (в 1.5 км к югу), развитых в диоритах собского комплекса и тесно ассоциирующихся с кварцевыми прожилками, количество сульфидов выше, медный профиль минерализации усиливается, а концентрации Со, Ni, и особенно Ti, V, Pd и Pt падают. По результатам LA-ICP-MS анализа пирита, халькопирита, пирротина *Василюновского проявления*, преобладающей микропримесью для них является кобальт – до 1.2 мас. % Со в пирите ранней ассоциации. Примесь Ni также высокая (400–800 ppm, до 0.2 мас. %) в раннем пирите и снижается до 16–90 ppm в более позднем. Примесь Se, напротив, возрастает в пирите поздней ассоциации (до 207 ppm). В халькопирите характерные примеси – As и Se (~100–300 ppm). В отличие от Василюновского проявления, на участке *Подгорненский* в пирите постоянно присутствуют примеси Mo (вплоть до микровключений молибденита), Te (до 35 ppm), заметные примеси Tl (до 25 ppm) и Re (0.3 ppm). В халькопирите содержания (ppm): Ag до 65, Sn до 65, Cd до 35 и Bi до 11. Существенные примеси Со и Ni (до 0.1 мас. %) характерны здесь только для второстепенного пирротина. По минеральному составу и геохимическому спектру Pt-Au-Pd-Co ± Ni-Cu-V-Ti малосульфидная платиноидная минерализация Василюновского проявления довольно сильно контрастирует с зонами малосульфидной минерализации (+халцедоновидный кварц) со специализацией Fe-Cu-Au-Ag (±W, Bi, Sn, Mo, Re) участка Подгорненский,

которые, вероятно, принадлежат уже скарново-порфировой золотоносной системе. Сделан вывод о перспективах расширения контуров Pd-минерализации к западу и востоку, где в породах базит-ультрабазитовой ассоциации развиты ореолы Cu, Co и Ni, а также магнитные аномалии.

Ключевые слова: офиолиты, габбро-амфиболиты, малосульфидная минерализация, LA-ICP-MS, палладий, платина, золото, магматизм, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S0016777024060065, EDN: wdqlib

ВВЕДЕНИЕ

Важнейший вклад в исследование Полярного Урала внес академик А.Н. Заварицкий (1884–1952). Сто лет тому назад, в 1925 году, им была организована первая экспедиция по изучению платиноносности района горы Рай-Из. Начальником поисковой партии был его ученик, также будущий академик А.Г. Бетехтин. Была составлена первая геологическая карта массива, проведено детальное опробование слагающих его пород. Однако ожидаемых россыпных платиновых месторождений обнаружено не было, концентрации элементов платиновой группы (ЭПГ) в ультрабазитах и полученных из них протолок оказались мизерными.

Массив Рай-Из, как и ближайшие массивы Полярного Урала (Войкаро-Сыньинский, Сыум-Кеу), а также многие другие дунит-гарцбургитовые массивы Урала, входят в состав офиолитовых комплексов преимущественно ордовикского возраста (Пучков, 2010). Крупнейший из них – Кемпирсайский. Эти массивы *хромитоносны*, хотя хромититы и вмещающие их ультрабазиты содержат микронные, в основном, выделения минералов Os, Ir и Ru, а ЭПГ присутствуют в непромышленных концентрациях (Distler et al., 2008; Hu et al., 2022 и др.). Они отличаются от *платиноносных* концентрически-зональных дунит–клинопироксенитовых массивов Среднего и Северного Урала – Нижнетагильского, Вересовоборского, Светлоборского и др., которые слагаются ультрабазитами, а видимые выделения платиноидов с преобладанием платины здесь тяготеют к дунитам и, особенно, к мелким шлямбуркам хромита (Заварицкий, 1909; Бетехтин, 1935; Иванов, 1997; Пушкарев и др., 2007).

Упомянутые офиолитовые гипербазитовые массивы Рай-Из и Войкаро-Сыньинский тяготеют к осевой части Урала и окаймляются с востока полосой габбро и габбро-амфиболитов (Шишкин и др., 2007; Савельева и др., 2013; Шмелев, Мон, 2013). Восточнее расположены островодужные ордовикско-девонские

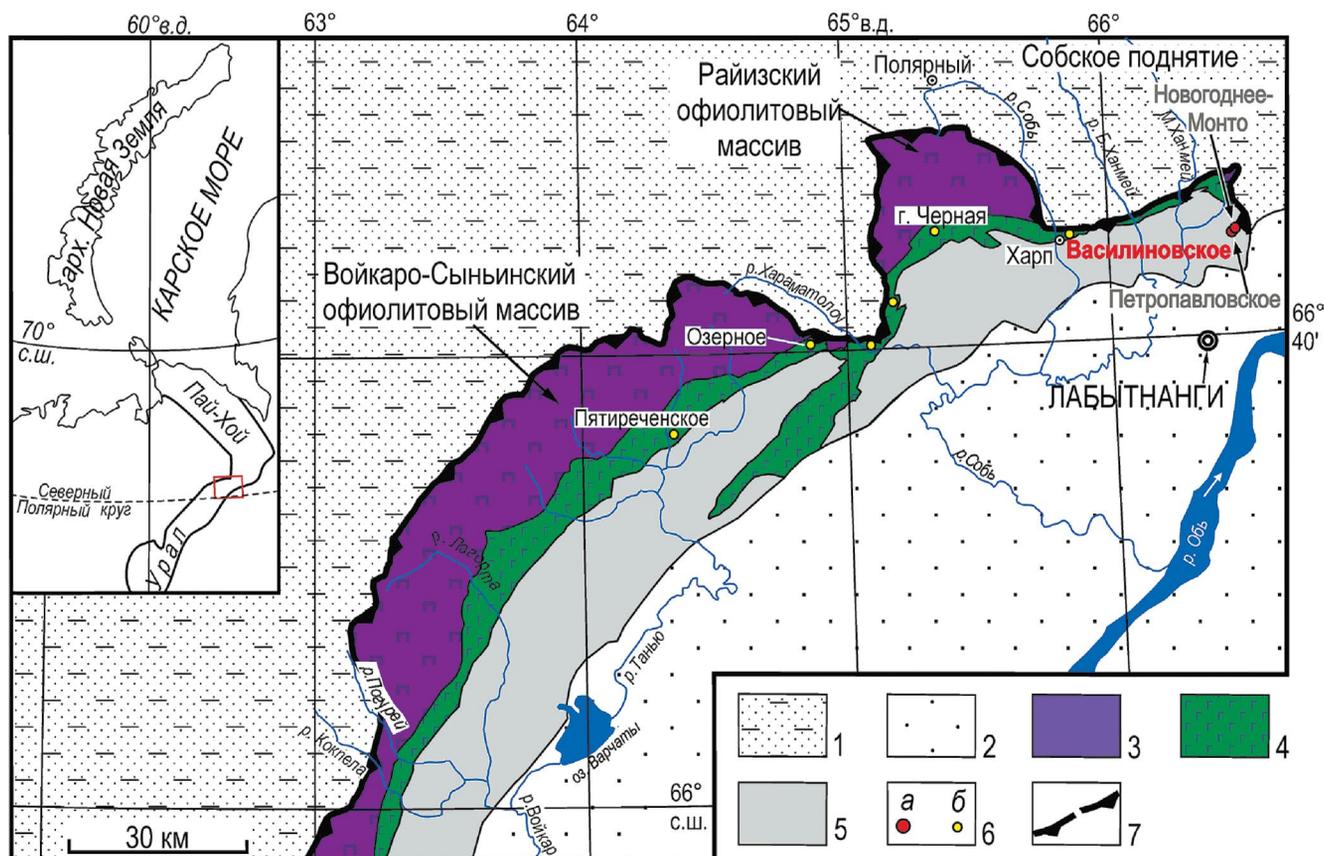
осадочно-вулканогенные комплексы и преимущественно девонские – плутонические, объединенные в Малоуральскую зону (Язева, Бочкарев, 1984). В пределах этой зоны выходят на поверхность вулканогенные толщи (O_3-D_2) с маломощными прослоями осадочных пород, прорванные интрузивами габбро-плагиогранитных островодужных серий – от габбро до гранитоидов, в основном относящихся к собскому и конгорскому комплексам (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014; Соболев и др., 2018).

Из металлических полезных ископаемых на Полярном Урале добываются лишь хромиты (месторождение Центральное на массиве Рай-Из). Идут доразведка нескольких других месторождений и оценка ряда проявлений хромитов (с небольшой попутной добычей). Хотя здесь – между $68^{\circ}30'$ и $65^{\circ}40'$ с.ш. – в результате геологической съемки, прогнозно-металлогенических и поисково-оценочных работ 1960–80-х гг. были выявлены единичные рудные объекты, являющиеся промышленными, и множество остающихся неоцененными (Основные ..., 2010; Андреев, 2021). Еще в советские годы (1990) было открыто Au-Fe-рудное месторождение Новогоднее Монто, а в 2002–2009 гг. проведена разведка этого и выявленного в ходе работ соседнего (0.6 км) крупного по масштабам золоторудного Петропавловского месторождения и оценка их флангов (Soloviev et al., 2012; Викентьев и др., 2017). В регионе известен ряд железо-скарновых объектов и множество рудопроявлений с золото-сульфидно-кварцевой, медно-титаномагнетитовой и колчеданной минерализацией, которые тесно связаны с этапом островодужного магматизма, но большинство их считается непромышленными. Таким образом, к настоящему времени в целом сложился взгляд на эту территорию как малоперспективную в отношении рудных полезных ископаемых (помимо хромитов и, под большим вопросом, золота).

В последние годы появились свидетельства в пользу высокой вероятности обнаружения

здесь значимых Pt-Pd рудных объектов. Амфиболитизированные габброиды и пироксениты (они в основном отнесены к кэршорскому комплексу) на восточном склоне Полярного Урала являются перспективными для локализации медно-благороднометалльной минерализации (Шишкин и др., 2007; Викентьев и др., 2023). Здесь описано проявление г. Черная в ЮЗ отрогах офиолитового массива Рай-Из (фиг. 1) – в титаномагнетитовых рудах содержания ЭПГ достигают 1.5 г/т. Далее к юго-западу от него установлена серия пунктов вкрапленной медной минерализации в габброидах кэршорского комплекса (Cu до 0.5%, по (Шишкин и др., 2007)) – вероятно, Fe-Ti-V-Pt-Pd-Au-Cu типа, во многом подобных Волковскому месторождению на Среднем Урале (Полтавец и др., 2006; Мурзин и др., 2021). Важнейшим является

расположенное далее к ЗЮЗ, на листе Q-41-XI – в междуречье рек Большая и Малая Хараматалоу – рудопроявление Озерное, открытое В.Г. Котельниковым в 2002 г. (Шишкин и др., 2007; Кузнецов и др., 2007; Пыстин и др., 2010, 2011; Murzin et al., 2022), платино–золото–палладиево–медного типа с $C_{Pd} = 0.1–1.66$ г/т (среднее 0.28 г/т) и $C_{Pt} = 0.04–0.26$ г/т. Оно разбурено по серии профилей, и его прогнозные ресурсы категории P_2 соответствуют параметрам крупного месторождения (Шишкин и др., 2007): Pd 54.7 т, Pt 9.8 т, Au 52.8 т. К этой же пограничной полосе между образованиями Малоуральской зоны и гипербазитовыми массивами (Рай-Из и Войкаро-Сыньинским) приурочено Пятиреченское и некоторые другие проявления благороднометалльной и медно-благороднометалльной минерализации (фиг. 1).



Фиг. 1. Положение Васи́линовского рудопроявления в складчато-надвиговой структуре Полярного Урала. Геологическая основа по (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014), с упрощениями. На врезке: УрС – Уральское складчато-надвиговое сооружение, ПНС – Пайхойско-Новоземельское складчато-надвиговое сооружение; прямоугольником показано расположение северной и центральной частей Войкарской зоны. 1 – позднедокембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–5 – образования Войкарской зоны: 3, 4 – среднепалеозойские метаморфизованные гипербазиты (3) и габброиды (4), 5 – преимущественно ордовикско-девонские магматические и осадочно-вулканогенные образования; 6 – благороднометалльные объекты: месторождения золота (а), Pd-Cu и Pt-Au-Pd рудопроявления (б); 7 – Главная Уральская сатура.

Малоуральский вулcano-плутонический пояс в среднем палеозое (O_3-C_1) представлял собой либо островную дугу (O_3-D_1), которая в раннем девоне сменилась окраинно-континентальным вулcanoплутоническим поясом, либо островную дугу, сформировавшуюся на гетерогенном основании (Кузнецов, Романюк, 2014; Соболев и др., 2018). В эйфеле и вплоть до раннекаменноугольной аккреции Малоуральской островной дуги с Восточно-Европейским континентом надсубдукционная система Полярного Урала развивалась, скорее всего, как зрелая вулканическая дуга (Викентьев и др., 2017; Соболев и др., 2020).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Василиновское рудопоявление выявлено в карьере строительного и технологического камня, расположенном в 2 км к северо-востоку от пос. Харп Приуральского р-на ЯНАО. Разведка карьеров Амфиболитовый и, в 1,5 км к югу, Подгорненский велась на строительный камень, а также на сырье для производства базальтового волокна (карьер Амфиболитовый); отработка обоих идет на щебень. В структурном отношении район проявления приурочен к северо-западному крылу Войкарской зоны. Проявление сложено габбро и пироксенитами, относимыми к кэршорскому плутоническому комплексу согласно последним данным регионального картирования (Зылева и др., 2014). Близость к осевой части Главной Уральской сuture (именующейся также Главным Уральским глубинным разломом и Главным Уральским надвигом) обусловила широкое развитие в породах рудопоявления зон дробления и интенсивной трещиноватости, а также признаков сильного динамотермального метаморфизма. В районе к западу от меридионального течения ручья Гердъизшор распространены амфиболитизированное габбро и габбро-амфиболиты (Еремин, Пономарев, 1973). Небольшие тела пироксенитов, вероятно, близсинхронные, но зачастую прорывающие габброиды, картируются в различных частях карьера и вблизи него (фиг. 2). Основные и ультраосновные породы заметно, но неравномерно минерализованы (фиг. 3, 4).

Тектонические нарушения северо-восточного — от субмеридионального до субширотного — направления выделены в различных частях проявления и зачастую ограничивают тела более поздних пироксенитов. Характерной особенностью габброидов является наличие гнейсовидной текстуры, выражающейся в линзовидном,

параллельно-ориентированном расположении скоплений темноцветных минералов (фиг. 5).

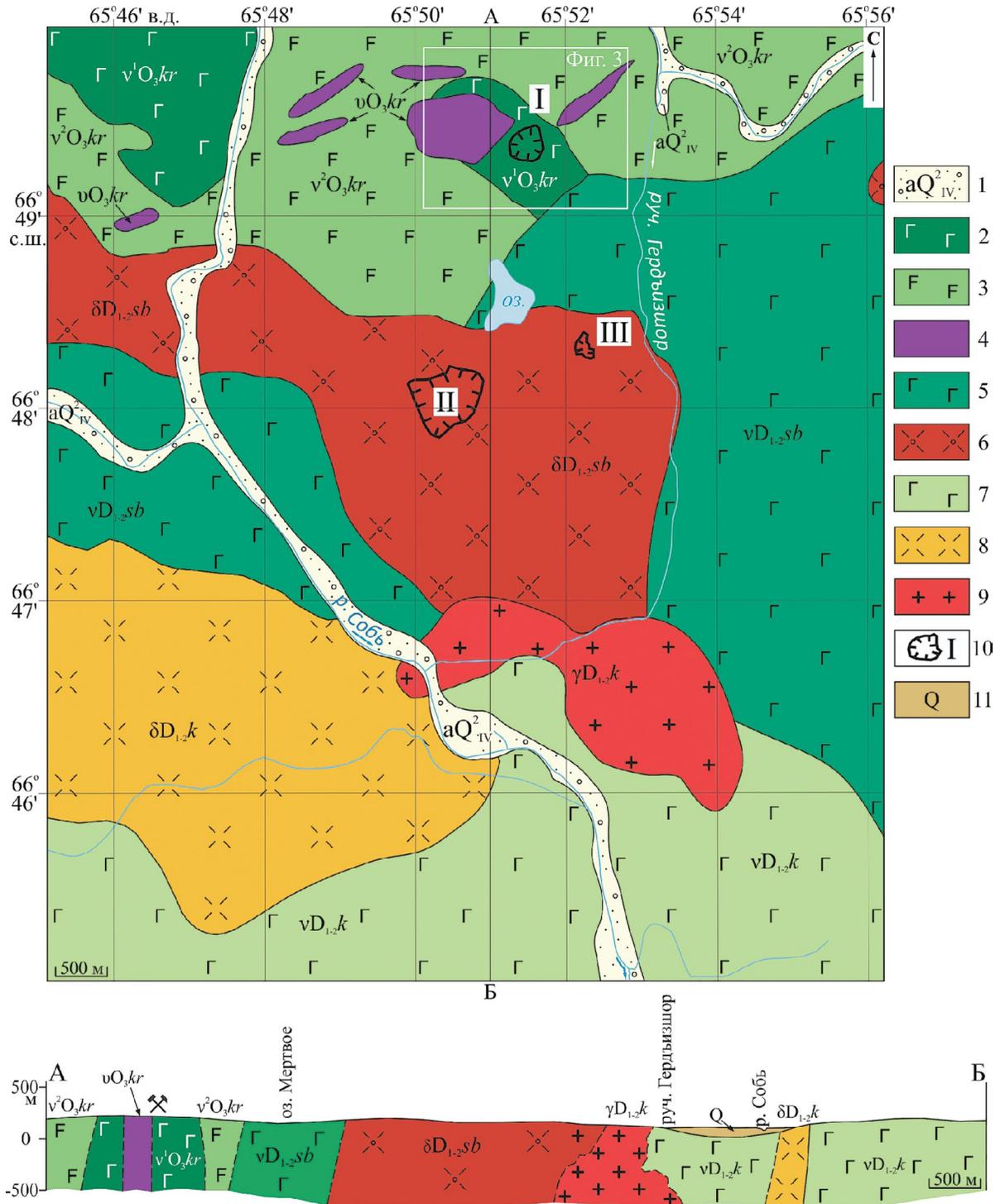
Часто наблюдается постепенный переход от амфиболитизированных габбро к габбро-амфиболитам, в этих случаях отношение породы к той или иной разновидности чисто условное, т.к. даже в небольших интервалах (10–50 см) можно наблюдать текстуру и массивную, и гнейсовидную (фиг. 6).

Помимо высокотемпературных метаморфических преобразований, породы характеризуются вторичными изменениями, в различной степени выраженными в пределах проявления (фиг. 7): для габброидов характерны эпидотизация, окварцевание, хлоритизация, для пироксенитов — уралитизация (замещение пироксена зеленой роговой обманкой).

В габброидах рудопоявления Василиновское отмечается постоянная акцессорная вкрапленность магнетита и пирита (до 1–3 об.%, редко более); подобная малосульфидная минерализация развита и к югу от него, в пределах участка Подгорненский, где более широко распространены жильные образования, сложенные халцедоновидным кварцем. Интенсивная трещиноватость обуславливает значительное развитие в габбро и пироксенитах жильных образований различного состава. Это кварцевые, эпидотовые, кварц-эпидотовые, хлорит-кварц-полевошпатовые, иногда карбонат-кварц-полевошпатовые прожилки и отдельные кварцевые жилы; в них спорадически развиты сульфиды, представляя рассеянную точечную или мелко-гнездовую минерализацию — пирита, халькопирита и др. второстепенных минералов. Вкрапленность сульфидов наблюдается также в габбро и пироксенитах, вне прожилков, в зонах мощностью от 0.7–2 м до 35–50 м. Количество сульфидов в зонах прожилкования и изменения магматических пород локально может достигать 80 об.%.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами использовались наземные геологические и геолого-геохимические методы оценки возможного оруденения (2018–2021 гг.), а также данные космоснимков космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) для выявления особенностей глубинного строения этой и прилегающих территорий Полярного Урала (Викентьев и др., 2021). В 2017–2024 гг. по этой территории нами были выполнены полевые работы рудной

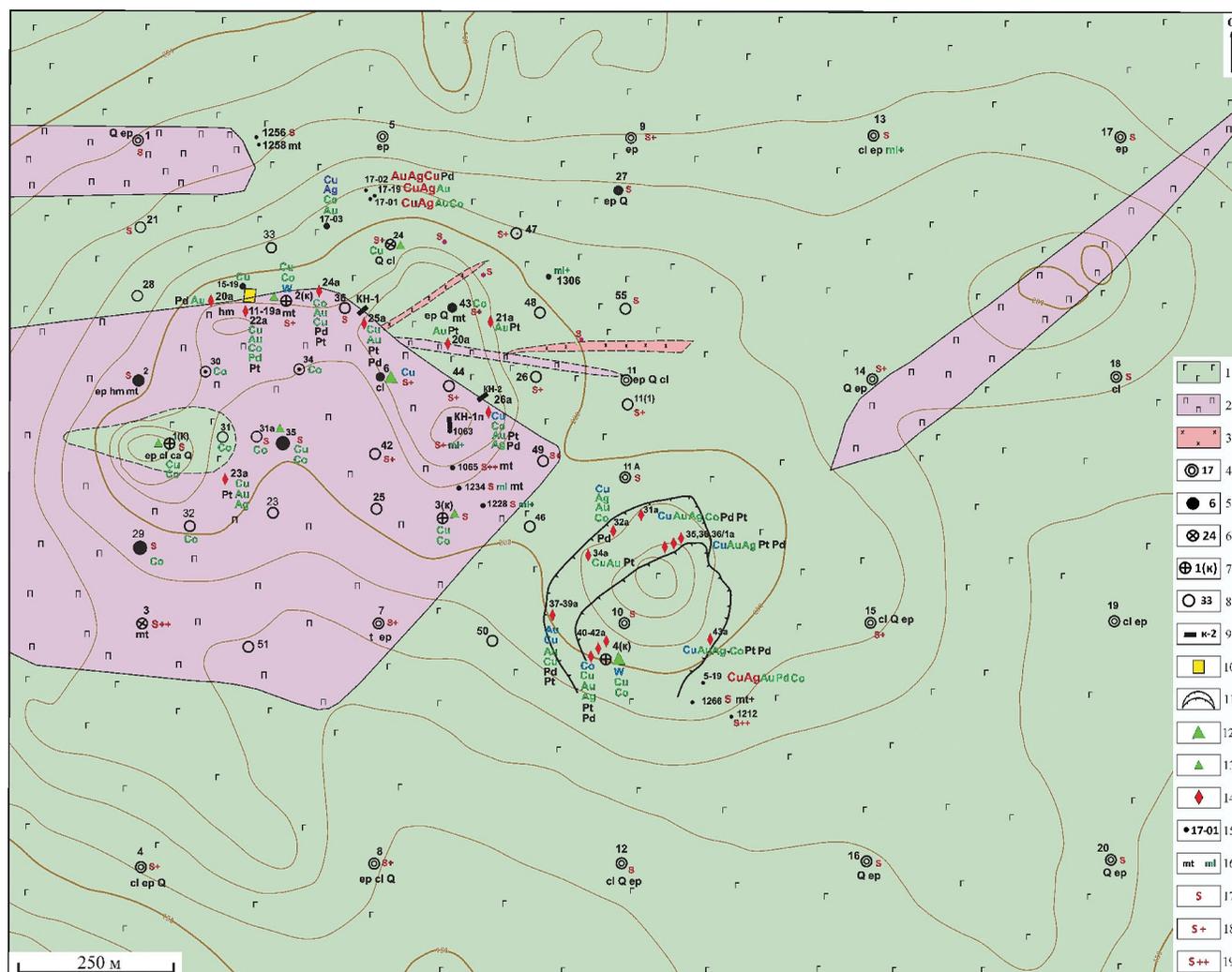


Фиг. 2. Схема геологического строения участка, прилегающего к Василиновскому рудопроявлению, на основе (Еремин, Пономарев, 1973), с добавлениями и изменениями. 1 – четвертичные аллювиальные отложения русловые и низкой поймы; 2–4 – породы кэшорского комплекса, предположительно позднеордовикские: 2 – габбро амфиболитизированные, 3 – габбро-амфиболиты; 4 – гарцбургиты амфиболитизированные и дайки пироксенитов; 5, 6 – ранне-среднедевонские габброиды и плагиогранитоиды собского комплекса: 5 – габбро кварцсодержащие роговообманковые, 6 – диориты, тоналиты; 7–9 – ранне-среднедевонские породы конгорского комплекса: 7 – габбро пироксен-роговообманковое, 8 – диориты биотит-роговообманковые; 9 – гранодиориты; 10 – карьеры строительного камня: I – Амфиболитовый, II-III – участок Подгорненский (карьеры II – Южный, III – Средний); 11 (на разрезе) – рыхлые четвертичные отложения, нерасчлененные, в основном аллювиальные. Белая рамка – Василиновское Pt-Au-Pd рудопроявление.

направленности на карьерах строительного камня Амфиболитовый и Подгорненский. Проведено минералого-геохимическое картирование и отобран обширный каменный материал в уступах карьеров и естественных обнажениях

поблизости. Отбор представительных образцов производился с соответствующей привязкой по GPS-навигатору.

Исследование геохимической специализации руд на Au, Pt, Pd выполнено пробирным анализом;

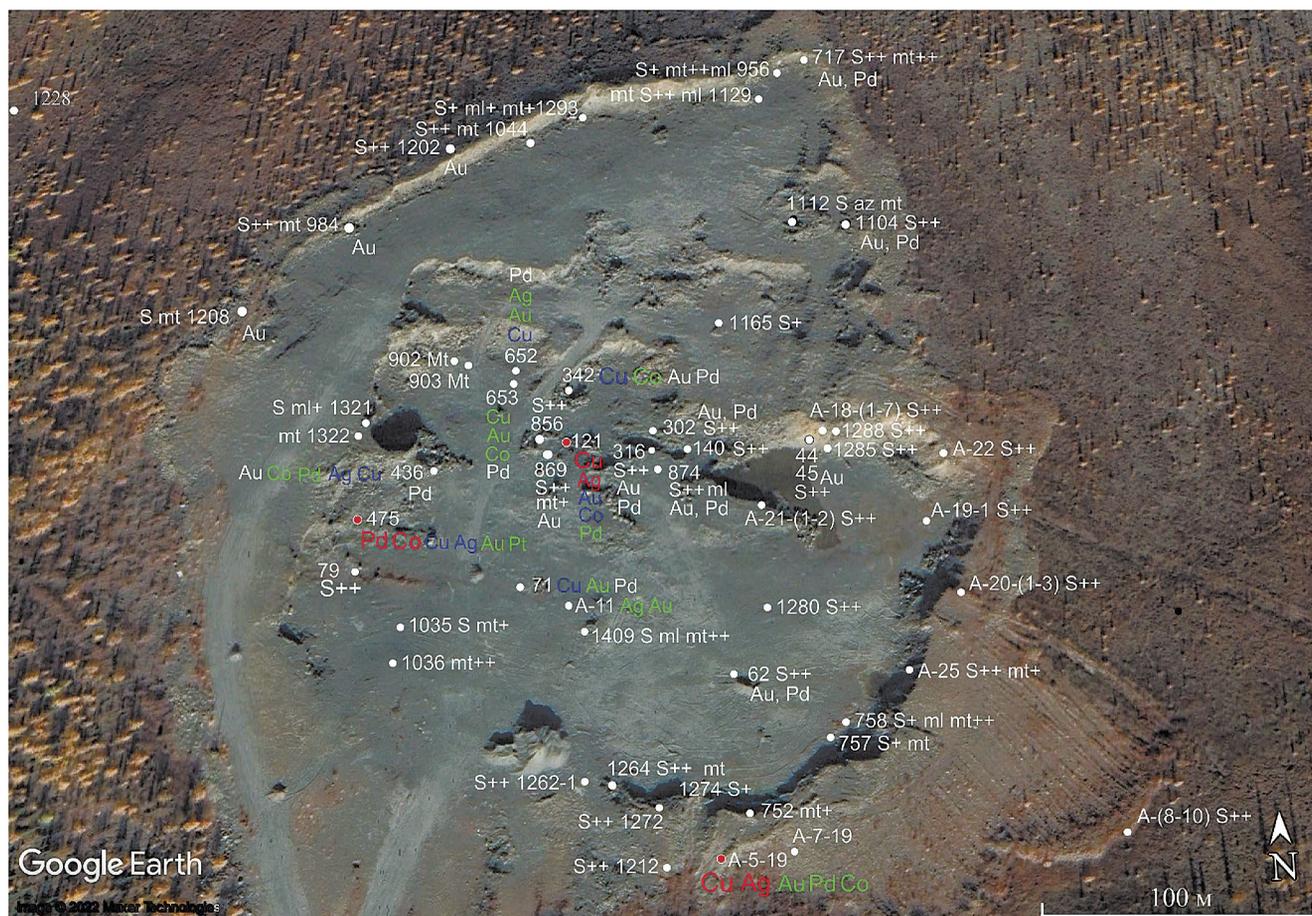


Фиг. 3. Василювское рудопоявление: элементы геологического строения, схема его опробования и минералого-геохимических признаков; по данным В.Д. Мокрия (2006, 2017–2022 гг.), Е.Э. Тюковой, Ю.Н. Ивановой, И.В. Викентьева, И.Д. Соболева (2019, 2021 гг.). 1–2 – кэршорский комплекс дунит-клинопироксенит-габбровый: 1 – габбро роговообманковое, габбро-амфиболиты, амфиболиты, 2 – клинопироксениты; 3 – собский комплекс габбро-тоналитовый: гипабиссальные дайки кварцевых диоритов; 4–8 – буровые скважины: 4 – предварительной разведки 1980–84 гг. (до 105 м), 5–8 – скважины детальной разведки 1986–90 гг. и их номера (до 28 м), в том числе: 6 – разведочные (до 38 м), 7 – разведочно-технологические – кусты (до 45 м), 8 – картировочно-вскрышные (до 27,5 м); 9 – канавы детальной разведки 1986–90 гг. и их номера; 10 – опытный карьер детальной разведки (150 м²); 11 – карьер строительного камня Амфиболитовый; 12,13 – содержание меди в керновых пробах 1986–90 гг.: 12 – рудогенного уровня (0,2% Cu), 13 – среднеаномального уровня (0,04–0,1%); 14 – штупные пробы 2006 г. с аномальным содержанием Au, Cu, Co, Ag, Pd и повышенным – Pt; 15 – штупные пробы 2017–22 гг.; 16 – повышенные количества магнетита (mt), малахита (ml); 17–19 – уровни содержания сульфидов в породе: 17 – убогий, 18 – в повышенном количестве, 19 – в аномальном количестве. Прочая минерализация и гидротермальные изменения: Q – окварцевание (прожилковое), ep – эпидотизация (прожилковая), hm – гематитизация, sa – прожилки кальцита, cl – хлоритизация, t – оталькование. Цветными символами элементов Au, Cu, Co, Ag, Pd даны уровни концентраций металлов в пробах: красным шрифтом – рудный уровень, синим – высокоаномальный (рудогенный) уровень, зеленым – среднеаномальный уровень: медь (>0,3, >0,1, >0,04 мас. %); кобальт (>0,06, >0,02, >0,01 мас. %); золото (>1, >0,3, >0,01 г/т); серебро (>3,5, >0,7, >0,15 г/т); палладий (>0,1 г/т); черным шрифтом даны повышенные содержания палладия и платины (0,03–0,1 г/т).

остальные элементы определены атомно-эмиссионной спектроскопией, компания ООО “Стюарт Геокемикл энд Эссей”, Москва (аналитик О.А. Избаш).

Микроскопические исследования. Изучение рудных и нерудных минералов осуществлялось с помощью методов оптической микроскопии (микроскоп Nikon DS-5Mc-L2) и сопровождалось исследованиями методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгено-спектрального микроанализа (РСМА). Исследование содержаний основных компонентов минералов выполнено на рентгеноспектральном

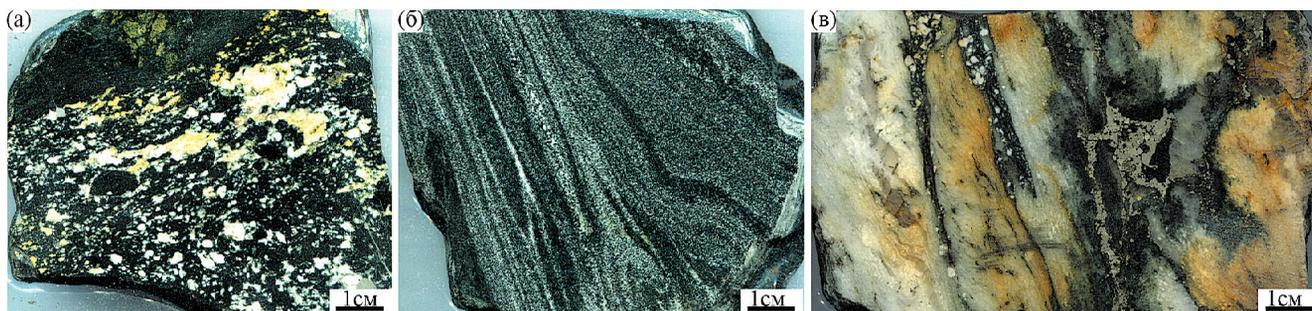
микроанализаторе Jeol JXA-8200 (аналитик Е.В. Ковальчук, ИГЕМ РАН). В пирите, помимо макрокомпонентов (Fe, S) и основных элементов-примесей (As, Co, Cu, Ni, Zn, Sb, Ag), было измерено содержание Au (предел обнаружения 45 ppm, 3σ) по методике, подробно описанной в (Ковальчук и др., 2019). Приблизительно-количественные анализы выполнены на сканирующем микроскопе JSM-5610LV с ЭДС JED-2300, аналитик Левицкая Л.А. (ИГЕМ РАН) и в ИЭМ РАН г. Черноголовка, аналитик Д.А. Варламов; в ЦКП “Геонаука” на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega3 LMN (ИГ



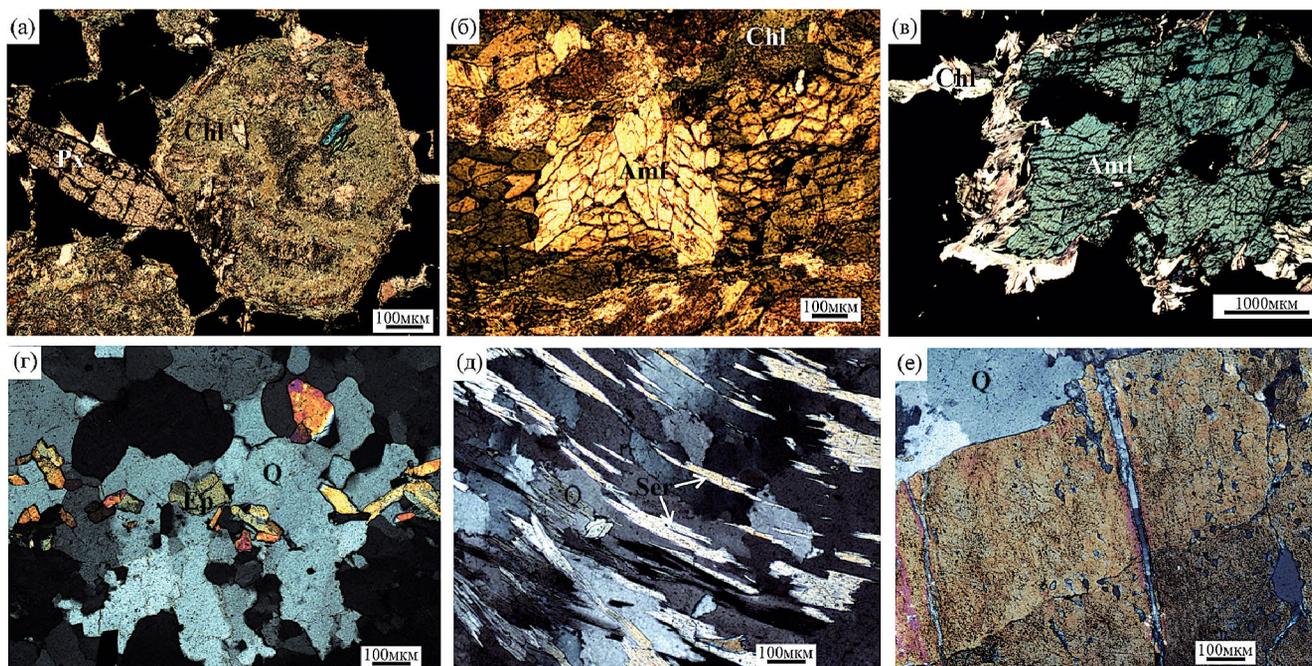
Фиг. 4. Схема отбора проб на карьере Амфиболитовом (Василиновское рудопроявление) в 2018–2022 гг. На космоснимке нанесены точки отбора образцов и их обобщенная минералого-геохимическая характеристика. Условные обозначения: наличие в породах вкрапленности магнетита по уровням концентраций: mt – убогий, mt+ – повышенный, mt++ – в аномальном количестве; Mt – магнетитовая руда; уровень наличия в породах визуально наблюдаемой в штучках примеси сульфидов: S – убогий, S+ – в повышенном количестве, S++ – в аномальном количестве; az, ml – наличие примазок и гнезд азурита (az) и малахита (ml), ml+ – малахит в повышенном количестве; белыми символами элементов Au и Pd показана позиция образцов с находками их минералов. Цветными символами химических элементов Cu, Co, Au, Ag, Pd, Pt даны уровни содержания металлов в керновых и штучных пробах по данным спектроскопического и пробирного анализов (увеличение размера шрифта отвечает относительному росту содержаний): красным шрифтом – рудный уровень, синим – высокоаномальный (рудогенный) уровень, зеленым – среднеаномальный уровень: медь (>0.3, >0.1, >0.04 мас.%); кобальт (>0.06, >0.02, >0.01 мас.%); золото (>1, >0.3, >0.07 г/т); серебро (>3.5, >0.7, >0.15 г/т); палладий и платина (>1.2, >0.4, >0.1 г/т). Красными точками показаны три образца с аномальным обогащением Pd, Pt ±Au (в них – основные находки минералов Pd, Au и Pt).



Фиг. 5. Габброиды Василювского рудопоявления с такситовой текстурой (а, б) пересекаются жилой пироксена и содержат субогласные разветвленные жилки плагиоклазитов (в).



Фиг. 6. Метагабброиды рудопоявления Василювское: а – амфиболитованное габбро (обр. 18-99); б – гнейсо-амфиболиты (обр. 19-1029); в – кварц-полевошпатовый линейный штокверк с сульфидной минерализацией в амфиболитах (обр. 19-805).



Фиг. 7. Вторичные изменения силикатов в рудовещающих метагаббродах рудопоявления Василювское: а – замещенные хлоритом изометричные кристаллы, возможно, клинопироксена, рядом – реликтовый кристалл пироксена (обр. 18-91); б – агрегат кристаллов амфибола (обр. 18-99); в – замещение амфибола чешуйчатым агрегатом вторичных силикатов (обр. 22-1343); г – эпидот-кварцевые метасоматиты (обр. 1133); д – кварц-серицитовые метасоматиты (обр. 1231); е – кварцевые микропрожилки в хлоритизированном амфиболе (обр. 1231).

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, аналитик А.С. Шуйский. Химический состав минералов определен в режиме EDS с использованием приставки X-MAX 50 мм² фирмы Oxford Instruments с напряжением 20 кВ, силой тока 15 нА и диаметром пучка 1–2 мкм. Время экспозиции – 500000 импульсов. Изображения получены в режиме обратного рассеянных электронов (BSE). Часть образцов из нашей коллекции (сборы В.Д. Мокрия), в которых нами были установлены максимальные концентрации ЭПГ, в 2022 г. была повторно расшлифована и микроскопически изучена коллегами из ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; предварительные данные, с акцентом на минеральные формы ЭПГ, были опубликованы (Шайбеков и др., 2023).

Изучение микропримесей в минералах выполнено методом LA-ICP-MS в ИГЕМ РАН (прибор ThermoXSeries, лазер – NewWave 213, аналитик В.Д. Абрамова) по методике, подробно описанной в (Викентьев и др., 2016). Вскрытие зерен сульфидов осуществлялось с помощью точечной и профильной (бороздовой) абляции, стандартный диаметр луча лазера 40 мкм. Чувствительность для большинства элементов составляла 0.02–0.05 ppm.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПОРОД

Из рудных элементов-макрокомпонентов в минерализованных габбро-амфиболитах и амфиболитизированных габбро *Василиновского* проявления наиболее значительные концентрации образуют Fe (до 10 мас. %) и Cu (до 0.5–1 мас. %, редко более), которые, впрочем, не имеют промышленного значения ввиду сравнительно невысоких содержаний (табл. 1) и отсутствия крупных, протяженных скоплений титаномагнетита и халькопирита, образующих спорадические скопления. В качестве заметных и часто встречающихся в валовых пробах нужно отметить такие примеси (мас. %), как V до 0.2, Co до 0.06 и Ni до 0.02, но их распределение крайне неравномерное. Максимальные содержания Pd в рудах (обр. 475, А5-19 и А-121) по данным пробирного анализа (ООО “Стюарт Геокемикл энд Эссей”) составляют, соответственно, 1.371; 0.021 и 0.312 г/т, Pt – 0.199; 0.366 и 0.019 г/т, а золото в этом ряду нарастает: 0.131; 0.162; 0.831 г/т (табл. 1). Таким образом, учитывая промышленную ценность рудных компонентов, малосульфидная минерализация *Василиновского* проявления может быть охарактеризована следующим геохимическим

Таблица 1. Химический состав руд и минерализованных пород *Василиновского* рудопоявления (г/т)

№ обр.	P	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ag	Au	Pt	Pd
А-436	45	185	29	156	46	2986	1.2	0.043	0.008	0.136
А17-22	361	167	19	57	21	193	0.2	0.005	0.005	0.038
А-342	16	505	246	119	78	2084	0.2	0.057	0.013	0.104
А17-01-1	12	38	20	18	8	3338	3.3	0.127	0.005	0.018
А-653	15	2907	166	143	94	1089	<0.2	0.073	<0.005	0.030
А17/03	52	322	75	25	50	614	0.2	0.019	0.059	0.269
А-652	13	1164	134	58	68	1950	0.5	0.278	0.011	0.060
А18/71	2314	203	100	45	83	1379	<0.2	0.179	<0.005	0.018
475	<10	41	69	645	217	1613	3.2	0.131	0.199	1.371
А-121	216	82	46	455	192	>10000	5.4	0.831	0.019	0.312
А5-19	40	131	21	142	101	10000	3.5	0.162	0.021	0.366
А9/19	785	61	58	16	35	17	<0.2	0.023	<0.005	0.002
А15/19	524	146	86	21	50	664	<0.2	0.006	<0.005	0.008
А17/19	10	6	133	19	77	>10000	7.0	0.129	<0.005	0.001
А12/19	16	1176	68	82	66	1146	<0.2	0.008	<0.005	0.023
М-302	<10	3	145	142	90	521	0.3	0.011	<0.005	0.026
А2-8/19*	485	104	82	23	52	982	<0.2	0.027	<0.005	0.046

Примечание. * – участок Подгорненский, Средний карьер. Au, Pt, Pd – пробирный анализ; остальные элементы – атомно-эмиссионная спектрометрия, компания ООО “Стюарт Геокемикл энд Эссей”. Максимальная корреляция наблюдается в парах Co-Ni, Pd-Co, Pd-Ni, а золото и серебро имеет высокое значение парной корреляции с медью.

спектром: Pt-Au-Pd-Co \pm Ni-Cu-V-Ti. Формы нахождения, а также размеры и характер сростаний минералов-носителей в минерализованных породах (потенциально, рудах) имеют важное значение для промышленной оценки поскольку во многом определяют показатели обогатимости рудного сырья. В первую очередь это касается цветных и благородных металлов, как более значимых. Именно их распределение и формы нахождения стали предметом детального рассмотрения. В отличие от Василюновского проявления, в рудах участка *Подгорненский*, заметной минерализации благородных металлов не встречено; содержания их незначительны и по данным пробирного анализа составляют Au 0.007 ppm, Pd 0.003–0.011 ppm.

РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ И ИХ СРАСТАНИЯ

В изложении дальнейшего материала акцентированное внимание будет уделено рудным минеральным ассоциациям. При картировании карьера, последующем описании штучных образцов и микроскопических исследованиях были выделены, от ранних к поздним, гематит-магнетитовая, магнетит-халькопирит-пиритовая, полисульфидно-полевошпат-кварцевая и полисульфидно-карбонатно-кварцевая рудные ассоциации.

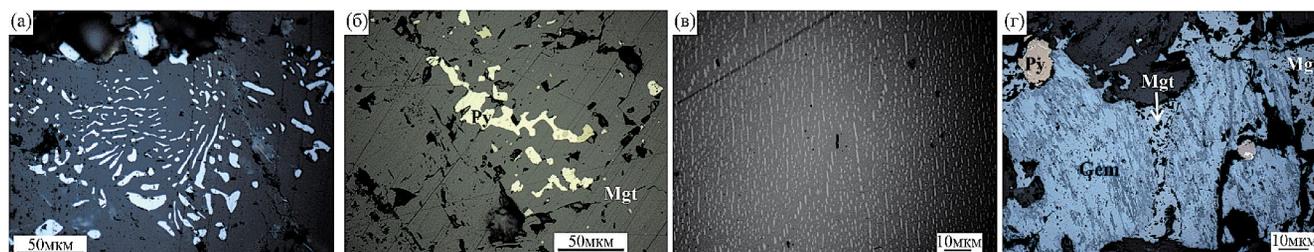
Гематит-магнетитовая ассоциация распространена в темноцветных амфиболитизированных габброидах в виде рассеянной вкрапленности (до 1 мм), иногда изометричных скоплений (до 1–2 см) и еще реже – крупных шпиров до 1 м мощностью. Количество магнетита в таких рудных фрагментах колеблется от первых процентов до 30–50 об.%. Как правило, магнетит приурочен к породообразующим темноцветным минералам и отлагается по границам их кристаллов, ассоциируя с сульфидами; встречаются мirmekиты магнетита с амфиболом (фиг. 8). Наличие

в метагаббро большого количества титаномагнетита, а также находки каркасных структур, сложенных пластинчатым рутилом, обогащенным V и W, указывают на обогащенность порций магмы титаном. В рудах наблюдается замещение магнетита гематитом, разновременная кристаллизация магнетита относительно сульфидов (кокардовые каймы магнетита вокруг сульфидов и развитие сульфидных агрегатов в интерстициях магнетита), что позволяет предполагать изменение окислительного режима системы, которое, вероятно, происходило неоднократно.

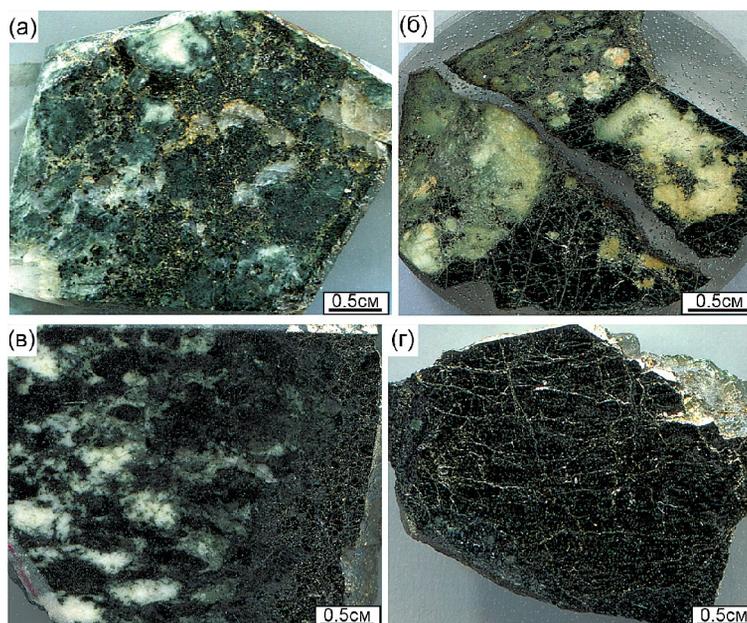
Магнетит-халькопирит-пиритовая ассоциация выделяется по существенному увеличению доли сульфидов (локально до 80 об. %). Она связана с зонами значительных метасоматических изменений вмещающих базитов в виде эпидотизации, хлоритизации, альбитизации и подчиненного окварцевания (фиг. 9). Поэтому в целом такие минерализованные участки имеют преобладающую зеленовато-серую окраску, более светлую на фоне почти черных габбро и амфиболитов.

Сульфидные образования представлены прожилками и жилами до 5 см мощностью; распространены гнезда и вкрапленность сульфидов (фиг. 10). В рудах широко распространены кокардовое строение (фиг. 10д, е) и структуры цементации; в сростаниях сульфидов часто встречаются структуры распада (фиг. 10в, г). Магнетит также типичен для этой ассоциации, но здесь значительно чаще наблюдается его замещение гематитом. Гематит иногда образует зоны, сложенные веерообразными агрегатами пластинчатых кристаллов.

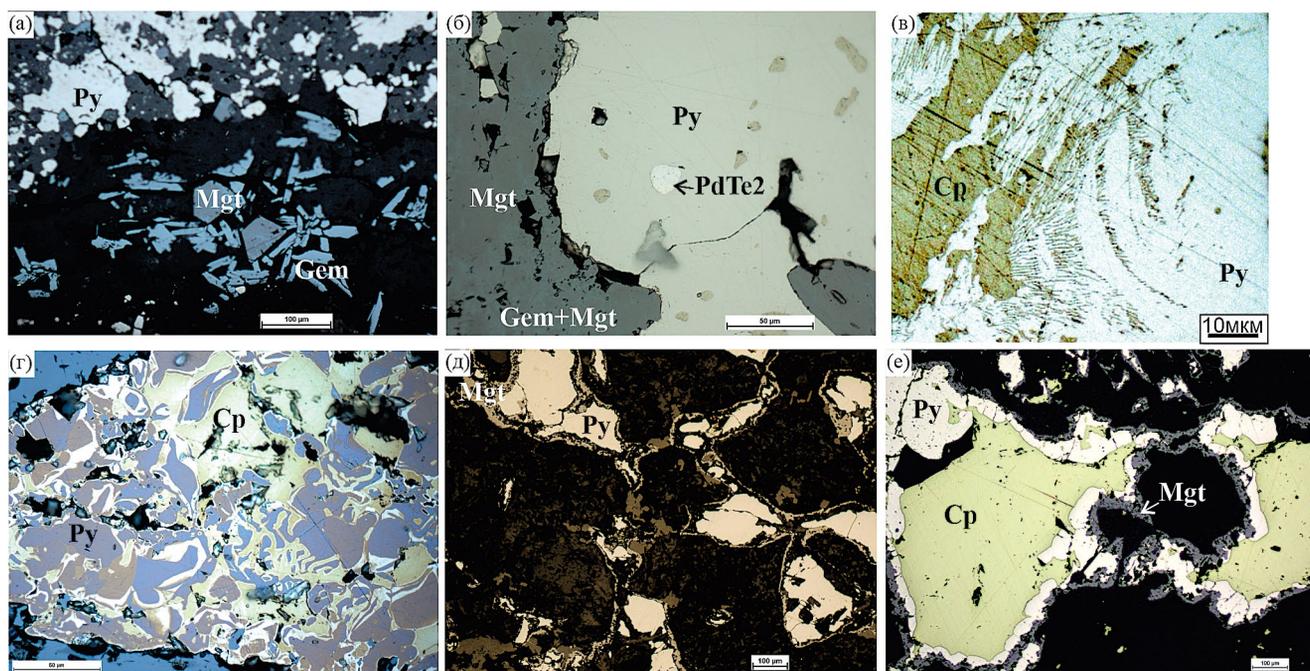
Структуры распада халькопирита в пирите (фиг. 10в) представлены концентрическими зонами насыщения халькопиритом, тогда как обратные соотношения (пирит в халькопирите) представляют симплектиты (графические вросстки пирита в халькопирите, фиг. 10г).



Фиг. 8. Особенности строения и состава агрегатов гематит-магнетитовой ассоциации рудопроявления Василюновское: а – мirmekиты магнетита в амфиболовой матрице амфиболита (обр. А17-10); б – графическое выделение пирита в магнетите (обр. А-121); в – структуры распада магнетит + ильменит в магнетитовом агрегате (обр. 1324); г – гематит-магнетитовый агрегат (обр. А-653).



Фиг. 9. Строение руд с палладиевой минерализацией: а – хлоритизированные окварцованные и сульфидизированные габброиды с теллуридами Pd (обр. А5-19); б – сульфидизированные полевошпатовые метасоматиты с Ag-Au-Pd-теллуридной минерализацией (обр. 475); в – полевошпат-хлорит-магнетитовые метасоматиты с сульфидной вкрапленностью с включениями Pt-Pd-теллуридов (обр. 342-1); г – фрагмент халькопирит-пиритовых руд с вкрапленностью минералов ЭПГ (Pd, Os), Au-Ag и редкоземельных фаз (Y + Zr + Hf) (обр. А-121).



Фиг. 10. Строение сульфидных агрегатов магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации: а – игольчатые агрегаты гематита цементируют изометричные кристаллы магнетита (обр. 475); б – микровключения меренскиита (PdTe_2) в пирите ассоциации (обр. 475); в, г – структуры распада: в – линейно-зональные – халькопирит в пирите (обр. А5-19); г – графические срастания – пирит в халькопирите (обр. А-653, воздушное травление); д, е – кокардовые структуры: д – Py+Mgt (обр. 342-1), е – Cp+Py+Mgt (А-652).

Температура образования сосуществующих пирита и халькопирита по содержанию в них примеси Со, рассчитанная по методу Н.И. Безмена и др. (1978), для образца со структурами распада двух типов составляет 205–422 °С, а для образца с одним типом – 287 °С (табл. 2). В целом

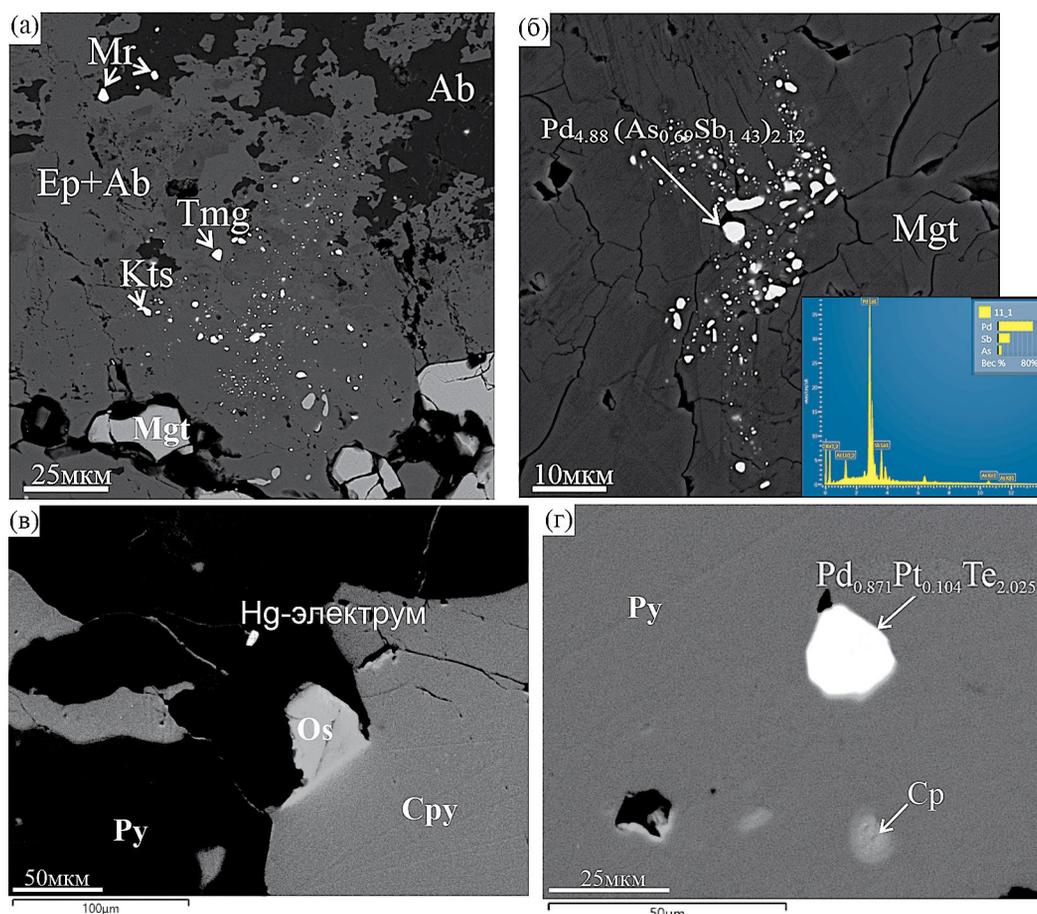
температурные параметры укладываются в пределы 422–175 °С.

Главной особенностью сульфидных образований этой ассоциации является наличие микровключений минералов ЭПГ. Наиболее ранним платиноидом, вероятнее всего, является

Таблица 2. Температуры образования пирит-халькопиритовых сростаний, рассчитанные по кобальтовому би-минеральному геотермометру (C_{Co} в мас. %)

№ обр.	Со в Срр	Со в Py	K_d	$\text{Log } K_d$	$1.292 \cdot \text{log } K_d$	+2.382	T, K	$t, ^\circ C$
A17-19	0.12	0.51	0.36	-0.4437	-0.5733	1.8067	553	280
A-653	0.43	1.1	0.598	-0.2232	-0.2884	2.0936	477	205
	0.26	2.14	0.186	-0.7308	-0.9441	1.4379	696	422
A9-19	0.15	0.42	0.546	-0.2625	-0.3392	2.0428	489	216
A5-19	0.14	0.28	0.765	-0.1163	-0.1502	2.2318	448	175
	0.07	0.31	0.345	-0.4616	-0.5964	1.7856	560	287

Примечание: $t^\circ C = 1000 / (1.292 \cdot \text{lg } K_d (C_{Py} - C_{Pyr}) + 2.382) - 273$ (Безмен и др., 1978).

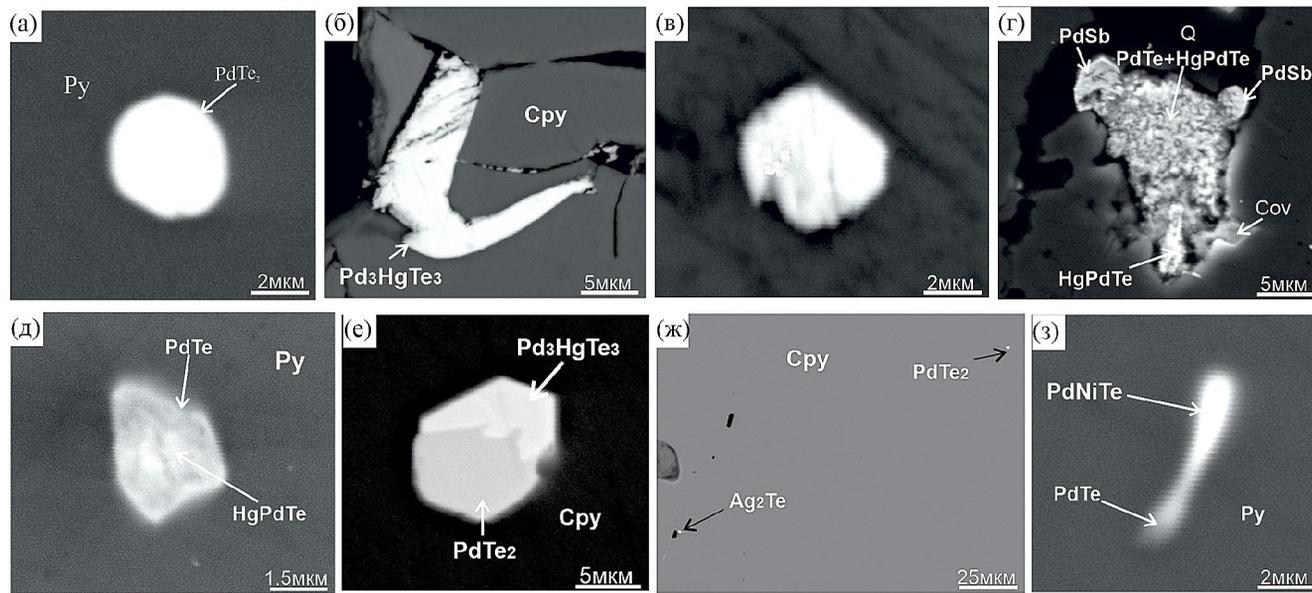


Фиг. 11. Микровключения палладиевых минералов в эпидот-альбитовой (а), магнетитовой (б) и сульфидной (г) матрице: а, б – россыпь каплевидных включений котульскита, темагаммита и изомертиита (обр. 475 и А-121); в – включение самородного осмия на поверхности халькопирита в дефекте (обр. А-121); г – кристалл платиносодержащего меренскиита (обр. 342-1).

сперрилит. Он установлен преимущественно в магнетите в ассоциации с ранним пиритом, реже в виде прожилков в пирите. Размеры включений не превышают 10 мкм. В ряде случаев сперрилит находится в сростаниях с темагамитом и меренскиитом, в связи с чем в его составе наблюдаются нехарактерные примеси Pd

и Te. Химический состав довольно стабилен (мас. %): Pt 54.58–56.83 (ср. 55.86), As 41.40–43.71 (42.33), Pd 0.01–2.63 (1.58), Te 0.05–1.89 (1.63), формула $Pt_{1.00-1.05}As_{1.95-2.00}$.

Палладиевые минералы содержатся в виде субмикроскопической вкрапленности размером до 10 мкм и облаковидных скоплений в дефектах

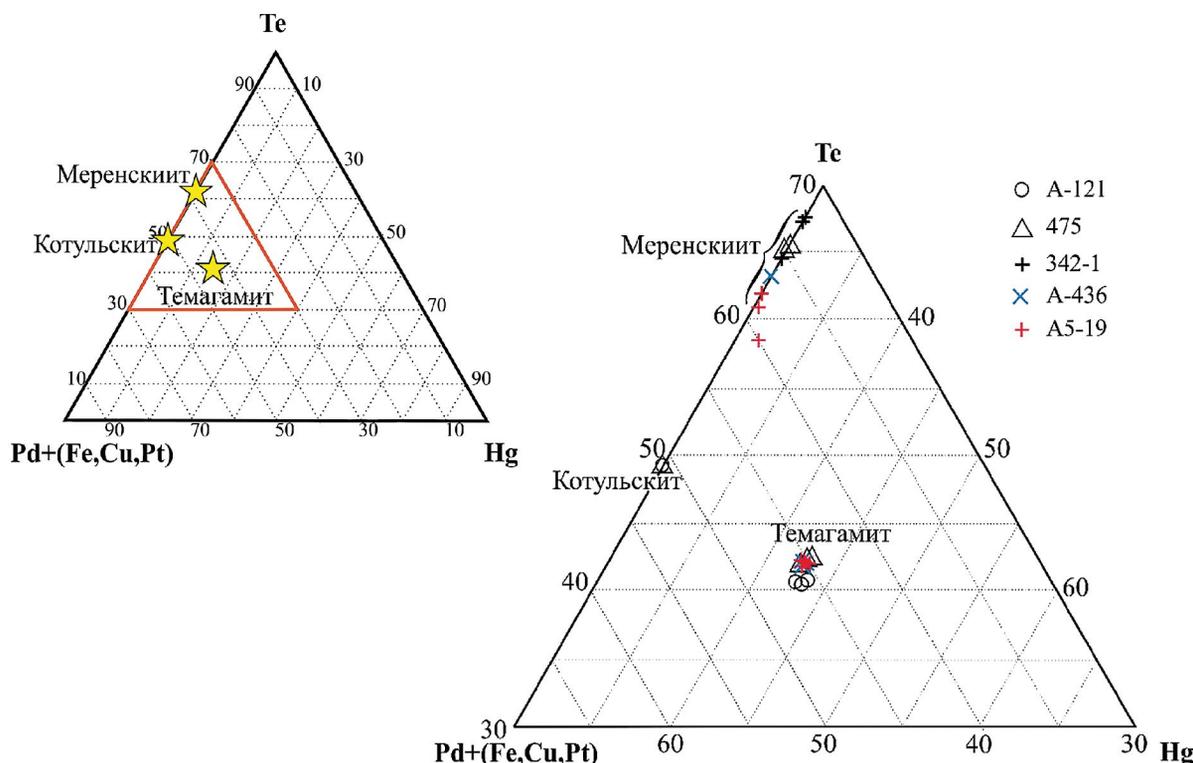


Фиг. 12. Теллуриды палладия в рудах Василювского рудопроявления: а – изометричная “капля” меренскиита в пирите (обр. А-436); б – темагамит в дефекте халькопирита (А-436); в – псевдогексагональный кристалл меренскиита с микрокаплей висмута в хлорит-альбитовом прожилке (А5-19); г – агрегат со структурой распада меренскиит-темагамит, по периферии которого образуются кристаллы минералов типа садберрита (PdSb) в кварцэпидотовом метасоматите (А5-19); д – кристалл сложного состава (меренскиит-темагамит) в пирите А5- 9); е – гексагональный биминеральный кристалл (меренскиит + темагамит) в халькопирите (А5-19); ж – микронная вкрапленность теллуридов Ag и Pd в халькопирите (А5-19); з – Ni-Pd-теллурид в пирите.

Таблица 3. Представительные результаты рентгеноспектрального микроанализа теллуридов палладия и стибипалладинита (мас.%) Василювского проявления

	Минерал	Образец	S	Fe	Cu	As	Pd	Sb	Te	Pt	Hg	Сумма	Эмпирическая формула
1	Меренскиит	A5-19 ¹	0.04	1.2	1.4		28.8		68.4	0.8		100.6	$Pd_{0.95}Cu_{0.07}Fe_{0.08}Pt_{0.01}Te_{1.88}$
2	То же	A-436 ¹	0.4	2.2			28.9		69.4	0.0		100.8	$Pd_{0.94}Fe_{0.14}Te_{1.88}S_{0.04}$
3	>>	342-1 ²					25.0		69.6	5.4		100.0	$Pd_{0.87}Pt_{0.1}Te_{2.03}$
4	Темагамит	A5-19 ¹	0.0	1.7	1.6		34.6		42.0	0.0	21.3	101.2	$Pd_{2.79}Hg_{0.91}Fe_{0.26}Cu_{0.21}Te_{2.82}$
5	То же	A-436 ¹		1.8			34.5		42.1	0.0	22.2	100.6	$Pd_{2.85}Hg_{0.97}Fe_{0.28}Te_{2.9}$
6	>>	475 ³		1.1			35.6		42.0		21.9	100.6	$Pd_{2.95}Hg_{0.96}Fe_{0.2}Te_{2.9}$
7	Котульскит (+пирит)	A-121 ³	7.8	6.9	0.7		39.3		45.8			100.7	$Pd_{0.99}Te_{0.96}$
8	Стибиопалладинит	A-121 ³				7.1	71.6	24.1				102.8	$Pd_{4.88}(Sb_{1.43}As_{0.69})_{2.12}$

Примечание. Кристаллохимическая формула котульскита (ан. 7) пересчитана с вычетом матрицы пирита. Анализы выполнены: ¹ – в ИЭМ РАН на Tescan VEGA-II XMU с ЭДС INCA Energy 450, аналитик Д.А. Варламов; ² – в ИГЕМ РАН на JSM-5610LV с ЭДС JED-2300, аналитик Л.А. Левицкая; ³ – в ИГ Коми НЦ УрО РАН на Tescan Vega 3 LMN с ЭДС X-Max, аналитик А.С. Шуйский.



Фиг. 13. Положение фигуративных точек составов минералов ЭПГ Василиновского проявления на треугольной диаграмме для теллуридов.

главных оксидов и сульфидов ассоциации: магнетите, пирите и халькопирите (фиг. 10б, 11, 12). Форма выделений минералов палладия либо изометричная и каплевидная, либо имеет отчетливую кристаллографическую огранку (фиг. 11,12).

Строение и состав обособлений минералов ЭПГ часто неоднородные. ЭПГ представлены тремя устойчивыми по составу и наиболее распространенными в рудах минералами: меренскиитом, котульскиитом и темагамитом (фиг. 12, табл. 3). Интересно, что они могут как срастаться контактно (рис. 12 е), так и образовывать подобие структур распада (фиг. 12 г, д). В некоторых случаях к палладию может добавляться Ni и Pt (фиг. 12 з, фиг. 13), а теллур может замещаться сурьмой и мышьяком (фиг. 12 г, табл. 3). По элементам-примесям и характеру сростаний выделения *меренскиита*, согласно оценке (Шайбеков и др., 2023), можно разделить на два типа: содержащий примеси Ni, Pt, Ag, Sb и включающий примеси только Ag, Bi, Sb. Первый тип приурочен к измененным габбро, содержащим магнетит, и локализован в пирите, нередко в сростках со сперрилитом, темагамитом, котульскиитом, пирротинном и халькопиритом. Второй – встречается в пирите кварц-хлорит-эпидотовых жил

и прожилков, реже в кварце, эпидоте, хлорите и зачастую – в тесных сростаниях с минералами меди.

Темагамит является вторым по распространенности платиноидом и наиболее часто встречающимся ртутьсодержащим минералом. Темагамит, как и меренскиит, можно разделить на два типа, вероятно образовавшихся с незначительным разрывом во времени (Шайбеков и др., 2023). Оба типа представлены изометричными и субидiomорфными зернами размером 1–20 мкм. Первый тип, развитый в магнетитсодержащих породах, преимущественно локализуется в магнетите, пирите или халькопирите и нередко находится в сростках со сперрилитом, второй же является более поздним, и темагамит находится в виде включений в пирите, халькопирите, борните и по контактам их выделений. При этом темагамит часто образует тонкие сростания с гесситом, меренскиитом, колорадоитом и нередко, наряду с меренскиитом, образует небольшие вкрапления в кварц-хлорит-эпидотовых прожилках. Несмотря на частые сростания с другими платиноидами, его химический состав довольно стабилен (мас. %): Pd 33.82–36.09 (ср. 35.00), Hg 16.17–22.89 (ср. 21.36), Te 38.55–47.92

(ср. 42.44), Sb 0–4.21 (ср. 1.15), Ag 0–1.58 (ср. 0.76), в единичном случае установлена примесь Bi (1.8) и As (0.77); формула $(\text{Pd}_{2.91-3.00}\text{Ag}_{0-0.10})_{2.91-3.03}\text{Hg}_{0.72-1.03}(\text{Te}_{2.73-3.33}\text{Sb}_{0-0.25})_{2.73-3.33}$.

Котульскит представлен висмут-содержащей и безвисмутовой разновидностями и образует изометричные, реже угловатые сечения размером от 1 до 12 мкм в пирите, ассоциируя с халькопиритом и борнитом. Котульскит преимущественно находится в сростках с меренскиитом, темагамитом и мончеитом, лишь в единичных случаях наблюдаются его самостоятельные выделения. Химический состав котульскита (мас. %): Pd 43.03–44.72 (ср. 44.08), Te 50.33–57.79 (ср. 52.96), Bi 0–4.28 (ср. 3.23), Ag 0–1.41 (ср. 0.95), Sb 0–1.1 (ср. 0.79), в единичном случае отмечена примесь Hg (1.31); формула $(\text{Pd}_{0.96-0.98}\text{Ag}_{0-0.03})_{0.98-1.00}(\text{Te}_{0.94-1.00}\text{Bi}_{0-0.05}\text{Sb}_{0-0.02})_{1.00-1.02}$.

Стибиопалладинит и *сопчеит* установлены в виде единичных мельчайших зерен в пирите. Первый отмечен в трещине в пирите эпидот-хлорит-кварцевых жил, в ассоциации с халькопиритом и кварцем. Размеры его не превышают 5 мкм, по химическому составу соответствует стибиопалладиниту (мас. %): Pd 64.49, Sb 28.08, As 2.30, Ag 1.58; формула $(\text{Pd}_{4.88}\text{Ag}_{0.11})_{4.99}(\text{Sb}_{1.77}\text{As}_{0.24})_{2.01}$ и мышьяковистому стибиопалладиниту $\text{Pd}_{4.88}(\text{Sb}_{1.43}\text{As}_{0.69})_{2.12}$. Сопчеит (4 мкм) установлен в виде сростка с гесситом и сфалеритом, в обрамлении борнита, в пирите (Шайбеков и др., 2023). Химический состав близок к стехиометричному (мас. %): Ag 36.95, Pd 24.35, Te 37.90, Sb 0.79; формула имеет вид $\text{Ag}_{4.31}\text{Pd}_{2.88}(\text{Te}_{3.74}\text{Sb}_{0.08})_{3.82}$.

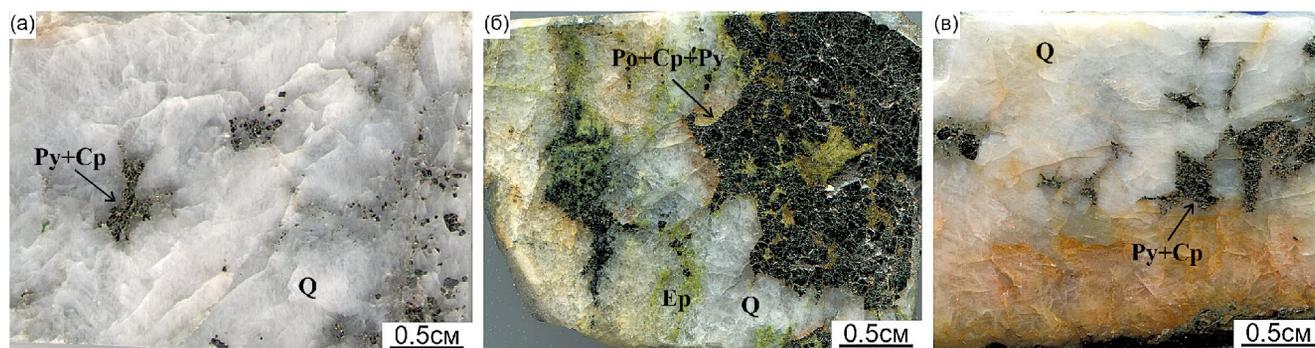
Таким образом, для палладия отмечается целая серия его минералов: теллуриды палладия (меренскиит, темагамит, котульскит), антимониды палладия (стибиопалладинит, садбериит), арсеноантимониды палладия (мышьяковистый

стибиопалладинит, изомертиит), Pd-Ag теллурид – сопчеит $\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$. Такое морфоструктурное и химическое разнообразие палладиевых фаз позволяет предполагать различные времена и механизмы их образований.

Полисульфидно-полевошпат-кварцевая и полисульфидно-карбонатно-кварцевая ассоциации представлены жилами мощностью до 30 см. Сульфиды, как правило, образуют вкрапленность и реже – гнезда (до 5 см), приуроченные к зальбандовым частям жил (фиг. 14). Разделение этих двух ассоциаций условно, так как в жилах количественные соотношения кварца, полевого шпата и карбоната сильно изменчивы.

Теллуриды золота и серебра и самородное золото обычно распространены в виде мелких (первые микроны) включений в главных сульфидных полисульфидно-полевошпат-кварцевой ассоциации (фиг. 14, 15): в пирите, халькопирите, галените, иногда в сфалерите и по микротрещинкам – в магнетите. Включения самородного золота имеются в альбите. В некоторых случаях оно локализуется в продуктах окисления первичных сульфидов и в качестве примеси содержит ртуть, а в сростании с Cd-сфалеритом (фиг. 15е) установлен теллурид серебра, который содержит примесь Se; в обр. 475 также установлен селенит аргентит (табл. 4).

Количественные анализы состава Au-Ag минералов выполнены в образцах с палладиевой минерализацией (обр. 475, А-121), где они имеют отчетливо поздний характер (локализируются в дефектах, микротрещинах и более позднем альбите). Пробность золота изменяется от 750 до 970. В одном из палладий-содержащих образцов (обр. 475) в альбите установлена мелкая вкрапленность самородного серебра (около 1 мкм). Там же в альбите обнаружена микровкрапленность самородного висмута (3 мкм), а в дефекте кристалла

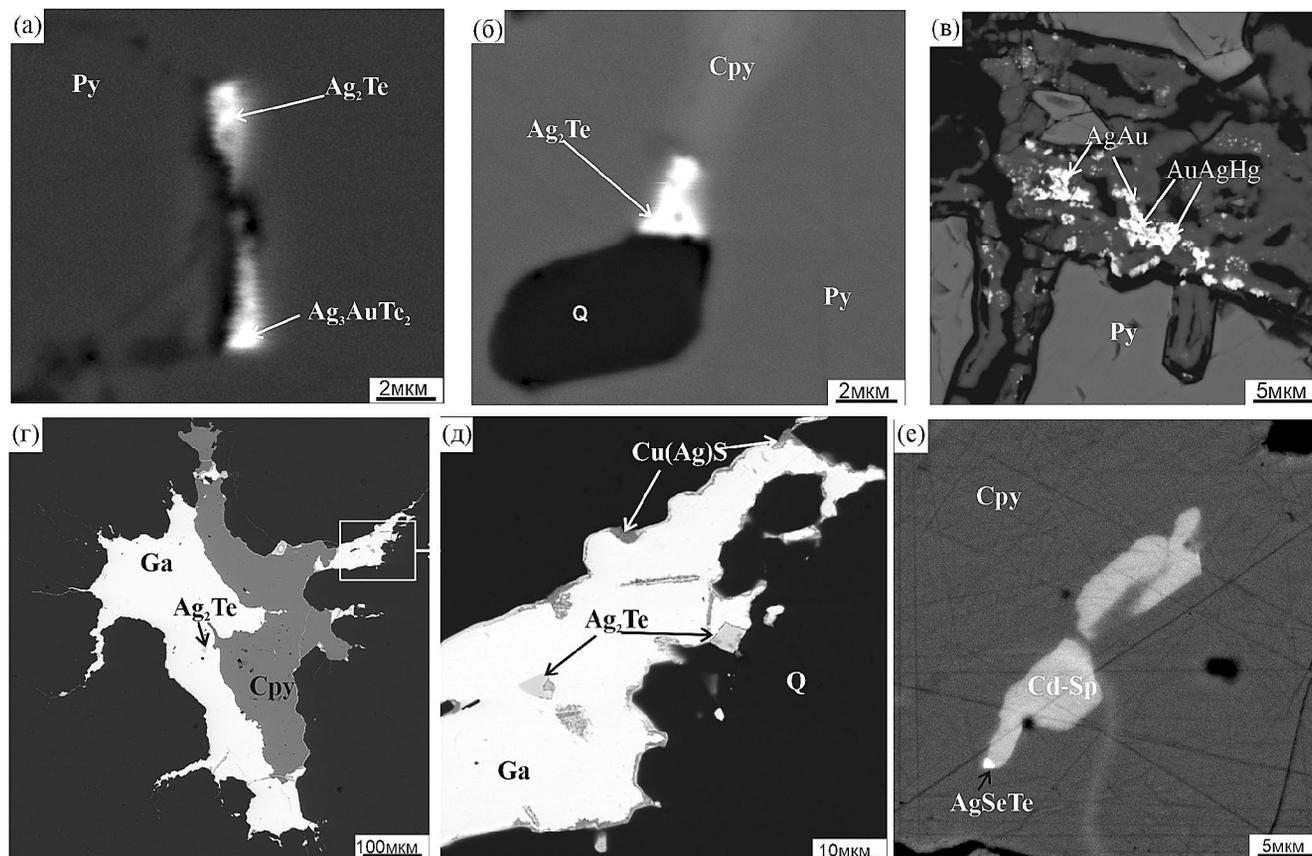


Фиг. 14. Жильные образования полисульфидно-полевошпат-кварцевой (а – обр. А17-01-1, в – А17-19) и полисульфидно-карбонатно-кварцевой (б – обр. 870) ассоциаций.

Таблица 4. Состав Ag-Au минералов (мас. %) в рудах рудопроявления Василюновское

Образец	S	Fe	Cu	Ag	Au	Te	Hg	Se	Total	пробность	Примечание
1				14.5	83.5		5.9		103.9	803	
2				3.1	97.2				100.2	969	
3			0.7	8.6	92.7				101.9	910	
4				7.4	92.3				99.7	926	Золото в магнетите
5				9.4	90.6				101.7	907	то же
6				8.1	90.8				98.9	918	>>
8				3.9	96.1				100	961	>>
9				23.0	77.0				100	770	>>
10				15.8	86.0				100	845	>>
11				14.7	79.2		6.1		97.8	843	>>
12				17.6	82.4				100	825	>>
13				44.0	44.3		11.7		100	502	На поверхности зерна пирита
14				5.4	94.6				100	947	Золото в халькопирите
15				23.0	72.5				100	759	Золото в пирите
16				15.0	82.1				97.1	846	
17				3.2	97.0				100.2	968	
18				4.4	92.6				97.0	954	
19	14.6			85.4					100		Аргентит
20	11.9	7.2		78.5				2.6	100.2		Селенистый аргентит
21	4.2	4.1	4.8	49.5		38.9			101.5		Гессит в халькопирите

Примечание. Присутствие в анализах Fe, S, Cu обусловлено захватом вмещающей матрицы вследствие малых размеров исследуемых фаз. Анализы выполнены на сканирующем электронном микроскопе (аналитик А.С. Шуйский, Сыктывкар) и на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV с ЭДС JED-2300 (аналитик Л.А. Левицкая, ИГЕМ РАН).



Фиг. 15. Теллуриды золота и серебра в рудах проявления Василиновское. а, б – микровключения гессита и петцита в пирите из полевошпат-кварцевого метасоматита (А9-19); в – Au-Ag-Hg-минералы в гидрооксидах железа, замещающих пирит в кварцево-жильном образовании (А17-01); г, д – микровключения гессита в галените из полисульфидно-кварцевого образования (А11-19); е – Ag-Se-Te фаза в сростании с Cd-сфалеритом в халькопирит-кварцевой жиле (А17-19).

магнетита – самородное олово (3мкм). Содержания золота в рудах составляют, главным образом, десятые доли г/т, реже достигают ~1 г/т (табл. 1); содержания серебра в большинстве случаев составляют первые г/т.

Сфалерит поздних ассоциаций образует единичные ксеноморфные включения (до 50 мкм) в халькопирите. Весь проанализированный сфалерит (табл. 5) оказался Cd-содержащим: он содержит 3–6, вплоть до 22 мас. % Cd. С ним зачастую ассоциирует *гринокит* (табл. 5) – обычный минерал высокотемпературных фумаролл островных дуг и, с другой стороны, он нередко развивается как вторичный по Cd-сфалериту в зонах окисления сульфидных месторождений.

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В СУЛЬФИДАХ ВАСИЛИНОВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ

Профильная (бороздовая) абляция индивидуальных зерен сульфидов (в основном пирита)

и их сростаний методом LA-ICP-MS показала, что для **пирита** всех ассоциаций характерна примесь Co (табл. 6), но количественно его примесь резко преобладает только в магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации (до 1.2 мас. %). Распределение Co в пирите здесь зонально, причем иногда наблюдаются зоны с преобладанием кобальта над железом (возможно, присутствует катерит – CoS_2 , фиг. 16).

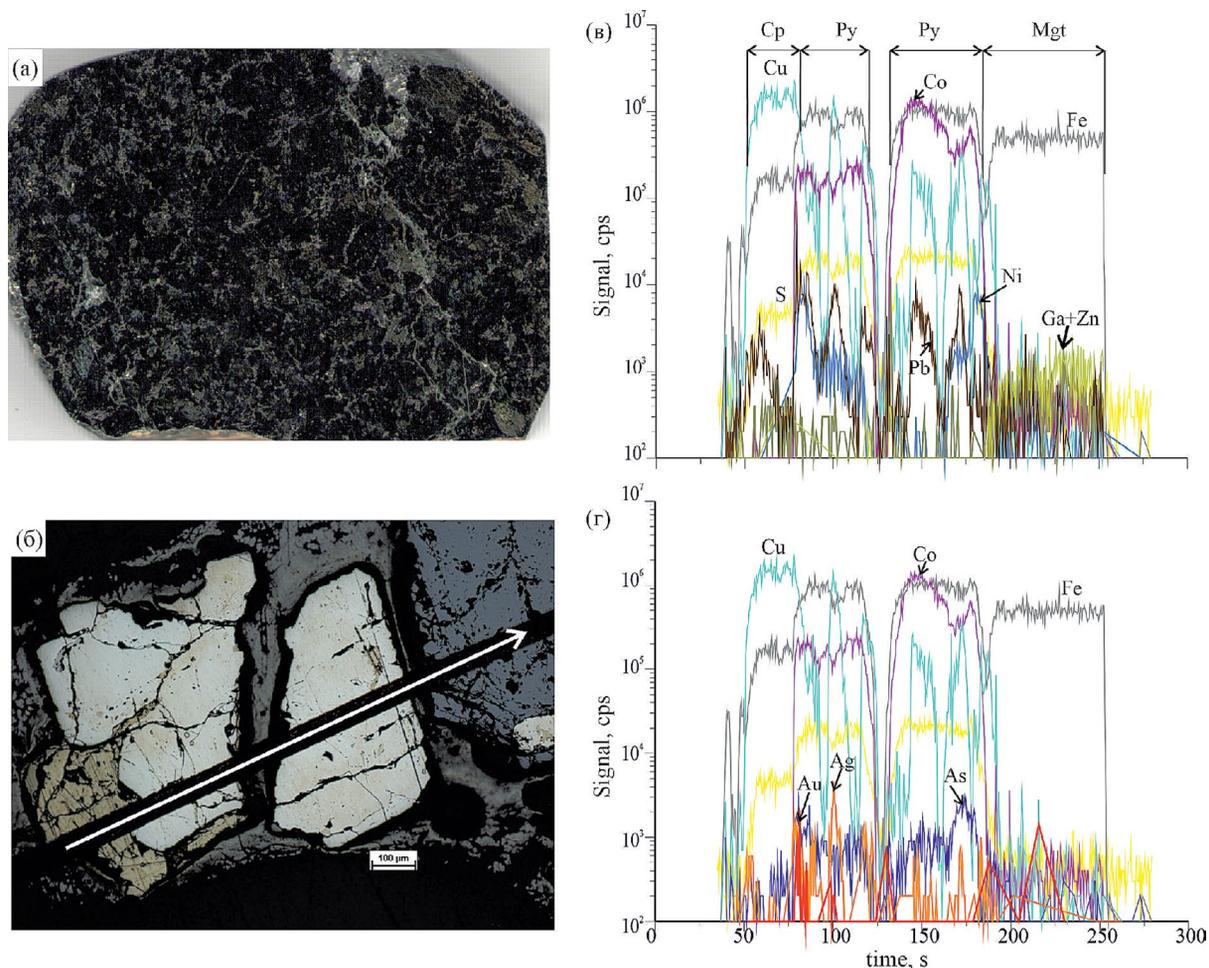
Примесь Ni умеренно высокая (400–800 ppm) в раннем пирите и снижается до 16–90 ppm в более позднем; она распределена неравномерно (фиг. 16, 17). Сходным образом ведет себя As в пирите (в раннем до 790, в позднем 30–40 ppm).

Примесь Se, напротив, возрастает в пирите поздней полисульфидно-полевошпат-кварцевой ассоциации (до 207 ppm). Такие элементы, как Pd, Te, Zn, Cd, Pb, Bi и Ag, Au образуют в пирите разрозненные мелкие минеральные включения и проявляются на профилях отдельными пиками (фиг. 18).

Таблица 5. Состав сфалерита и гринокита (мас. %) рудопроявления Василюновское

№ обр.	Ассоциация, минерал	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Сумма	FeS*	Кристаллохимическая формула																										
1	Магнетит-халькопирит-пиритовая	32.51	2.55	0.00	0.00	1.98	58.99	0.30	3.93	0.00	100.26	4.82	$Zn_{0,89}Fe_{0,04}Cu_{0,03}Cd_{0,03}S_{1,00}$																										
														2	32.70	3.66	0.02	0.00	1.90	56.50	0.37	4.87	0.17	100.19	7.05	$Zn_{0,85}Fe_{0,06}Cu_{0,03}Cd_{0,04}S_{1,0}$													
																											3	32.72	1.16	0.00	0.00	0.52	60.23	0.47	3.99	0.11	99.20	2.20	$Zn_{0,92}Fe_{0,02}Cu_{0,01}Cd_{0,04}S_{1,01}$
5	A-121	33.18	1.30	0.00	0.00	0.76	62.23	0.00	3.17	0.00	100.64	2.40	$Zn_{0,93}Fe_{0,02}Cu_{0,01}Cd_{0,03}S_{1,01}$																										
6		33.25	1.20	0.00	0.00	0.65	61.29	0.00	3.09	0.00	99.48	2.25	$Zn_{0,92}Fe_{0,02}Cu_{0,01}Cd_{0,03}S_{1,02}$																										
7	Полисульфидно-полевошпат-кварцевая	33.44	1.98	0.00	0.00	1.41	58.63	0.00	4.01	0.00	99.47	3.82	$Zn_{0,88}Fe_{0,04}Cu_{0,02}Cd_{0,04}S_{1,02}$																										
8		32.99	1.77	0.00	0.00	1.30	58.47	0.00	4.96	0.00	99.49	3.42	$Zn_{0,89}Fe_{0,03}Cu_{0,02}Cd_{0,04}S_{1,02}$																										
9	A17-01-02	34.17	3.90	0.00	0.00	2.10	54.99	0.60	5.52	—	101.34	7.65	$Zn_{0,81}Fe_{0,07}Cu_{0,03}Cd_{0,05}S_{1,03}$																										
10		32.11	2.61	0.00	0.00	1.80	58.94	0.00	5.98	—	101.48	4.93	$Zn_{0,89}Fe_{0,05}Cu_{0,03}Cd_{0,05}S_{0,99}$																										
11		32.51	2.40	0.00	0.00	0.81	55.07	0.42	5.81	—	97.08	4.85	$Zn_{0,86}Fe_{0,04}Cu_{0,01}Cd_{0,05}S_{1,03}$																										
12		33.09	2.42	0.14	0.00	1.35	59.07	0.42	5.51	—	102.00	4.56	$Zn_{0,85}Fe_{0,04}Cu_{0,02}Cd_{0,05}S_{1,0}$																										
13	A17-19	31.53	3.58	0.00	0.05	2.54	55.00	0.15	5.50	—	98.34	7.09	$Zn_{0,85}Fe_{0,06}Cu_{0,04}Cd_{0,05}S_{0,99}$																										
14		32.69	2.09	0.05	0.11	1.69	56.88	0.36	5.59	—	99.46	4.12	$Zn_{0,86}Fe_{0,04}Cu_{0,03}Cd_{0,05}S_{1,01}$																										
15		29.65	8.70	0.24	0.12	10.43	25.25	0.00	22.47	—	96.85		$Cd_{0,22}Zn_{0,42}Fe_{0,17}Cu_{0,18}S_{1,01}$																										
16		24.92	4.55	0.00	0.08	4.26	10.09	0.15	56.21	—	100.26		$Cd_{0,63}Zn_{0,2}Fe_{0,1}Cu_{0,08}S_{0,98}$																										
17		24.69	4.03	0.18	0.12	4.34	12.12	0.00	52.00	—	97.47		$Cd_{0,59}Zn_{0,24}Fe_{0,09}Cu_{0,09}S_{0,98}$																										
18		27.02	3.70	0.00	0.00	5.40	20.10	0.00	43.80	—	100.00		$Cd_{0,46}Zn_{0,36}Fe_{0,08}Cu_{0,1}S_{1,0}^{**}$																										

Примечание. * — мол.%, остальное — мас.%; **Zn-гринокит; “—” элемент не определялся.

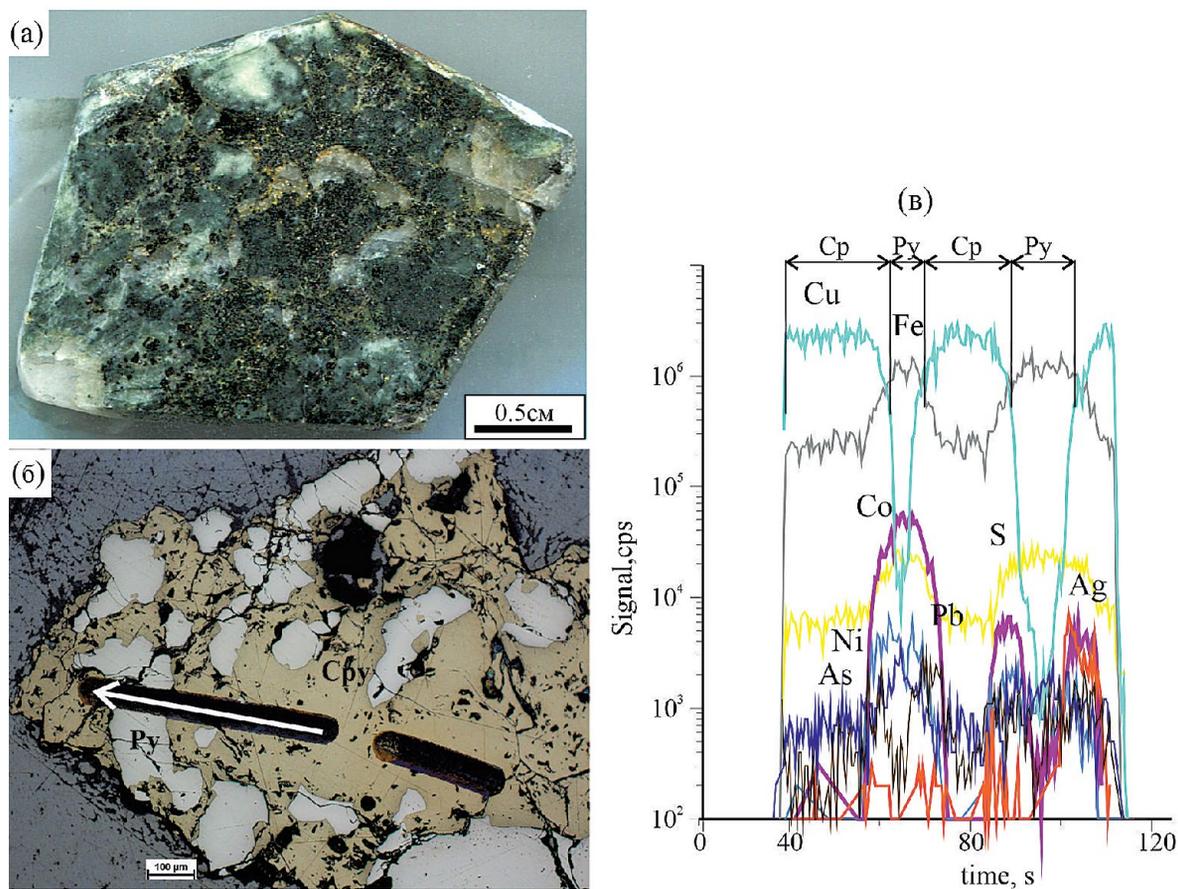


Фиг. 16. Магнетит-халькопирит-пиритовая ассоциация в метагаббро Василювского проявления: пирит-магнетитовая (с подчиненным халькопиритом) вкрапленность с обилием кобальта в пирите. Макро- (а) и микро- (б) фотографии, на (б) – показана линия лазерного прожига; в, г – распределение элементов-примесей в минералах (последовательно пройдены халькопирит→пирит (с участком, обогащенным Со)→магнетит (обр. А-342). Характерно зональное распределение кобальта, вплоть до появления существенно кобальтовых зон. Примесные элементы (Au, Ni, Pb и др.) преимущественно тяготеют к пограничным зонам минералов.

Таблица 6. Среднегеометрическое содержание (ppm) элементов-примесей в пирите Василювского и Подгорненского проявлений

Участок	Ассоциация*	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Te	Pd	Ag	Tl	Pt	Au
Василювское рудопроявление	Магнетит-халькопирит-пиритовая (31)	117	56.2	43.0	5.9	63.7	53.7	0.004	0.009	0.04		0.008	0.002
	Полисульфидно-полевощпат-кварцевая (15)	101	1.8	11.9	0.75	60.4	111	0.14		0.004			0.002
Подгорненский	Средний карьер	Халькопирит-(Со) пирит-кварцевая (4)	2952	26.7	16.0	6.7	82.3	55.0		0.002			
	Южный карьер	Халькопирит-(Со) пирит-кварцевая (20)	2071	3.5	15.2	2.98	57.6	3.04	0.14		0.15	0.65	
		Халькопирит-пирит-кварцевая (17)	10.3	11.4	16.5	3.09	55.8	7.4	0.17		0.12	0.02	

Примечание. * – в скобках количество анализов.



Фиг. 17. Метагаббро Василювского проявления с развитием магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации: пирит-халькопиритовая мелкогнездовая вкрапленность; пирит локально обогащен кобальтом. Макро- (а) и микро- (б) фотографии, на (б) показана линия лазерного прожига; в – распределение элементов-примесей в сростании халькопирит+пирит (обр. А5-19). Примеси Co, As, Ni (коэффициенты парной корреляции 0.6–0.7) локализуются в пирите, причем, зонально; Ag и Pb тяготеют к халькопириту (коэффициенты корреляции Ag-Pb-Cu 0.6–0.8).

В пирите поздней ассоциации (полисульфидно-полевошпат-кварцевой) установлены включения рутила с сагенитовой решеткой и значимой примесью вольфрама, а также ванадия и сурьмы (фиг. 19).

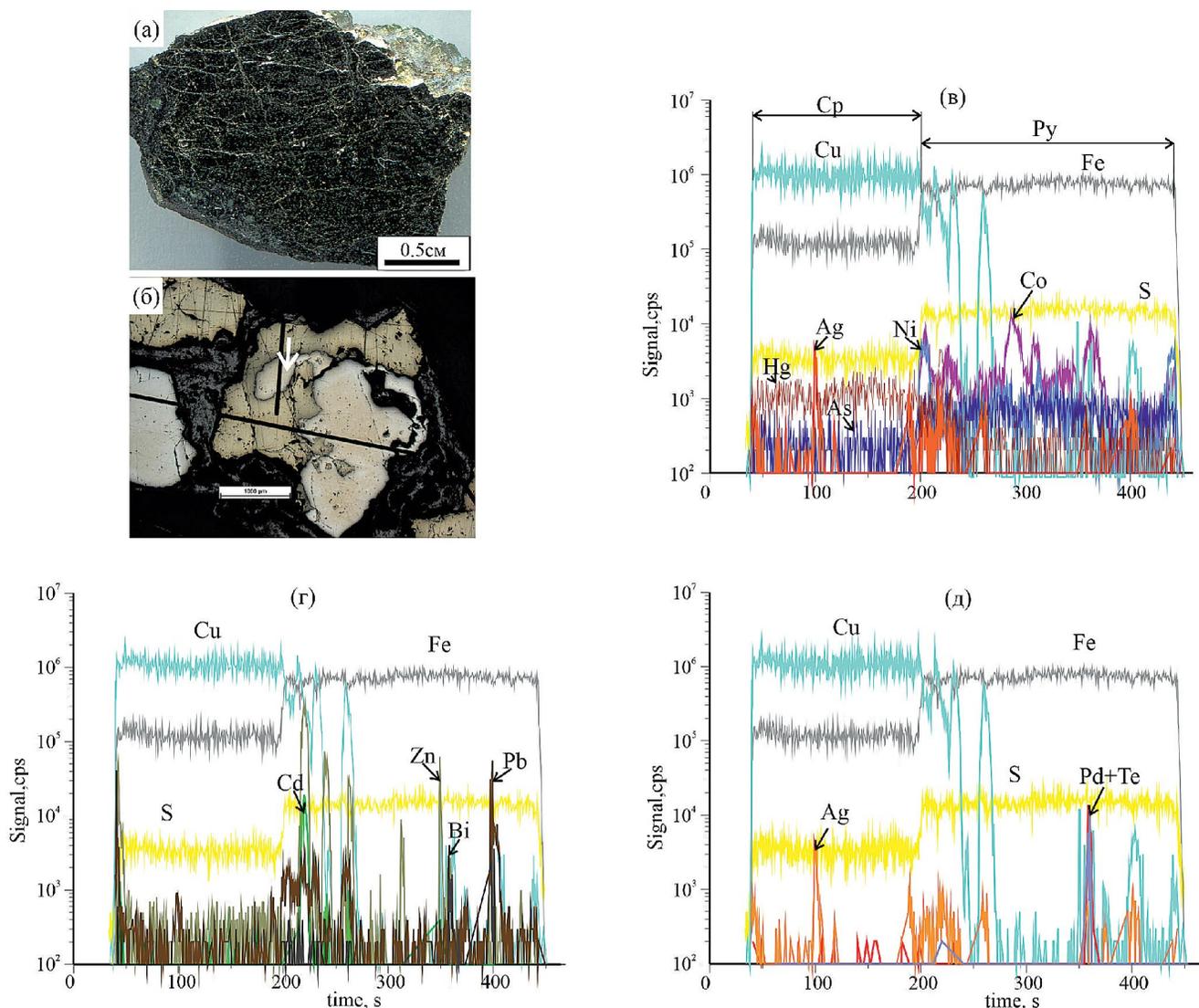
Халькопирит ранней ассоциации в единичных случаях содержит примесь молибдена до 2.4 ppm. “Всплески” содержания Ag в халькопирите всех ассоциаций рудопроявления по данным лазерной абляции довольно часты и составляют 5–50 ppm (фиг. 20). Для халькопирита поздних ассоциаций характерна примесь In (9–10 ppm), Sb (0.5–1.2 ppm) и Se (260–300 ppm).

Пирротин в рудах Василювского проявления встречается редко. Причем в ранних магнетит-халькопирит-пиритовых гнездовых скоплениях пирротин проявляется как более поздний минерал, развивающийся по микротрещинкам в кристаллах пирита (фиг. 21).

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В СУЛЬФИДАХ УЧАСТКА ПОДГОРНЕНСКИЙ

Непосредственно к югу (в ~1.5 км) от Василювского проявления находятся щебеночные карьеры Подгорненского месторождения строительного камня. Участок, отвечающий краевой части Собского батолита (см. фиг. 2), сложен диоритами и подчиненными габбро. В ходе осмотра карьеров в них были установлены зоны сильных вторичных изменений и сульфидная минерализация; они были опробованы (фиг. 22).

В отличие от Василювского проявления, в Подгорненском наблюдались две хорошо выраженные системы крутопадающих кварцевых жил: субмеридиональная и субширотная. Первая система выполнена жилами массивного однородного ожелезненного кварца, мощность которых в раздувах достигает 80 см. Вторая проявлена

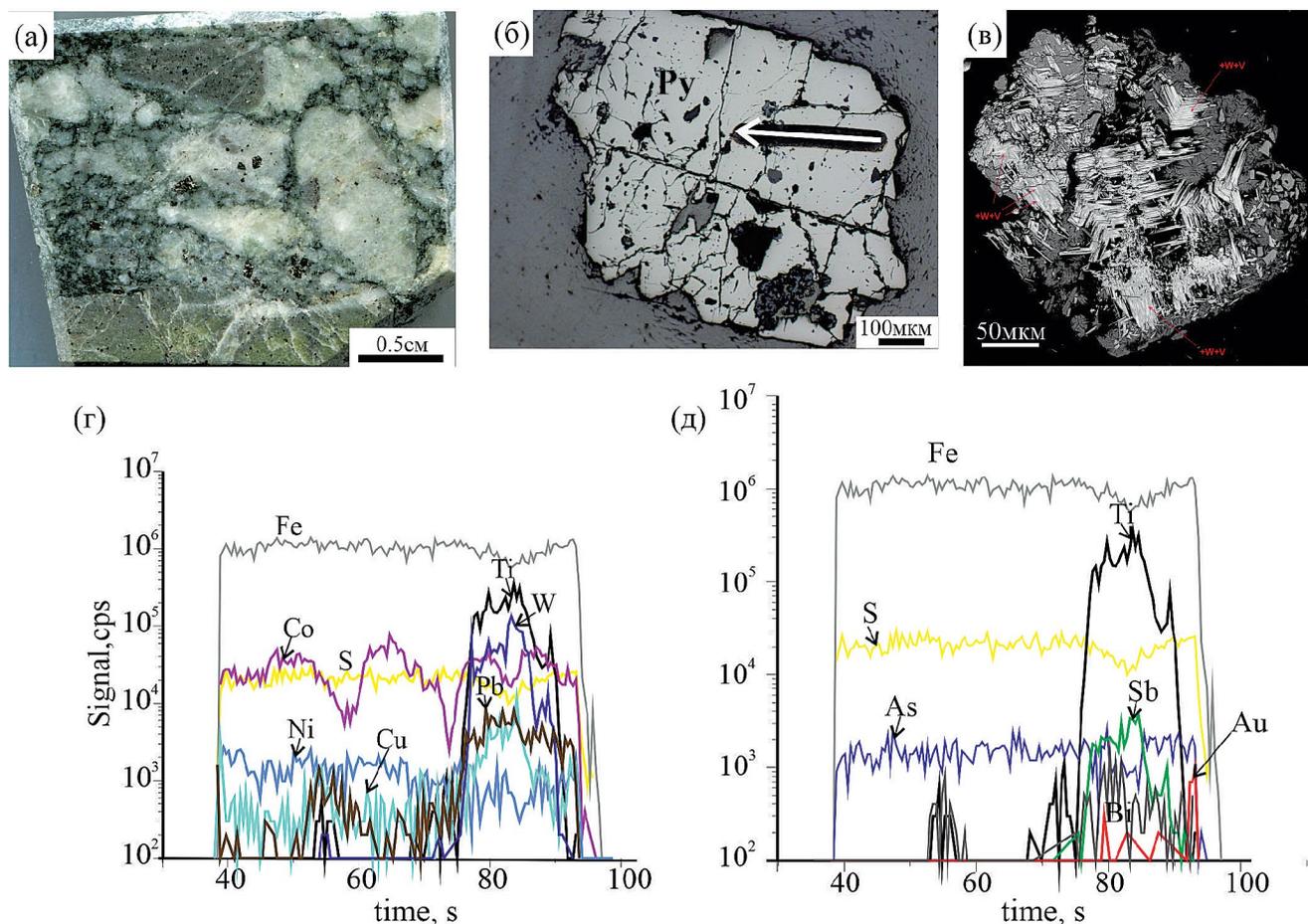


Фиг. 18. Метагаббро Василювского проявления с мелкогнездовой вкрапленностью пирита и халькопирита, насыщенных различными микровключениями, из магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации. Макро- (а) и микро- (б) фотографии, на (б) – показана линия лазерного прожига; в–д – распределение элементов-примесей в сростани халькопирит → пирит (показано на г и д по группам элементов для большей наглядности). Примеси Ag и Hg тяготеют к халькопириту; As, Co и Ni концентрируются в пирите, причем Co – зонально; в пирите встречаются включения сфалерита (пики Zn + Cd) и галенита (г) и теллуридов палладия (д) (обр. А-121).

в центральной части нижнего горизонта Южного карьера в виде системы субпараллельных жил мощностью до 20–30 см каждая, сложенных серым халцедоновидным кварцем с содержанием сульфидов до 60 об. % (фиг. 23). Исследование гидротермально-метасоматических образований данного рудопоявления указывает на более позднее отложение Au-Ag минерализации, запаздывающее по отношению к основному здесь медно-железо-скарновому гнездово-вкрапленному оруденению. На верхнем горизонте эта система жил также проявлена, но ее прожилки имеют значительно меньшую мощность (до 5–10 см), и сульфиды

(главным образом пирит) превращены в зоне гипергенеза в черный пластичный материал.

В целом, сульфидность в жильных и метасоматических образованиях участка Подгорненский 3–5 об.%; широко распространены жильные образования, сложенные халцедоновидным кварцем. По данным пробирного анализа, содержание в рудах составляет Au 0.007 ppm и Pd 0.003–0.011 ppm, а по результатам лазерного сканирования в пирите изредка встречается примесь ~0.3–1.1 ppm Pt (фиг. 24), т.е., в целом, геохимическая специализация минерализованных

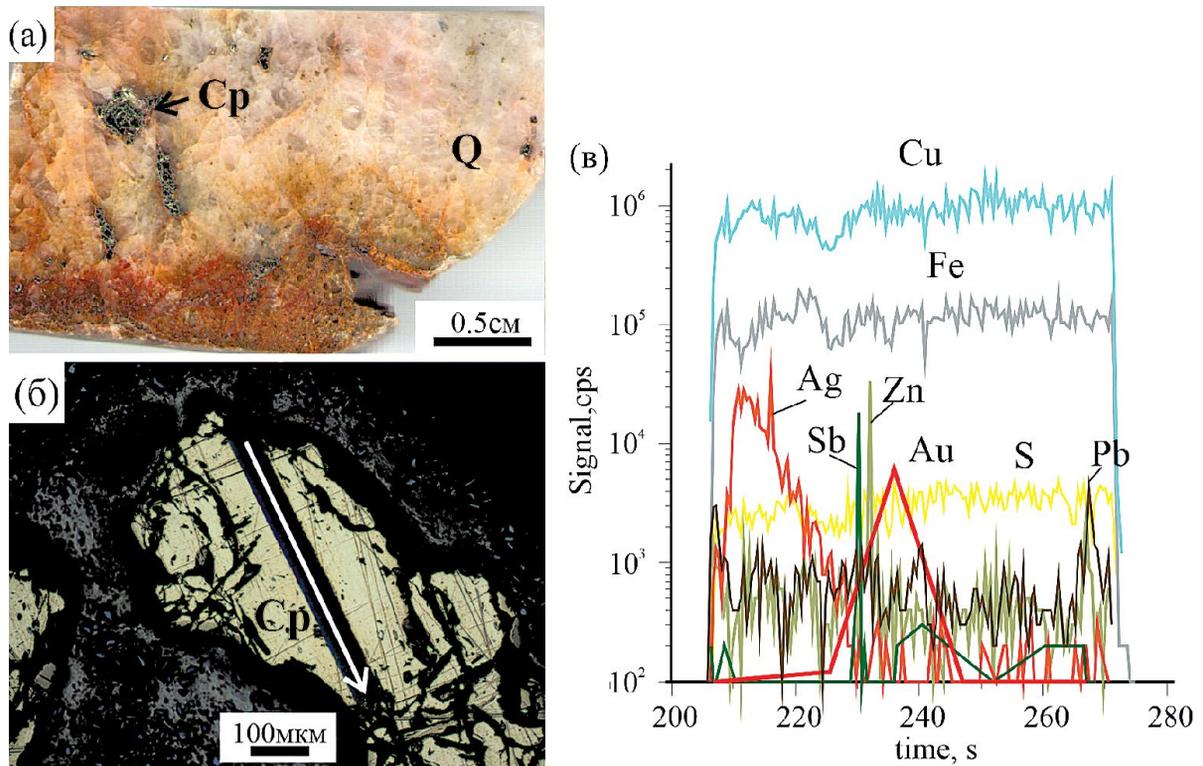


Фиг. 19. Полисульфидно-полевошпат-кварцевая ассоциация в сильно измененном (альбитизация, окварцевание, эпидотизация) габбро с пиритовой вкрапленностью. Макро- (а) и микро- (б) фотографии, на (б) – показана линия лазерного прожига; в – бывший титаномagnetит, представленный сростаниями магнетита, ильменита и рутила; г, д – распределение элементов-примесей в пирите (обр. А9-19). Характерны зональное распределение Co и Ni, высокие значения коэффициентов парной корреляции между As, Co, Ni – 0.7–0.8. Обнаруженные на сканирующем микроскопе зерна рутила с зонами, обогащенными W, V и Sb, на лазерном профиле проявились пиками Ti, W, Sb, а также Pb и Cu, между которыми значения коэффициентов корреляции составляют 0.6–0.9.

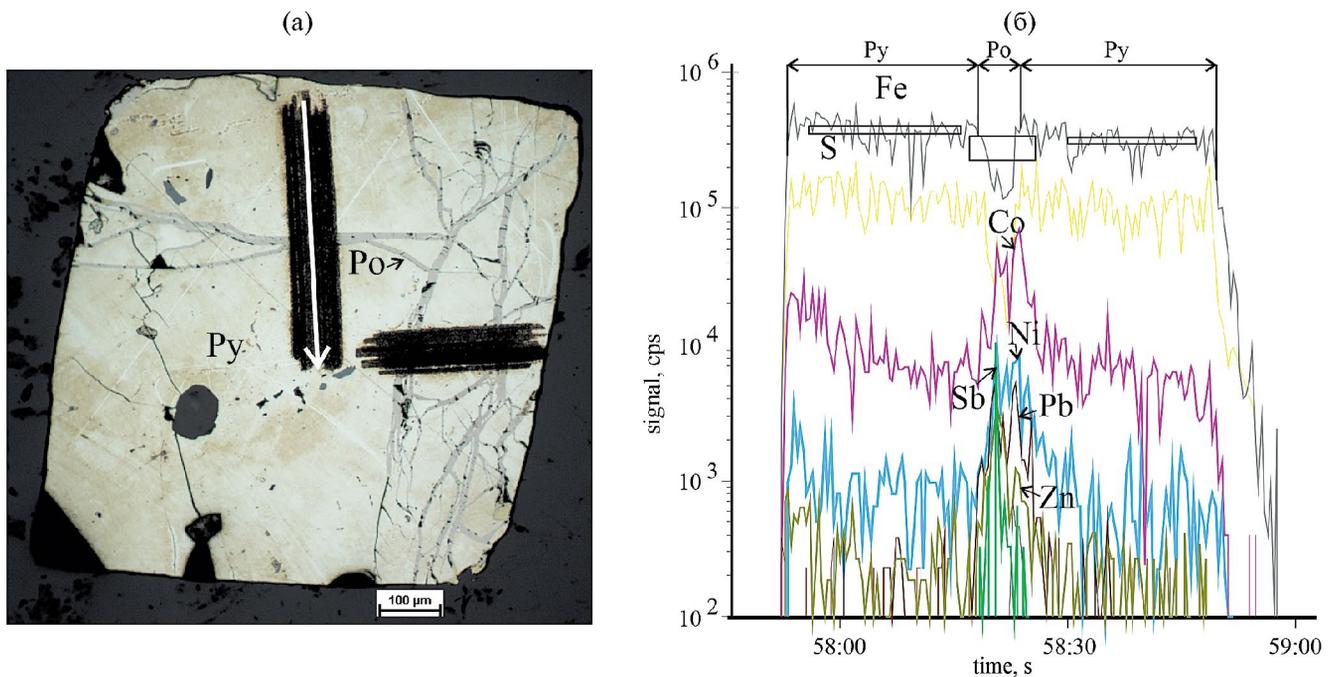
Таблица 7. Среднегеометрическое содержание (ppm) элементов-примесей в халькопирите Василюновского и Подгорненского проявлений

Участок	Ассоциация*	Co	Ni	Zn	As	Se	Ag	Cd	In	Sn	Te	Tl	Bi
Василюновское рудопроявление	Магнетит-халькопирит-пиритовая (24)	0.05	0.03	139	102	131	1.9	0.2	0.3	0.03			0.04
	Полисульфидно-полевошпат-кварцевая (11)	0.1	0.1	228	106	256	8.9	3.7	8.5	0.1			0.02
Подгорненский	Средний карьер Халькопирит-(Co) пирит-кварцевая (13)	0.02	0.02	210	135	181	2.9	1.8	5.7	0.1			0.04
	Южный карьер Халькопирит-пирит-кварцевая (15)	0.07	0.3	706	70	2.4	20.6	8.8	0.1	0.5	2.7	0.02	0.09

Примечание. * – в скобках количество анализов.



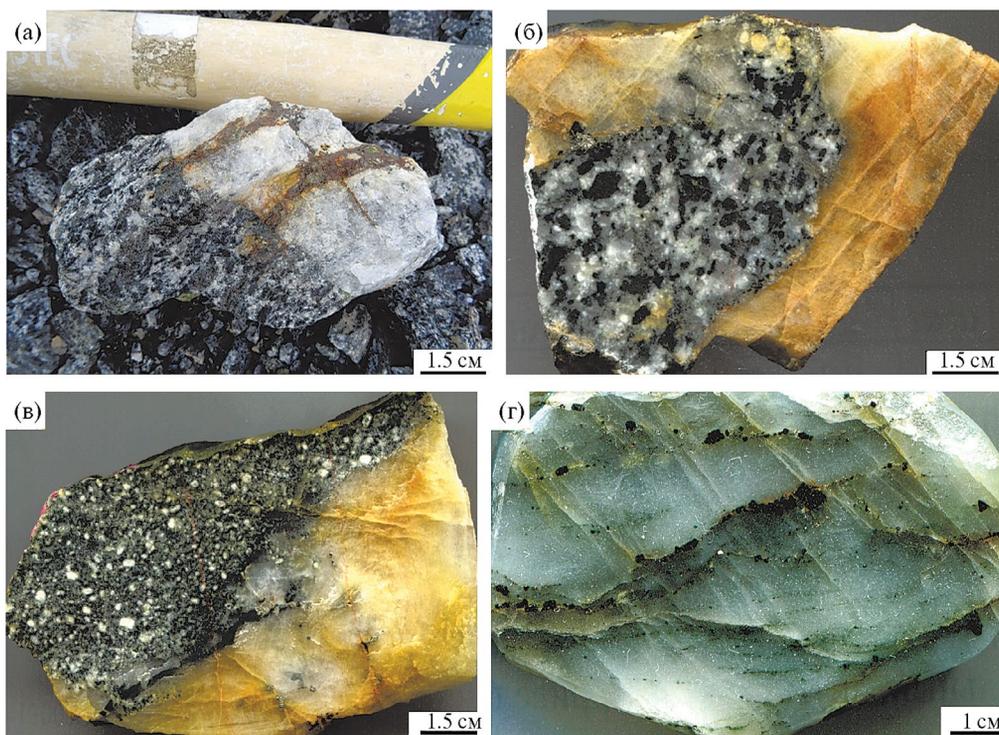
Фиг. 20. Распределение элементов-примесей в халькопирите полисульфидно-карбонатно-кварцевой ассоциации Василиновского рудопоявления. а – сульфидно-кварцевая жила; б – профиль лазера; в – распределение элементов по профилю (обр. А17-01). Высокая корреляционная зависимость (0.8) только между Cu и In, остальные всплески – минеральные включения. Усредненные содержания составляют: Au = 0.23 ppm, Ag = 8.32 ppm, In = 10.8 ppm, Se = 291 ppm.



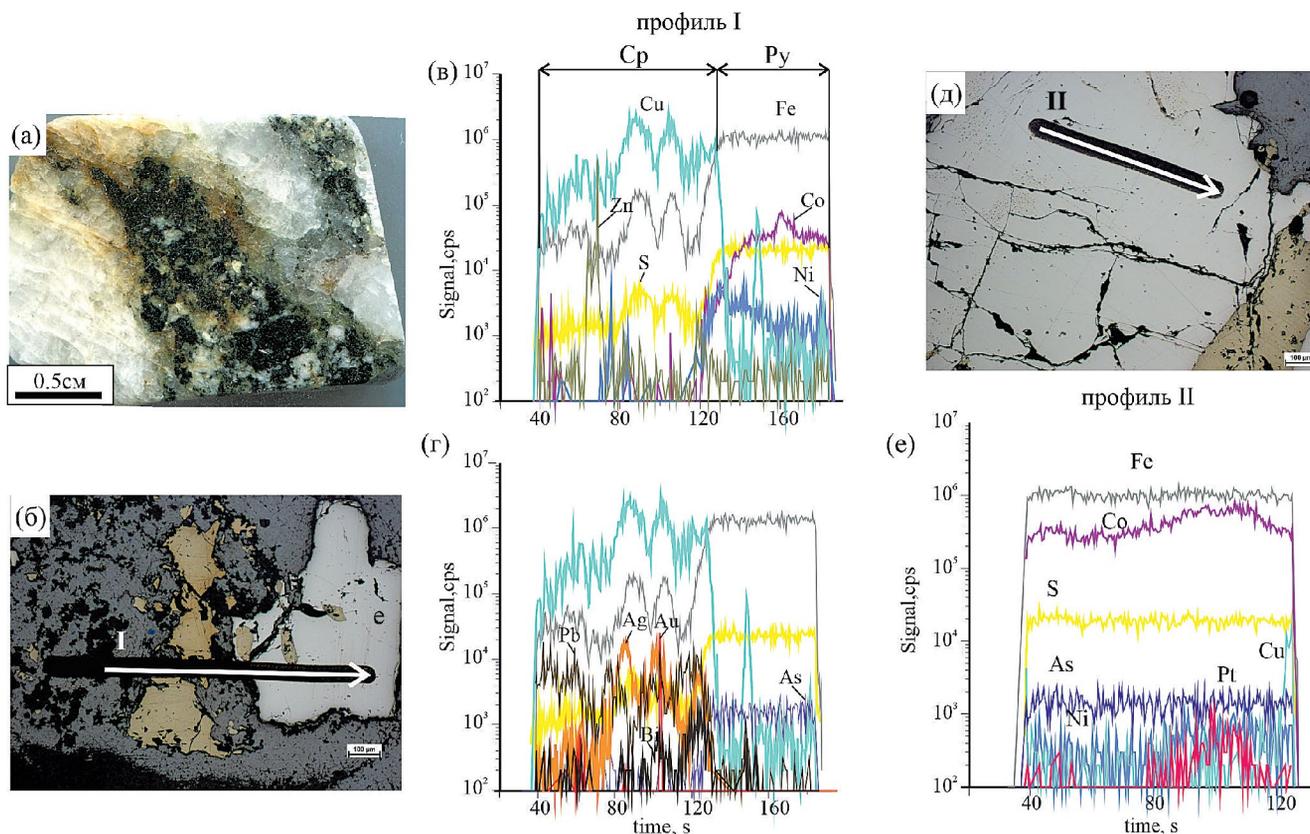
Фиг. 21. Элементы-примеси в пирите с микропрожилками пирротина из магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации: Co = 151–628 ppm, Ni = 151–1019 ppm, Sb = 0–6.6 ppm. Максимальные содержания примесей приурочены к пирротинным микропрожилкам (обр. 1228).



Фиг. 22. Схема отбора каменного материала на карьерах участка Подгорненский (справа – карьер Средний, слева – Южный).



Фиг. 23. Типы гидротермальных образований участка Подгорненский и их взаимоотношения с магматическими образованиями. а – разнейсованные габброиды пересекаются кварцевой жилой (5 см), которая, в свою очередь, вкрест простирается пересечена субпараллельными сульфидными прожилками; б – фрагмент габброидов цементируется железненным кварцем (обр. А3-4-19); в – поздняя порфировидная дайка пересекается кварцем (обр. А3-11-19); г – фрагмент жилы халцедоновидного кварца с линейной сульфидной вкрапленностью (обр. А3-12-19).



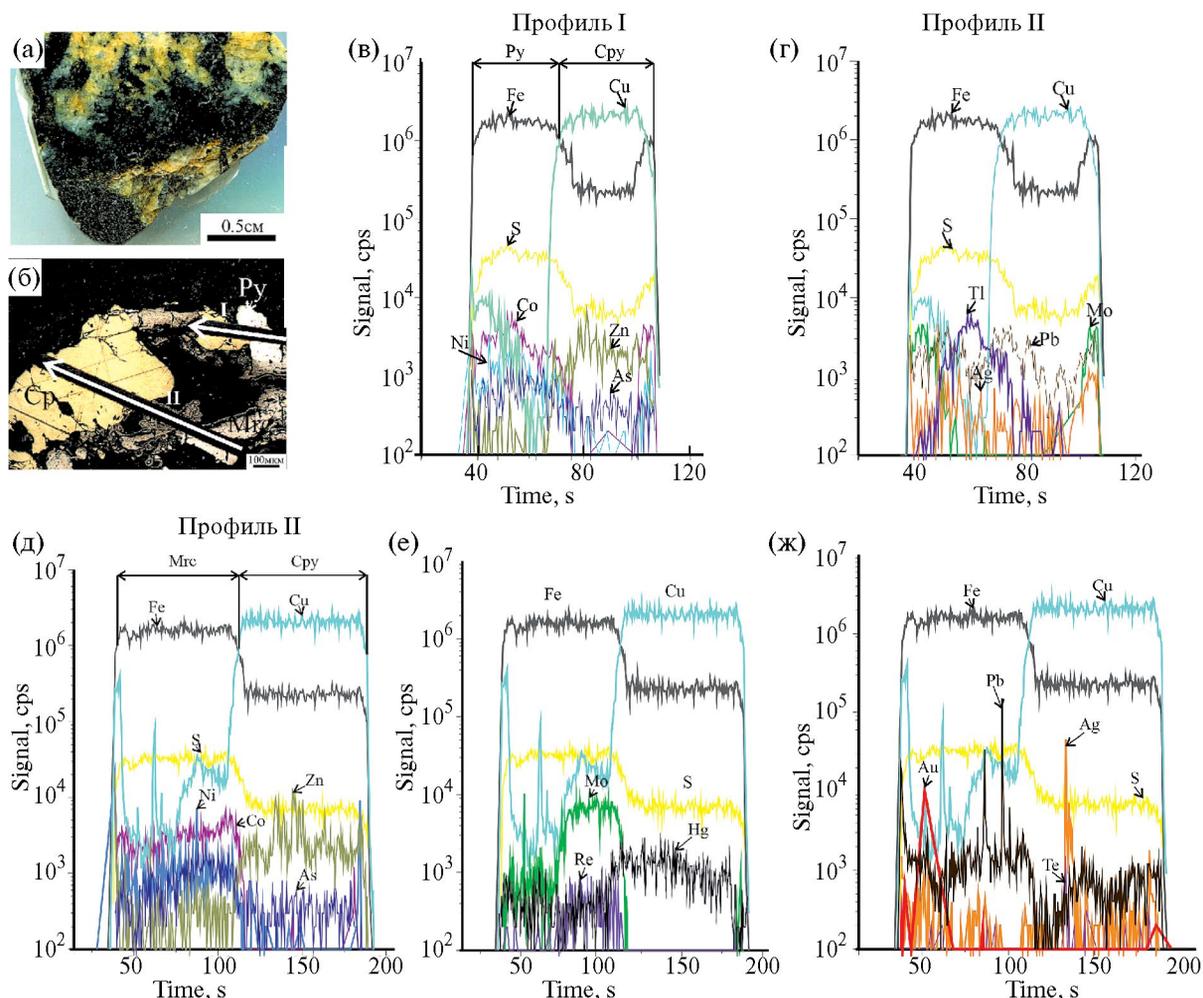
Фиг. 24. Распределение содержаний элементов-примесей в пирите и халькопирите из кварцевых жил (а, б) Средне-го карьера участка Подгорненский (обр. А2-8-19). Au, Ag, Pb, Zn локализованы в халькопирите и, вероятно, представляют собой минеральные микровключения (Ag = 2.3 ppm, Au = 0.23 ppm); Co, As, Ni – приурочены к пириту, и их концентрации распределены относительно равномерно. Обнаружены следы висмута по контакту пирита и халькопирита (в, г), а также примесь Pt = 0.29–1.08 ppm и Pd = 0.24 ppm в пирите профиля II (д, е).

пород участка Подгорненский в чем-то сходная с Василювским рудопроявлением.

Исследования сульфидов участка Подгорненский методом лазерной абляции показали, что, в отличие от сульфидов Василювского проявления, в них постоянно присутствует примесь Mo (вплоть до микровключений молибдита), Te (до 35 ppm), реже Re (0.3 ppm) (фиг. 25). В халькопирите – устойчивые примеси Ag до 65 ppm, Cd до 35 ppm и Sn до 65 ppm. В отличие от Василювского проявления, в сульфидах Подгорненского имеется незначительная примесь Tl. Содержания золота выше порога определения единичные и достигают 0.23 ppm.

Пирротин участка Подгорненский (фиг. 26) образует вкрапленность в габброидах, причем по характеру взаимоотношений минералов можно предполагать более позднее замещение пирита халькопиритом и пирротинном, что, вероятно, отражает повышение температуры в связи с какими-то более поздними процессами.

Элементы-примеси в пирротине и его сростаниях ведут себя похожим образом во всех рудных ассоциациях: для пирротина характерна существенная примесь Co (0.0n–0.n мас. %) и Ni (до 0.n мас. %); для халькопирита типична примесь Ag, максимальная для Подгорненского (до 9 ppm), и там же постоянно присутствует примесь Bi до 11 ppm. Серебро во всей выборке анализов пирротина имеет высокую корреляцию с медью, равную 0.6. Для сростаний пирит-пирротин и пирротин-халькопирит характерно существенное повышение содержаний и увеличение разнообразия элементов-примесей в зоне контакта минеральных фаз. Так, в области микропрожилков пирротина в кристалле пирита (см. фиг. 21) наряду с Co и Ni появляются пики Sb, Pb и Zn. И наибольшим разнообразием элементов и уровнем их содержаний характеризуется зона контакта зерен в обр. А3-22 Подгорненского участка (фиг. 26): так содержание Ag возрастает до 97 ppm, появляются Te – 22 ppm и Au – 0.7 ppm. Возможно, имеются микровключения гессита. Таким образом,



Фиг. 25. Распределение элементов-примесей в пирите, марказите и халькопирите (а, б) участка Подгорненский (обр. АЗ-15-19). Для пирита и марказита характерны примеси Co, Ni и As (в, д). В пирите появляется небольшая примесь Tl = 0.45 ppm (г), а в марказите Au = 0.02 ppm (е). Для халькопирита характерна равномерная примесь Hg = 37.5 ppm, иногда цинка, с которым коррелирует примесь Cd = 2.21 ppm и In = 0.34 ppm. В халькопирите, вероятно, имеются включения гессита (е), корреляция Ag-Te = 0.8. Содержание Ag = 23.5 ppm, Te = 29.1 ppm. Иногда на границе минералов появляются пики содержаний Mo (до 50.8 ppm) и, соответственно, Re = 0.16 ppm (г, ж), что подтверждено находками молибденита в аншлифах.

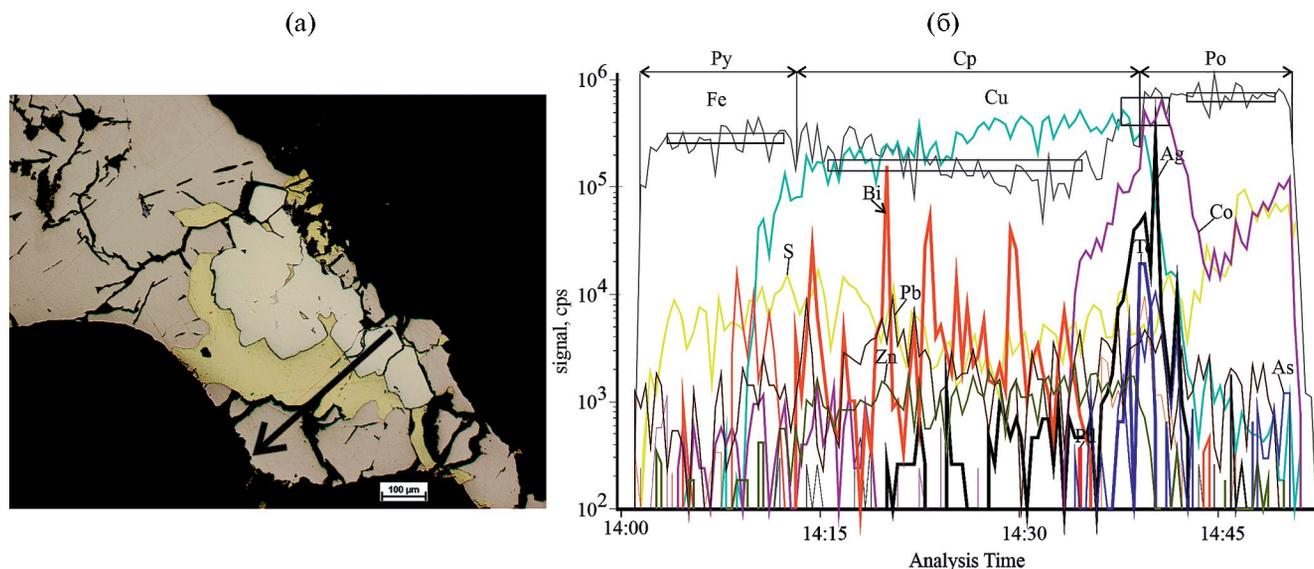
вероятнее всего, образование пирротина связано с какими-то более поздними, возможно, локальными процессами, что привело к перераспределению (“отгонке” к контактам минеральных фаз) элементов-примесей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ Au-Pd МИНЕРАЛИЗАЦИИ В МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

Химический анализ выборочных образцов руд из обоих проявлений с различным содержанием сульфидов (см. табл. 1) показал, что платиноиды тяготеют к измененным темноцветным

породам – метагабброидам, где их содержания достигают 1.4 г/т Pd и 0.2 г/т Pt. В кварцевых жилах даже при достаточно высокой сульфидности содержание ЭПГ существенно ниже, но концентрация Au возрастает. Поведение Ag, возможно, двояко: оно связано как с золотом, так и с медью. Уровень содержания As в рудах не высок, как и на других изученных месторождениях района (Петропавловское, Новогодне Монто), тогда как медный профиль руд выражен более или менее отчетливо (см. табл. 1).

Таким образом, габброиды кэршорского комплекса и развитые по ним гидротермально-метасоматические образования Василиновского проявления характеризуются Pt-Au-Pd-Co



Фиг. 26. Замещение пирита халькопирит-пирротиновым зональным агрегатом. Профиль через три минерала показывает, что в пирите – минимальное содержание (кроме Co и Ni) и разнообразие примесей: Co = 17.8 ppm, Ni = 23 ppm, Bi = 4.8 ppm, Ga = 2.3 ppm, Ag = 0.25 ppm, Te = 2.5 ppm; в халькопирите: Co = 7.9 ppm, Bi = 11.3 ppm, Ga = 14.9 ppm, Ag = 8.8 ppm, Te = 1.6 ppm; контакт халькопирита и пирротина характеризуется максимальными содержаниями Co = 1187 ppm, As = 35 ppm, Ag = 97.4 ppm, Te = 22.2 ppm, Au = 0.7 ppm; в пирротине Co = 350 ppm, Ag = 1.3 ppm, Te = 5.6 ppm, Au = 0.3 ppm (обр. АЗ-22-1).

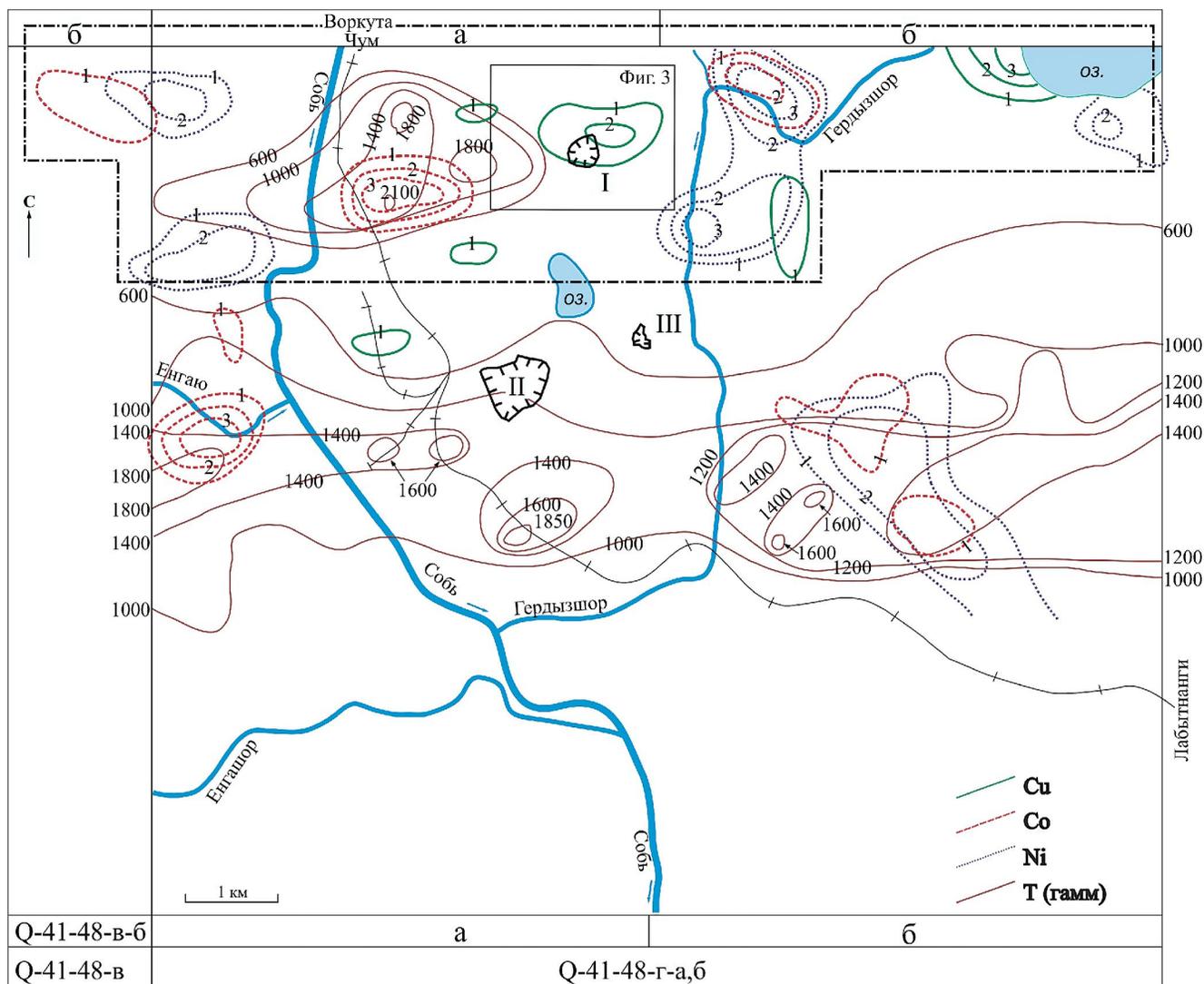
специализацией с второстепенной ролью титана, ванадия, никеля, меди и серебра. Тогда как в карьере Подгорненском вскрыта, вероятно, верхняя часть скарново-порфировой гидротермальной системы с халцедоновидным кварцем и более выраженной медной геохимической специализацией (Cu, Au, Ag ± W, Bi, Sn, Mo, Re). Насыщенность габброидов, относимых к кэршорскому комплексу, сульфидной вкрапленностью, обилие литогеохимических ореолов меди, никеля и кобальта (геохимическая специализация норильского типа), а также интенсивные магнитные аномалии в Василюновском рудном поле (фиг. 27) указывают на его высокую перспективность в отношении благороднометалльной минерализации (Pd, Pt, Au, Ag). Предварительно можно говорить о высокой вероятности обнаружения здесь в широтной полосе 2.5×12 км (в основном габброиды и подчиненные пироксениты) крупных Au-Pd рудопроявлений. Действительно, пробы, отобранные в этой полосе (к западу и востоку от карьера Амфиболитового), содержат повышенное количество магнетита и сульфидов; в большинстве образцов присутствуют обильные присыпки малахита.

Исследование гидротермально-метасоматических сульфидизированных образований Au-Cu профиля на участке Подгорненский, расположенном в 1.5 км к югу от Василюновского

проявления и локализованом преимущественно в кварцевых диоритах собского комплекса, отчасти подтверждает – в целом для рудного поля – предположение о наложенном характере Au-Ag минерализации, связанной здесь, в диоритах, с субмеридиональной и субширотной крутопадающими системами кварцевых жил с второстепенными сульфидами. А появление, наряду с Au и Ag, в пирите, марказите и халькопирите участка Подгорненский, таких элементов-примесей, как Te (до 22 ppm), Bi (до 11 ppm), а также Mo (до 51 ppm) и сопутствующего Re (0.3 ppm), поддержанное находками молибденита в аншлифах, подтверждает скарново-порфировую природу данной сульфидной минерализации, подобную развитой на недалеко расположенном Au-Fe-скарновом месторождении Новогоднее-Монто (Soloviev et al., 2012; Vikentyev et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие в габброидах кэршорского комплекса Pt-Pd малосульфидной минерализации вносит важный вклад в изучение платиноносности Полярного Урала: юго-восточная краевая часть офиолитовых массивов, сложенная габбро и амфиболитами и контактирующая с Собским батолитом, несет рассеянную Pt-Pd (\pm Cu, Au)



Фиг. 27. Схема расположения вторичных ореолов рассеяния меди, никеля, кобальта и изолиний магнитного поля района Василювского Au-Pd проявления в окрестностях пос. Харп (по материалам геологической съемки м-ба 1:50000, 1970–1974 гг.). Римскими цифрами обозначены карьеры строительного камня: I – Амфиболитовый, II–III – участок Подгорненский (карьеры II – Южный, III – Средний). Цифрами внутри контуров вторичных ореолов обозначены уровни значений функции распределения (степени достоверности аномалий): 1 – 0.95, 2 – 0.99, 3 – 0.99 и более. Изолинии интенсивности магнитного поля в гаммах (600, 1000, 1200 и т.д.) показаны коричневым цветом. Штрихпунктирной линией очерчены контуры прогнозируемого Василювского рудного поля. За рамкой карты указаны номенклатуры полистной разграфки карт, принятой в Министерстве природных ресурсов РФ.

минерализацию. Платино-палладиевая минерализация Василювского проявления развита, в основном в метагаббро, и чем-то она напоминает рудные зоны Волковского месторождения, приуроченного к габброидам Тагило-Баранчинского базит-ультрабазитового массива (Средний Урал) (Полтавец и др., 2006; Аникина, Алексеев, 2010), который входит в состав Платиноносного пояса Урала (Иванов и др., 2007; Пушкарев и др., 2020). Данные габброидные породы относятся на последних картах Полярного Урала (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014) к кэршорскому

комплексу, хотя включение большей части этих габброидов в данный комплекс спорно (Шмелев, Мон, 2013). Полоса их развития (с подчиненными пироксенитами) в геохимических полях подчеркнута ореолами Cu, Ni и Co (металлогеническая специализация норильского типа), наличие которых, наряду с четко выраженными магнитными аномалиями, позволяет расширить перспективы рудопроявления.

Таким образом, зоны малосульфидной минерализации в габброидах, амфиболитах и в развитых по ним гидротермально-метасоматических

образованиях Василюновского проявления имеют Pt-Au-Pd специализацию. Рудные макрокомпоненты в минерализованных породах присутствуют в субпромышленных концентрациях (мас. %): Си до 1, V до 0.2, Со до 0.06, Ni до 0.02; их распределение крайне неравномерное, есть многочисленные спорадические подсечения, но сколь-нибудь крупные рудные тела пока не оконтуриваются.

По данным пробирного анализа, содержания Pd в валовых пробах с сульфидной вкрапленностью достигают 1.4 г/т, Pt 0.2 г/т, а Au – 0.8 г/т; по данным лазерного микроанализа (LA-ICP-MS), в пирите содержится до 1 ppm Pt. Минералы ЭПГ представлены обильными выделениями микронного размера теллуридов палладия – меренскиита PdTe₂, темагамита Pd₃HgTe₃, котульскита PdTe, антимонидов палладия – стибиопалладинита Pd₅Sb₂, садбериита PdSb, а также иных минералов благородных металлов – сопчеита Ag₄Pd₃Te₄, мончеита PtTe₂, изомертиита Pd₁₁Sb₂As₂ самородного осмия и некоторых других. В составе благороднометаллической минерализации, помимо минералов ЭПГ, отмечаются самородное золото, ртутистое золото, аргентит, селенистый аргентит, гессит, самородное серебро. По минеральному составу и геохимическому спектру Pt-Au-Pd-Co ± Ni-Cu-V-Ti малосульфидная платиноидная минерализация Василюновского проявления довольно сильно контрастирует с зонами малосульфидной минерализации (+халцедоновидный кварц) со специализацией Fe-Cu-Au-Ag (±W, Bi, Sn, Mo, Re), которые вскрыты в 1.5 км южнее Подгорненским карьером строительного камня (в диоритах собского комплекса) и, вероятно, принадлежат уже скарново-порфировой золотоносной системе, связанной с диоритоидами собского и конгорского комплексов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны ЦКП “ИГЕМ-аналитика” (LA-ICP-MS, В.Д. Абрамова, РСМА, Е.В. Ковальчук, СЭМ с ЭДС, Л.А. Левицкая), ЦКП “Геонаука” ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар и ИЭМ РАН г. Черноголовка (СЭМ с ЭДС, Д.А. Варламов), М.А. Якушику и А.П. Кондриковой за помощь и поддержку в исследованиях, а Р.И. Шайбекову и Т.П. Майоровой за обсуждение отдельных положений работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 23-17-00266.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.В. Прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла как основа для выделения перспективных площадей в пределах Малоуральского вулканоплутонического пояса Полярного Урала и обоснования постановки на них поисковых работ // Руды и металлы. 2021. № 2. С. 6–24.
- Аникина Е.В. Платиноиды в хромовых рудах Войкаро-Сыньинского и Райизского массивов (Полярный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 1994. 27 с.
- Аникина Е.В., Алексеев А. Минералого-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала) // Литосфера. 2010. № 5. С. 75–100.
- Безмен Н.И., Еремин Н.И., Наразаули И.Г., Позднякова Н.В., Сергеева Н.Е. Пирит-халькопиритовый геотермометр: распределение кобальта // Геохимия. 1978. № 3. С. 384–389.
- Бетехтин А.Г. Платина и другие минералы платиновой группы. М.; Л.: АН СССР, 1935. 148 с.
- Викентьев И.В., Абрамова В.Д., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Ковальчук Е.В., Бортников Н.С. Микропримеси в пирите золото-порфиорового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Докл. РАН. 2016. Т. 470. № 3. С. 326–330
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Соболев И.Д., Абрамова В.Д., Выхристенко Р.И., Трофимов А.П., Хубанов В.Б., Грознова Е.О., Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. Золото-порфиоровое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Викентьев И.В., Иванова Ю.Н., Нафигин И.О., Бортников Н.С. Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: Первый опыт современного космического зондирования Земли // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 115–122.
- Викентьев И.В., Тюкова Е.Э., Мокрый В.Д., Иванова Ю.Н., Варламов Д.А., Шуйский А.С., Грознова Е.О., Соболев И.Д., Бортников Н.С. Платино-палладиевое рудопроявление Василюновское: новый тип благороднометаллической минерализации на Урале // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 45–55.
- Генкин А.Д. Последовательность и условия образования минералов платиновой группы в Нижне-Тагильском дунитовом массиве // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 41–48.

- Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Шахова С.Н.* Платиноиды хромитиносных массивов Полярного Урала. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
- Еремин В.П., Пономарев В.Г.* Результаты поисково-съёмочных работ м-ба 1 : 50 000, проведенных на Полярном Урале в районе среднего течения рек Сось и Малый Ханмей (отчет Подгорной ПСП, 1970–73 гг.). Пос. Полярный, 1973 (ТФИ по ЯНАО).
- Заварицкий А.Н.* Отчет об исследованиях в платиноносном районе Н.-Тагильского округа в 1908 г. // Зап. Горн. ин-та. 1909. Т. 2. Вып. 3. С. 189–212.
- Заварицкий А.Н.* Перидотитовый массив Рай-Из в Полярном Урале. М.-Л.: Гос. науч.-тех. геол.-развед. изд., 1932. 221 с.
- Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Сер. Зап.-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард. Об. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Иванов К.С., Волченко Ю.А., Коротеев В.А.* Природа Платиноносного пояса Урала и его хромит-платинометаллических месторождений // Докл. РАН. 2007. Т. 417. №3. С. 369–373.
- Иванов О.К.* Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала (Минералогия, петрология, генезис). Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1997. 488 с.
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В.* Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн лет // Бюлл. МОИП. Отдел Геол. 2014. № 5. С. 56–70.
- Кузнецов С.К., Онищенко С.А., Котельников В.Г., Филиппов В.Н.* Медно-золото-палладиевая минерализация в ультрабазитах Полярного Урала // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 67–69.
- Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Молошаг В.П.* Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2021. Т. 21. № 5. С. 643–659.
- Полтавец Ю.А., Сазонов В.Н., Полтавец З.И., Нечкин Г.С.* Закономерности распределения благородных металлов в рудных парагенезисах Волковского габбрового массива (Средний Урал) // Геохимия. 2006. № 2. С. 167–190.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф.* Хром-платиновое оруденение Нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.
- Пушкарев Е.В., Готтман И.А., Травин А.В., Юдин Д.С.* Время завершения ультраосновного магматизма в Платиноносном поясе Урала // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. №2. С. 45–50.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И., Генералов В.И., Потапов И.Л.* Новый тип золотоплатинометаллического оруденения на Полярном Урале // Изв. КомиНЦ УрО РАН. 2010. Вып. 2. С. 48–53.
- Пыстин А.М., Потапов И.Л., Пыстина Ю.И., Генералов В.И., Онищенко С.А., Филиппов В.Н., Шлома А.А., Терешко В.В.* Малосульфидное платинометаллическое оруденение на Полярном Урале. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 152 с.
- Савельева Г.Н., Батанова В.Г., Бережная Н.А., Пресняков С.Л., Соболев А.В., Скублов С.Г., Белоусов И.А.* Полихронное формирование мантийных комплексов офиолитов (Полярный Урал) // Геотектоника. 2013. № 3. С. 43–57.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др.* Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Соболев И.Д., Викентьев И.В., Травин А.В., Бортников Н.С.* Каменноугольный магматизм Полярного Урала // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 2. С. 22–28.
- Шайбеков Р.И., Губарев И.А., Тропников Е.М.* Вассилиновское рудопроявление – новый медно-золото-платиноидный объект на Полярном Урале (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514 (1). С. 65–76.
- Шишкин М.А., Астанов А.П., Кабатов Н.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист Q-41 (Воркута). Об. записка. Ред В.П. Водолазская. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Шмелев В.Р., Мон Ф.-Ц.* Природа и возраст базитов офиолитового массива Рай-Из (Полярный Урал) // Докл. РАН. 2013. Т. 451. № 2. С. 211–215.
- Hu W.J., Zhou M.F., Yudovskaya M.A., Vikentyev I.V., Malpas J., Zhang P.F.* Trace elements in chromite as indicators of the origin of the giant podiform chromite deposit at Kempirsai, Kazakhstan // Econ. Geol. 2022. V. 117. P. 1629–1655.
- Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T.* The gold–palladium Ozernoe occurrence (Polar Urals, Russia): mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid // Minerals. 2022. V. 12. Paper 765. <https://doi.org/10.3390/min12060765>

Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai Ophiolite Complex // *Mineralogy and Petrology*. 2008. V. 92. P. 31–58.

Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto

oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia // *Miner. Deposita*. 2012. V. 47. P. 1–25.

Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G. Noble metal speciations in hydrothermal sulphides // *Minerals*. 2021. V. 11. Paper 488. P. 1–69.

VASILINOVSKOE PLATINUM-PALLADIUM OCCURRENCE – A NEW TYPE OF MINERALIZATION IN THE OPHIOLITES OF THE POLAR URALS. REPORT 1. GEOLOGICAL POSITION AND MINERALOGY

I. V. Vikentyev^{a, b *}, E. E. Tyukova^{a, c}, V. D. Mokry^a, Yu. N. Ivanova^{a, b},
A. S. Shuisky^d, and I. D. Sobolev^a

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^b*RUDN University, Moscow, 117198 Russia*

^c*Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119019 Russia*

^d*Institute of Geology of Komi Science Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

*E-mail: viken@igem.ru

A detailed description of the new noble metal (Pt-Au-Pd) Vasilinovskoe occurrence discovered near the Kharp town of the Yamalo–Nenets Autonomous Okrug is given. It is associated with amphibolized gabbroids and clinopyroxenites. Mineralization zones with an apparent thickness from 0.5 to 50 m (sulfides 1–3 vol.%, occasionally more) are developed in these rocks. In areas with scattered or finely nested sulfide inclusions, feldspar-quartz and epidote veinlets are often present. The first expedition to study the platinum-bearing area of the Rai-Iz mountains was organized by Professor A.N. Zavaritsky 100 years ago, in 1925 (A.G. Betekhtin was the head of the prospecting party), but the expected placer platinum deposits were not found. Communication 1 includes general geological and detailed mineralogical characteristics of the ore occurrence and brief information on the bulk geochemistry of rocks and ores of the object. The mineralized gabbro-amphibolite ore macrocomponents, which are often found in bulk samples, can be noted (wt.%) V up to 0.2, Co up to 0.06 and Ni up to 0.02. According to assay data, in bulk 0.5–1 kg samples with sulfide inclusions, the Pd content reaches 1.4 g/t, Au – 0.8 g/t, and Pt – 0.2 g/t. The PGE minerals are represented by abundant impregnation of micron-sized palladium minerals: tellurides (merenskiite, temagamite, kotulskite, sopcheite), antimonides (stibiopalladinite, sadberite), arsenoantimonides (arsenic stibiopalladinite, isomertiite), as well as other noble metal compounds – moncheite, native osmium and others. In addition, the magnetite–chalcopyrite–pyrite assemblage contains microinclusions of native silver, bismuth and tin. In the later polysulfide–feldspar–carbonate–quartz assemblage, Au and Ag tellurides, native gold (including Hg-bearing), Se-containing argentite, and greenockite are found. In the zones of sulfide impregnation of the Podgornensky site (1.5 km to the south), occurring in the diorites of the Sob' complex and closely associated with quartz veins, the amount of sulfides is higher, the copper profile is enhanced, and concentrations of Co, Ni, and especially Ti, V, Pd and Pt are falling. According to the LA-ICP-MS analyses of pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite of the Vasilinovskoe occurrence, the profiling trace element for them is cobalt – up to 1.2 wt.% Co in pyrite of the early assemblage. The Ni impurity is also high (400–800 ppm, up to 0.2 wt.%) in the early pyrite and decreases to 16–90 ppm in the late pyrite. The impurity of Se, on the contrary, increases in pyrite of the late assemblage (up to 207 ppm). Chalcopyrite commonly contains As and Se (~100–300 ppm). In contrast to the Vasilinovskoe occurrence, at the Podgornensky site, an admixture of Mo (up to microinclusions of molybdenum), Te (up to 35 ppm), noticeable impurities Tl (up to 25 ppm) and Re (0.3 ppm) are present in pyrite. Impurities are often found in chalcopyrite: Ag up to 65 ppm, Sn up to 65 ppm, Cd up to 35 ppm and Bi up to 11 ppm. Significant impurities of Co and Ni (up to 0.1 wt.%) are typical here only for minor pyrrhotite. According to the mineral composition and geochemical spectrum of Pt-Au-Pd-Co ± Ni-Cu-V-Ti, the low-sulfide platinoid mineralization of the Vasilinovskoe occurrence contrasts quite strongly with the zones of low-sulfide mineralization (+chalcedony quartz) with the specialization Fe-Cu-Au-Ag (±W, Bi, Sn, Mo, Re) of the Podgornensky site, which probably belong to the skarn-porphyry gold-bearing system. The conclusion is made about the prospects of expanding the contours of Pd mineralization to the west and east, where the halos of Cu, Co and Ni, as well as magnetic anomalies, occur in the rocks of the basite-ultrabasite association.

Keywords: ophiolites, gabbro-amphibolite, low-sulfide mineralization, LA-ICP-MS, palladium, platinum, gold, magmatism, Polar Urals