



## ПАЛЛАДИЙ-ЗОЛОТОСУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В АНДЕЗИТАХ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЧУДНОЕ (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

С. А. Онищенко, С. К. Кузнецов

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар  
*kuznetsov@geo.komisc.ru*

Золоторудное месторождение Чудное, расположенное на Приполярном Урале, обладает уникальными чертами. Золото в основном сосредоточено в фукситовых прожилках в риолитах, где ассоциирует с минералами палладия и редких земель при полном отсутствии сульфидов. Для самородного золота в фукситовых прожилках характерны примеси серебра, меди и палладия, часто отмечается гетерогенное строение его выделений. Авторами установлено наличие на глубоких горизонтах месторождения Pd-Au-сульфидной минерализации, приуроченной к толще андезитов, заключенной среди риолитов. Самородное золото и арсеноантимониды палладия в андезитах чаще всего образуют включения в пирите, реже в алланите; сопутствующие минералы: кобальтин (в том числе Pd-содержащий), галенит, сфалерит, халькопирит, магнетит. Золото имеет гомогенное строение, в качестве примеси содержит только серебро, его пробность изменяется в пределах 756–875 ‰. Минеральные ассоциации золота в андезитах резко отличаются от основного оруденения в риолитах, но их объединяет золотопалладиевый характер минерализации, что позволяет предполагать ее образование в ходе единого процесса, при котором существенное значение имеет наличие или отсутствие сульфидов во вмещающих породах. Присутствие палладия в рудах и минерализованных зонах, как и хрома в составе фуксита, указывает на важную роль глубинных источников вещества.

**Ключевые слова:** месторождение Чудное, самородное золото, стибипалладинит, изомертиит.

## PALLADIUM-GOLD-SULPHIDE MINERALIZATION IN ANDESITES AT CHUDNOE DEPOSIT (SUBPOLAR URALS)

S. A. Onishchenko, S. K. Kuznetsov

Institute of Geology, Komi SC, UB RAS, Syktyvkar

The Chudnoe gold deposit, located at the Subpolar Urals, is unique. Gold is generally concentrated in fuchsite veins in rhyolites, where associated with palladium and rare earth minerals in the absence of sulphides. Impurities of silver, copper and palladium are characteristic of native gold in fuchsite veins; heterogeneous structure is often noted. In deep horizons the authors established Pd-Au-sulphide mineralization confined to andesites and enclosed by rhyolites. Native gold and palladium arsenoantimonides in andesites most often form inclusions in pyrite, less often in allanite; accompanying minerals: cobaltine (including Pd-containing), galena, sphalerite, chalcopyrite, magnetite. Gold is homogeneous and contains only silver as an impurity, its rate is within 756–875 ‰. The mineral associations of gold in andesites differ sharply from the main mineralization in rhyolites, but with common gold-palladium nature of mineralization, which suggests its formation during a single process, in which the presence or absence of sulfides in host rocks was important. The presence of palladium in the ores and mineralized zones, as well as chromium in the composition of fuchsite, indicates an important role of deep sources of matter.

**Keywords:** Chudnoe deposit, native gold, stibiopalladinite, isomertiteite.

### Введение

Золоторудное месторождение Чудное находится на западном склоне Приполярного Урала на хребте Малдынырд в бассейне верхнего течения р. Кожим на левобережье р. Балбанью. Сведения о геологическом строении, минеральном составе руд и условиях формирования месторождения изложены в ряде геологических отчетов и опубликованных работ [1–3, 4, 6, 8, 11, 13 и др.]. Установлено, что золото заключено главным образом в фукситовых прожилках в риолитах. В сростании с золотом находятся минералы палладия и редких земель при полном отсутствии сульфидов. Pd-содержащее золото обнаружено также в зонах локального метасоматического изменения риолитов — пятнах осветления [5]. Необычный состав рудной минерализации, развитие в породах кислого состава прожилков, сложенных хромсодержащей слюдой (фукситом), ассоциация фуксита с золотом и минералами палладия обуславливают дискуссионность многих генетических вопросов, касающихся, в частности, источников хрома, золота и палладия.

При разведочном бурении (ОАО «Полярноуралгеология» и ЗАО «Голд Минералс») в толще риолитов несколькими скважинами вскрыты андезиты с вкрапленностью сульфидов. В отдельных интервалах в ан-

дезитах были установлены повышенные содержания золота при отсутствии фукситовых прожилков. Нами проведены детальные исследования с целью выявления в андезитах самородного золота и сопутствующих минералов, а также уточнения закономерностей развития благороднометалльной минерализации.

### Материал и методы исследований

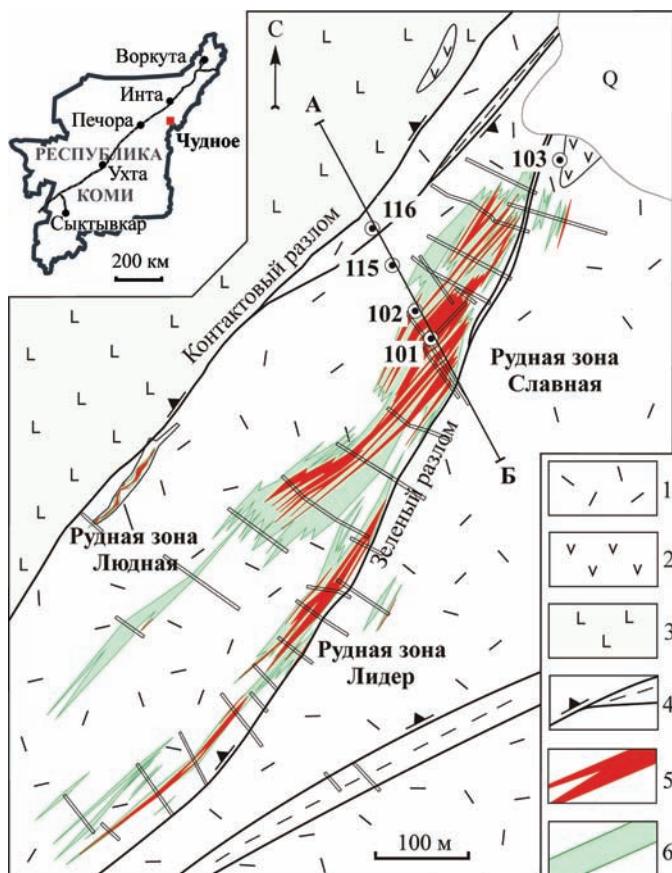
Материалом для исследований служили образцы керн скважин и концентраты тяжелых минералов, предоставленные ЗАО «Голд Минералс» в 2003 г. Минераграфические и петрографические исследования проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся на электронных микроскопах Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (операторы Е. М. Тропников и А. С. Шуйский) и JSM-6400 с энергодисперсионным спектрометром ISIS Link (оператор В. Н. Филиппов), выполнено 260 анализов. Привлечены также петрографические описания (Е. А. Котельникова) и химические анализы пород, полученные в ОАО «Полярноуралгеология» и ЗАО «Голд Минералс».



## Общие сведения о геологическом строении месторождения

Месторождение Чудное приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, ядро которой сложено рифей-вендскими вулканогенными породами эффузивной и субвулканической фаций кислого и основного состава, а крылья — нижнепалеозойскими терригенными и осадочными отложениями нижнего-среднего ордовика. Все породы метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев и подверглись региональному расщелачиванию. В зоне контакта докембрийских и ордовикских пород отмечаются линзы хлоритоид-пиррофиллитовых сланцев, которые рассматриваются рядом геологов как реликты метаморфизованных кор выветривания кембрийского возраста [8 и др.].

Площадь месторождения сложена риолитами и базитами, в подчиненном количестве присутствуют породы андезитового состава (рис. 1). Месторождение находится в зоне крупного Малдинского разлома, отдельные составляющие которого (Зеленый, Контактный и др.) пересекают толщу риолитов, а также прослеживаются по контакту риолитов и базитов. Разрывные нарушения имеют преобладающее северо-западное падение, совпадающее со сланцеватостью пород. Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты, в зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевого, альбит-кварц-серицитового и хлорит-серицитового состава [10].



**Рис. 1.** Геологическая карта месторождения Чудное [11]: 1 — риолиты, 2 — андезиты, 3 — базиты, 4 — тектонические нарушения, 5 — рудные зоны с бортовым содержанием Au 1 г/т, 6 — зоны фукситовой минерализации

**Fig. 1.** Geological map of Chudnoe deposit [11]: 1 — rhyolites, 2 — andesites, 3 — basites, 4 — tectonic dislocations, 5 — ore zones with Au cut off grade 1 g/t, 6 — fuchsite mineralization zones

Среди базитов преобладают базальты, как правило преобразованные в темно-зеленые сланцы с реликтовой миндалекаменной текстурой и афировой или редкопорфировой структурой. В толще базальтов присутствуют долериты и габбро-долериты более массивного облика с вкрапленниками и гломеропорфировыми сростками плагиоклаза. Средний состав базитов на удалении от контакта с риолитами (мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 46.8;  $\text{TiO}_2$  — 2.8;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 15.7;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 9.0;  $\text{FeO}$  — 4.7;  $\text{MnO}$  — 0.24;  $\text{MgO}$  — 6.1;  $\text{CaO}$  — 4.7;  $\text{Na}_2\text{O}$  — 4.5;  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.03;  $\text{P}_2\text{O}_5$  — 0.5 [12]. Базиты характеризуются натриевым типом щелочности, вблизи контакта с риолитами вследствие гидротермально-метасоматических процессов в породах повышается содержание калия.

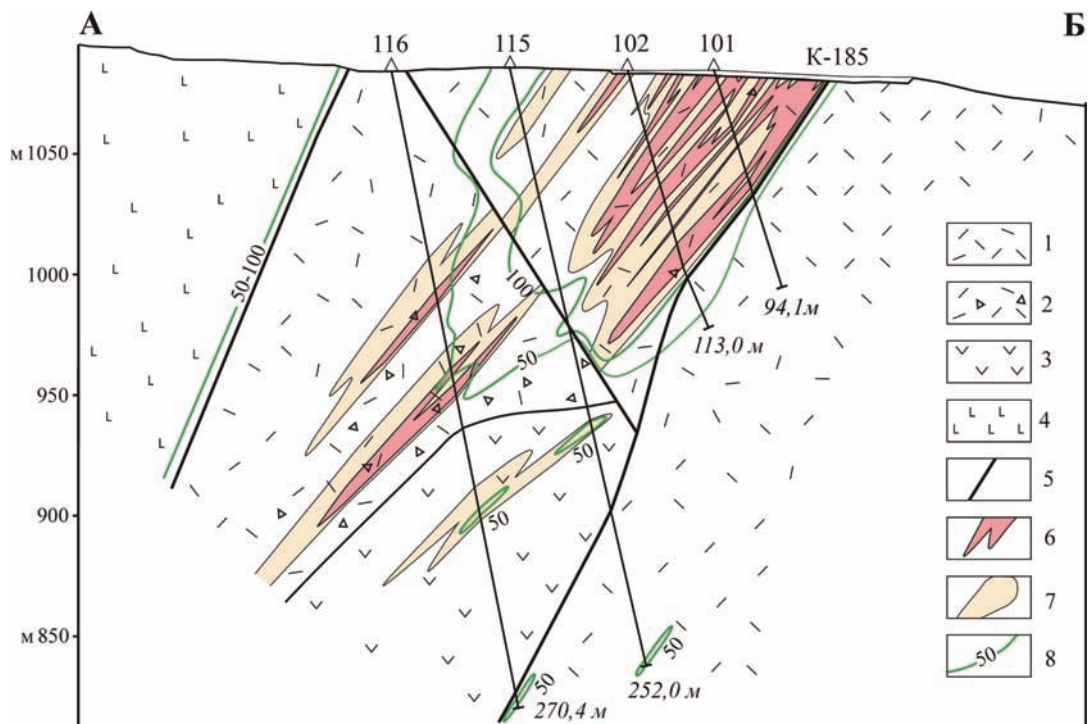
Промышленное золотое оруденение приурочено к риолитам, слагающим основную часть месторождения. Окраска риолитов серая, светло-, лилово- и зеленовато-серая, нередко полосчатая. Текстура пород массивная (слабосланцеватая), флюидальная, брекчиевидная. Риолиты сложены кварцем, альбитом и калиевым полевым шпатом, в переменном количестве присутствует серицит, образующий струйчатые скопления, распространена мелкая (0.01 мм) вкрапленность гематита. Риолиты характеризуются относительно стабильными содержаниями  $\text{SiO}_2$  (73–79 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10–13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом  $\text{K}_2\text{O}$  чаще всего преобладает над  $\text{Na}_2\text{O}$ . Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в среднем составляет 1.8 мас. %,  $\text{FeO}$  — около 1 мас. %.

Золоторудные зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, сменяя друг друга, на расстояние 860 м. Вдоль контакта риолитов с базитами расположена небольшая по размерам, но содержащая богатые руды зона Людная. Рудные зоны имеют крутое (50–70°) северо-западное падение (рис. 2).

Золотоносными являются фукситовые прожилки, мощность которых колеблется от долей миллиметра до 1–1.5 см, контакты с вмещающими риолитами резкие, вдоль прожилков риолиты часто осветлены в зоне шириной 3–10 мм. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами ярко-зеленого, изумрудно-зеленого и темно-зеленого цвета. Вместе с фукситом и золотом в прожилках присутствуют алланит, кварц, альбит, отмечаются кальцит, титанит, апатит, монацит, цинкохромит, кайнозит, ксенотим, черновит, минералы палладия. Ореолы хрома окружают рудную зону (рис. 2), при этом изолиния Cr 100 г/т примерно соответствует контуру распространения фукситовых прожилков, выделяемому по визуальным наблюдениям.

Самородное золото по результатам наших работ и исследований, выполненных другими авторами [13, 14 и др.], представлено двумя типами. Преобладает золото I типа, содержащее (мас. %): 84–88 Au, 8.5–12 Ag, 1.3–5.0 Cu, около 1 Pd и до 1.7 Hg. В золоте рудной зоны Людной содержание Ag достигает 30.5 мас. %. Нередко в матрице золота I наблюдаются тонкие пластинки медистого золота, наличие которых обусловлено распадом твердого раствора. Золото II характеризуется более высокой пробыностью (940–980), содержание Pd — 1.5–2 мас. %, Cu — 0.3–0.9 мас. %, Ag — до 0.7 мас. %.

Минералы палладия обычно находятся в сростании с золотом, представлены минералами группы мертиита-изомертиита, стибиопалладинитом, атенеитом, самородным палладием.



**Рис. 2.** Геологический разрез через рудную зону Славную (по материалам ЗАО «Голд Минералс», контуры рудных тел — по [2]): 1 — риолиты, 2 — риолиты брекчиевидные, 3 — андезиты, 4 — базиты, 5 — тектонические нарушения, 6 — рудные тела с бортовым содержанием Au 1 г/т, 7 — минерализованные зоны по изолинии Au 0.1 г/т, 8 — изолинии Cr, г/т

**Fig. 2.** Geological section through Slavnyaya ore zone (based on materials from Gold Minerals Company, contours of ore bodies are according to [2]): 1 — rhyolites, 2 — brecciated rhyolites, 3 — andesites, 4 — basites, 5 — tectonic dislocations, 6 — ore bodies with Au cut off grade 1 g/t, 7 — mineralized zones along Au isoline 0.1 g/t, 8 — Cr isolines, g/t

### Петрография и петрохимия андезитов

Несколькими скважинами в центральной части зоны Славной на глубине 140–250 м вскрыты андезиты, слагающие линзовидное тело мощностью до 100 м, находящееся среди риолитов (рис. 2). На северо-восточном окончании зоны андезиты пересечены скважиной 103, вблизи которой на поверхности образуют щебенчатые развалы.

Андезиты имеют серый, темно-серый, зеленовато-серый цвет, плагиофировую структуру и неяснопосчатую или сланцеватую текстуру, иногда отмечается наличие миндалин. Вкрапленники плагиоклаза, замещенного альбитом, составляют 2–3 % объема породы, их обычный размер 0.5–2 мм. Основная масса породы сложена хлорит-альбитовым или хлорит-биотит-альбитовым агрегатом, часто присутствует серицит и карбонаты, реже кварц и сульфиды, в сростании с последними отмечаются мелкие выделения калиевого полевого шпата. Состав породообразующих силикатов характеризуется небольшими вариациями, за исключением серицитов, среди которых преобладают разности со значительной долей фенгитовой составляющей, имеющие повышенное содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$ , реже состав серицита соответствует мусковиту (табл. 1).

Акцессорные минералы представлены титанитом, алланитом, апатитом, цирконом. Распространены мелкие кристаллики магнетита (1–3 %), ильменита (около 1 %), вблизи риолитов отмечается гематит. Типичный состав титанита (мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 31.22,  $\text{TiO}_2$  — 32.91,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 5.3,  $\text{CaO}$  — 29.02,  $\text{FeO}$  — 1.05,  $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0.56, F — 1.77. Для алланита характерна неоднородность состава по  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  и TR даже в пределах одного выделения. Состав цериевой разновидности алланита (мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 30.10,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 13.36,  $\text{FeO}$  — 16.52,

Таблица 1. Состав силикатов в андезитах (мас. %)

Table 1. Composition of silicates in andesites (wt.%)

Оксид Oxide	Ab	Chl	Bt	Ser	Kfs	
$\text{SiO}_2$	68.89	27.16	37.27	49.90	46.28	64.62
$\text{TiO}_2$	—	—	2.28	0.40	0.38	—
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19.81	20.19	13.89	24.91	31.45	18.90
$\text{FeO}$	—	27.54	21.26	6.40	5.11	—
$\text{MnO}$	—	0.63	0.27	—	—	—
$\text{MgO}$	—	14.67	9.99	3.06	0.90	—
$\text{Na}_2\text{O}$	11.23	—	—	—	—	0.17
$\text{K}_2\text{O}$	—	—	9.86	11.20	10.74	16.25
$\text{BaO}$	—	—	—	—	—	0.96
Сумма Total	99.93	90.19	94.82	95.87	94.86	100.9

Примечания. Ab — альбит, Chl — хлорит, Bt — биотит, Ser — серицит, Kfs — калиевый полевой шпат. «—» — элемент не обнаружен.

Notes. Ab — albite, Chl — chlorite, Bt — biotite, Ser — sericite, Kfs — K-feldspar. «—» — element was not found.

$\text{MnO}$  — 1.01,  $\text{CaO}$  — 9.54,  $\text{La}_2\text{O}_3$  — 5.42,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  — 14.19,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  — 3.27, сумма — 93.41. Состав лантановой разновидности минерала (мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 34.03,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 20.37,  $\text{FeO}$  — 11.94,  $\text{CaO}$  — 15.06,  $\text{La}_2\text{O}_3$  — 8.81,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  — 7.30, сумма — 97.51. В ильмените постоянно присутствует  $\text{MnO}$  (1.5–6.5 мас. %), изредка отмечается примесь  $\text{V}_2\text{O}_5$  (до 0.5 мас. %). В магнетите содержание элементов-примесей низкое, иногда присутствует  $\text{TiO}_2$  (до 0.8 мас. %), в гематите, напротив, титан является обычной примесью ( $\text{TiO}_2$  — 3.0–5.5 мас. %).

Химический состав андезитов варьирует, отражая как первичную неоднородность пород, так и метасома-





тические изменения андезитов в тектонически нарушенных зонах контакта с риолитами. Вариации состава андезитов по скв. 103 следующие (мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 54.5–64.5;  $\text{TiO}_2$  — 1.8–2.2;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 10.5–15.0;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 4.7–18.9;  $\text{FeO}$  — 1.4–5.5;  $\text{MnO}$  — 0.04–0.34;  $\text{MgO}$  — 0.5–2.1;  $\text{CaO}$  — 1.7–2.9;  $\text{Na}_2\text{O}$  — 2.5–4.3;  $\text{K}_2\text{O}$  — 1.5–3.6;  $\text{P}_2\text{O}_5$  — 0.7–1.2 [9]. Приведенные данные свидетельствуют о калиево-натриевом типе щелочности андезитов с отношением  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.3$  (мас.). Для центральной части толщи андезитов в скв. 115, удаленных от контакта с риолитами на расстояние свыше 15 м, характерно более высокое отношение  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (5.7 мас. %) при содержании  $\text{Na}_2\text{O}$  4.8–6.3 и  $\text{K}_2\text{O}$  0.2–1.5 мас. % (рис. 3). Таким образом, относительно неизменные андезиты характеризуются натриевым типом щелочности.

Геохимической особенностью андезитов является крайне низкое содержание хрома, составляющее 10–30 г/т, за исключением зон Pd-Au-минерализации, где содержание хрома достигает 50 г/т (рис. 2).

В тектонических контактах между риолитами и андезитами обе породы преобразованы соответственно в апориолитовые кварц-серицитовые метасоматиты и апоандезитовые хлорит-серицитовые или серицитовые метасоматиты (рис. 3). Преобладающим минералом метасоматитов независимо от исходной породы является серицит, поэтому они характеризуются высоким содержанием  $\text{K}_2\text{O}$  при очень низком содержании  $\text{Na}_2\text{O}$ . Апоандезитовые породы отличаются от апориолитовых значительным количеством титанита, магнетита, гематита и апатита, что проявляется, в частности, в более высоких содержаниях титана и фосфора по данным спектрального анализа.

### Pd-Au-сульфидная минерализация в андезитах

Для андезитов характерна неравномерно рассеянная вкрапленность сульфидов, содержание которых не превышает 0.5 %. Pd-Au-минерализация приурочена к зоне мощностью от 4 до 12 м, которая определяется только по результатам опробования и не вполне совпадает с участками наиболее значительного содержания пирита, а также Pb, Zn и Cu, фиксирующихся спектральным анализом. Содержание Au в керновых пробах, по данным атомно-абсорбционного анализа, достигает 0.5 г/т, содержание Pd не определялось.

Среди сульфидов преобладает пирит, реже встречаются галенит, сфалерит, халькопирит, кобальтин, изредка отмечаются теннантит и молибденит (рис. 4). Самородное золото и минералы палладия чаще всего заключены в пирите, реже в алланите и магнетите.

**Пирит** представлен идиоморфными кристаллами или зернами угловато-изометричной формы размером 0.2–1 мм, нередко содержит включения сульфидов, самородного золота, минералов палладия, магнетита и породообразующих минералов. По составу пирит отчетливо разделяется на Со-содержащий и практически не содержащий примесей (табл. 2). Содержание Со в первой разновидности пирита — 2.0–6.4 мас. %, характерна также примесь As — 0.4–1.3, иногда до 3.3 мас. %. В отраженном свете отличается от беспримесного пирита пониженным отражением. Обе разновидности пирита слагают как самостоятельные зерна, так и зерна неоднородного строения, в которых Со-содержащий пирит слагает участки неправильной формы или отдель-

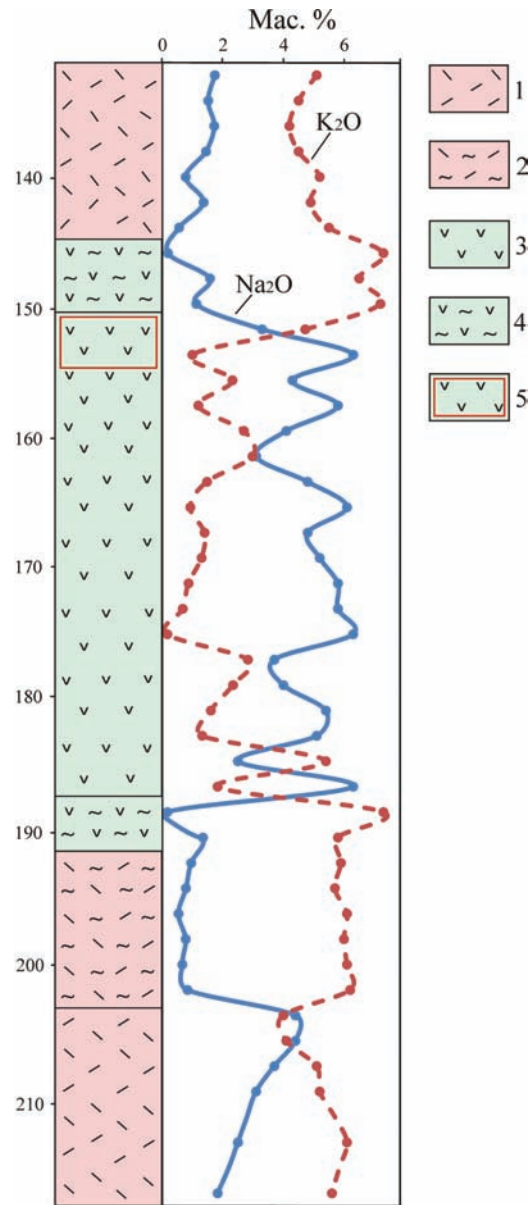


Рис. 3. Распределение щелочей в андезитах и риолитах по скв. 115: 1 — риолиты, 2 — кварц-серицитовые апориолитовые метасоматиты, 3 — андезиты, 4 — хлорит-серицитовые апоандезитовые метасоматиты, 5 — зона минерализации (Au 0.1 г/т)

Fig. 3. Alkali distribution in andesites and rhyolites in borehole 115: 1 — rhyolites, 2 — quartz-sericite aporhyolite metasomatites, 3 — andesites, 4 — chlorite-sericite-apoandesite metasomatites, 5 — mineralization zone (Au 0.1 g/t)

ные зоны в кристалле (рис. 4, а). Иногда к таким зонам приурочены скопления зерен стибипалладинита, реже золота (рис. 5). В целом же минералы благородных металлов встречаются в обеих разновидностях пирита.

**Галенит** является характерным минералом андезитов; в виде зерен изометричной или неправильной формы размером 0.1–0.3 мм встречается в сростании со всеми минералами, часто образует включения в пирите. Для галенита в зоне Pd-Au-минерализации характерна постоянная примесь селена, составляющая 0.9–2.1 мас. %. В галените, заключенном в пирите, содержание Se достигает 5.6–5.8 мас. % и даже 14.7 мас. %, что соответствует формуле  $\text{Pb}_{1.02}\text{S}_{0.48}\text{Se}_{0.50}$ , при этом в тех же зернах пирита присутствует галенит с содержанием Se 0.9 мас. %. В галените за пределами зоны Pd-Au-минерализации примесь Se не выявлена.

Таблица 2. Состав пирита и кобальтина в андезитах (мас. %)
   
 Table 2. Composition of pyrite and cobaltite in andesites (wt. %)

Минерал / Mineral	Co	Pd	Fe	As	S	Сумма / Total
Пирит Pyrite	0.45	—	45.79	—	52.87	99.11
	—	—	46.60	—	53.96	100.56
	—	—	46.40	—	54.03	100.43
	—	—	45.76	—	53.51	99.27
	0.26	—	45.92	—	53.56	99.74
Со-пирит Co-pyrite	5.74	—	40.57	1.14	52.26	99.71
	4.45	—	42.10	1.08	53.00	100.63
	5.34	—	40.40	3.31	51.42	100.47
	2.54	—	44.29	0.43	53.86	101.12
	6.12	—	40.68	—	53.54	100.34
	6.38	—	39.87	0.98	53.10	100.33
Кобальтин Cobaltite	2.77	—	43.66	1.08	53.16	100.67
	32.18	—	5.11	39.84	24.06	101.19
	31.52	—	5.01	40.64	23.81	100.98
	31.06	—	4.82	40.38	24.40	100.66
	31.06	—	4.93	40.82	23.65	100.46
Pd-кобальтин Pd-cobaltite	31.42	—	5.20	40.82	24.10	101.54
	28.04	5.43	4.01	43.12	21.04	101.64
	27.37	5.85	3.86	43.09	20.43	100.60
	27.58	5.10	3.75	43.21	20.51	100.15
	25.45	7.91	3.69	43.90	19.18	100.13
	31.13	1.74	4.13	41.75	23.13	101.88

**Халькопирит** образует сростания с пиритом, сфалеритом, галенитом и кобальтином. Обычный размер выделений 30–40 мкм. Состав халькопирита близок к теоретическому. Отмечен определенный антагонизм между халькопиритом и самородным золотом; в минеральных сростаниях с наличием халькопирита самородное золото, как правило, отсутствует, но изредка в пирите отмечаются очень мелкие округлые совместные выделения золота с халькопиритом.

**Сфалерит** наблюдается в сростаниях с пиритом, галенитом, халькопиритом и кобальтином. В ассоциации с алланитом отмечены сростания сфалерита со стибнопалладинитом и кобальтином. В минеральных агрегатах, содержащих сфалерит, присутствует самородное золото, но сростаний этих минералов не отмечено. Обычный размер выделений сфалерита 0.05–0.2 мм. Сфалерит маложелезистый, содержание Fe составляет 0.3–1.3 мас. %, в зернах с эмульсионной вкрапленностью халькопирита содержание Fe в матрице минерала 0.6 мас. %.

**Кобальтин** в виде зерен угловато-неправильной формы размером до 50 мкм отмечается довольно часто в сростаниях практически со всеми рудными минералами, по отношению к сфалериту отчетливо идиоморфен. В кобальтине всегда присутствует Fe (2.8–6.1 мас. %).

Кроме того, примерно в половине проанализированных зерен установлена заметная примесь палладия, составляющая 1.7–7.9 мас. %. Pd-содержащий кобальтин обычно ассоциирует с арсеноантимонидами палладия. Усредненная эмпирическая формула кобальтина  $Co_{0.85}Fe_{0.13}As_{0.87}S_{1.15}$ , Pd-кобальтина —  $Co_{0.79}Fe_{0.11}Pd_{0.08}As_{0.95}S_{1.07}$ .

**Самородное золото** чаще всего заключено в пирите, иногда образует включения в алланите, изредка — в магнетите. Золото в пирите образует самостоятельные выделения размером 3–100 мкм, изометричной, удлиненной и неправильной формы, реже находится в сростаниях с галенитом. Для относительно крупных (15–40 мкм) выделений самородного золота в алланите характерна неправильная форма выделений, для мелких — овальная. Самородное золото имеет гомогенное строение, в качестве примеси содержит только серебро. Состав самородного золота, заключенного в пирите и алланите, изменяется в следующих пределах: Au — 76.3–87.9 мас. %, Ag — 12.5–23.7 мас. %, наличие других элементов не установлено. В магнетите золото отмечается в виде очень мелких (до 5 мкм) округлых включений относительно низкой пробы: Au — 74.8–77.0 мас. %, Ag — 23.5–24.4 мас. %. Общие вариации

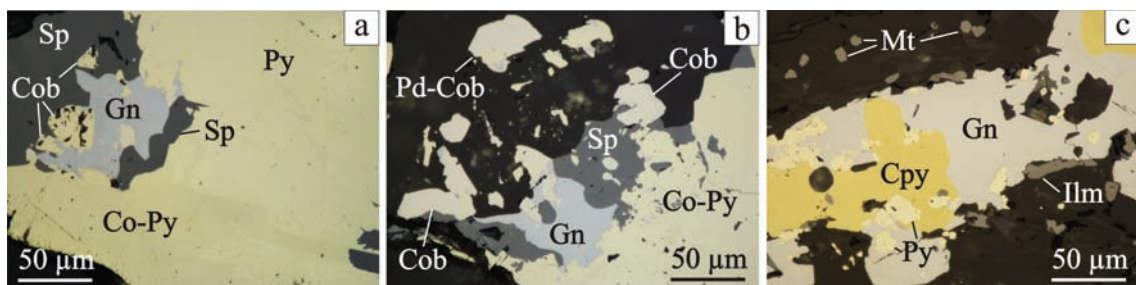
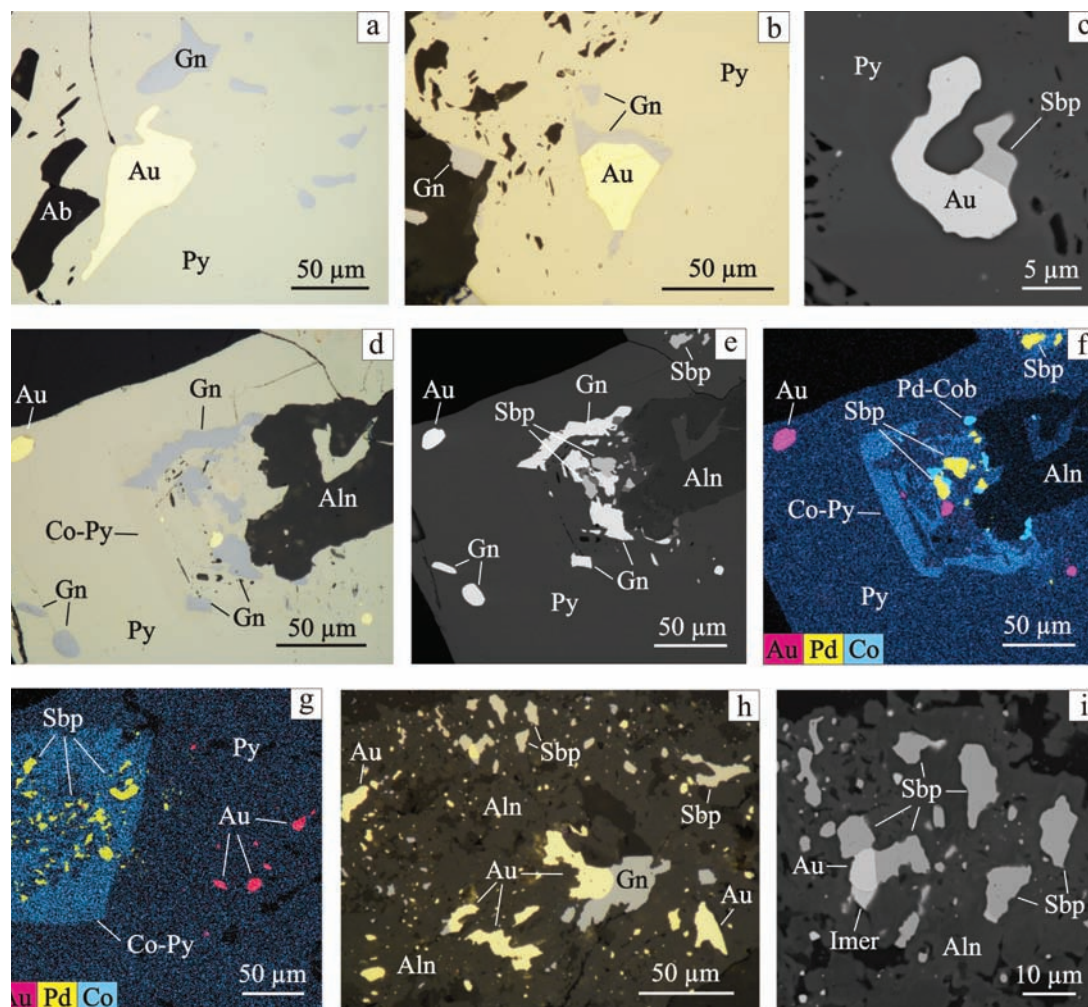


Рис. 4. Рудные минералы в андезитах: Py — пирит, Co-Py — Co-содержащий пирит, Cob — кобальтин, Pd-Cob — Pd-содержащий кобальтин, Gn — галенит, Sp — сфалерит, Cpy — халькопирит, Ilm — ильменит, Mt — магнетит. Отраженный свет

Fig. 4. Ore minerals in andesites: Py — pyrite, Co-Py — Co-containing pyrite, Cob — cobaltite, Pd-Cob — Pd-containing cobaltite, Gn — galena, Sp — sphalerite, Cpy — chalcopyrite, Ilm — ilmenite, Mt — magnetite. Reflected light





**Рис. 5.** Самородное золото и минералы палладия в андезитах: Au — золото, Sbp — стибиопалладинит, Imer — изомертиит, Py — пирит, Co-Py — Co-содержащий пирит, Pd-Cob — Pd-содержащий кобальтин, Gn — галенит, Ab — альбит, Aln — алланит. Изображения в отраженном свете (a, b, d, h), в отраженных электронах (c, e, i) и комбинированные в характеристическом излучении Pd, Au и Co (f, g)

**Fig. 5.** Native gold and palladium minerals in andesites: Au — gold, Sbp — stibiopalladinite, Imer — isomertieite, Py — pyrite, Co-Py — Co-containing pyrite, Pd-Cob — Pd-containing cobaltite, Gn — galena, Ab — albite, Aln — allanite. Images in reflected light (a, b, d, h), in reflected electrons (c, e, i) and combined in Pd, Au and Co characteristic radiation (f, g)

пробности золота в зоне Pd-Au-сульфидной минерализации в андезитах заключены в пределах 756–875 ‰.

**Стибиопалладинит** встречается в виде включений в пирите, иногда в алланите, где сопутствует самородному золоту, но в сростании с ним встречается редко. Размер выделений минерала 5–25 мкм, содержания элементов заключены в узких пределах (мас. %): Pd — 70.3–71.3; Sb — 25.9–26.6; As — 3.2–3.6. Среднее атомное отношение  $Pd / (Sb + As) = 2.52$ , эмпирическая формула минерала  $Pd_{5.01}(Sb_{1.65}As_{0.34})_{1.99}$ .

**Изомертиит** присутствует в тех же ассоциациях, что и стибиопалладинит, но встречается реже последнего. Выделения размером 5–15 мкм отмечены в пирите, изредка в алланите. Выделения самостоятельные или в сростании с галенитом, самородным золотом. Минерал изотропный, отражение незначительно выше, чем у пирита, на фоне которого выделяется розовым оттенком. От стибиопалладинита отличается значительно более высоким содержанием As, а также наличием Cu, Au и Ag. Среднее атомное отношение  $(Pd + Cu + Au + Ag) / (Sb + As) = 2.66$ , что соответствует 8 : 3, соотношение между Sb и As близко к 1 : 1. Эмпирическая формула минерала  $Pd_{7.51}Ag_{0.21}Au_{0.16}Cu_{0.11}(Sb_{1.58}As_{1.43})_{3.01}$ .

**Таблица 3.** Состав самородного золота в андезитах (мас. %)   
 **Table 3.** Composition of native gold in andesites (wt.%)

Минерал Mineral	Ag	Au	Сумма Total	Пробность, ‰ Fineness, ‰
Золото в пирите Gold in pyrite	20.94	79.07	100.01	791
	12.55	87.89	100.44	875
	18.48	82.49	100.97	817
	14.88	85.85	100.73	852
	18.77	81.54	100.31	813
	15.47	85.29	100.76	846
	22.11	78.17	100.28	780
Золото в алланите Gold in allanite	23.49	77.18	100.67	767
	16.42	84.50	100.92	837
	23.38	77.48	100.86	768
Золото в магнетите Gold in magnetite	24.39	75.46	99.85	756
	24.06	74.80	98.86	757
	23.47	77.02	100.49	766



Таблица 4. Состав арсеноантимонидов палладия в андезитах (мас. %) /  
Table 4. Composition of palladium arsenoantimonides in andesites (wt. %)

Минерал / Mineral	Pd	Au	Ag	Cu	Sb	As	Сумма / Total
Стибиопалладинит Stibiopalladinite	71.09	—	—	—	25.94	3.63	100.66
	70.28	—	—	—	26.61	3.15	100.04
	71.28	—	—	—	26.16	3.42	100.86
	71.21	—	—	—	26.17	3.60	100.98
	70.73	—	—	0.42	26.44	3.29	100.88
Изомертиит Isomertieite	68.04	2.83	2.61	1.04	16.78	9.41	100.71
	69.50	3.39	2.25	0.59	16.71	9.24	101.68
	70.91	3.53	—	0.72	16.77	9.51	101.44
	70.89	—	2.63	—	16.78	9.19	99.49
Pd <sub>7</sub> (As,Sb) <sub>4</sub>	64.70	—	—	—	18.17	14.54	97.41
	65.31	—	—	—	17.39	15.37	98.07

Примечание. «—» — элемент не обнаружен.  
Note. «—» — element was not found.

Неидентифицированный минерал **Pd<sub>7</sub>(As,Sb)<sub>4</sub>** отмечается в виде включений в пирите, обычно находится в сростании с галенитом. Размер выделений 5–40 мкм, форма изометричная, удлиненная или неправильная. От мертиита отличается более высоким содержанием As, а также заметно более низким атомным отношением Pd/(Sb + As) = 1.76, т. е. соответствует 7 : 4.

В сростании с мертиитом в единичных мелких зернах отмечен палладиевый минерал с еще более высоким содержанием As, хороший анализ которого получить не удалось. Состав минерала (мас. %): Pd — 64.01, Ag — 0.87, As — 22.66, Sb — 7.56, сумма — 95.1.

Таким образом, в андезитах месторождения Чудное в тесной ассоциации с сульфидами присутствуют золото и минералы палладия. Следует заметить, что вкрапленность сульфидов характерна для андезитов и наблюдается в керне ряда скважин, однако Pd-Au-минерализация развита локально и отмечена только в связи с Pd-Au-фукситовым оруденением в риолитах. Благороднометалльная минерализация является наложенной как на риолиты, так на сульфидсодержащие андезиты. При этом андезиты вряд ли могли служить источником золота, палладия и хрома, поскольку содержание их в породах весьма незначительное.

Фазовый и химический состав самородного золота, а также его минеральные ассоциации в андезитах и риолитах резко отличаются, что определяется наличием сульфидов в андезитах. При дефиците серы медь в риолитах входит в состав самородного золота с образованием твердого Cu-Ag-Au-раствора, при распаде которого образуются пластинки медистого золота в золото-серебряной матрице. В андезитах вся медь связана в халькопирите.

Pd-Au-минерализация в андезитах тяготеет к тектоническому контакту с риолитами, где породы преобразованы в хлорит-серицитовые и кварц-серицитовые метасоматиты. Обращает на себя внимание то, что Pd-Au-минерализация находится в зоне перехода от относительно неизменных андезитов к апоандезитовым метасоматитам. Подтверждается ранее сделанный вывод о роли разломной тектоники в размещении оруденения. Золоторудные зоны в целом контролируются тектоническими нарушениями, но непосредственно в метасоматитах, слагающих зоны разломов, золоторудная

минерализация обычно отсутствует. Золотоносные породы по составу незначительно отличаются от незолотоносных, что свидетельствует о малой роли объемных метасоматических процессов при образовании руд [10, 11].

Интересно присутствие в андезитах в зонах развития Pd-Au-сульфидной минерализации Se-содержащего галенита. В аллювии р. Балбанью к северо-востоку от месторождения Чудное известны находки Se-содержащего галенита в сростках с медьсодержащим высокопробным золотом, а также сростки золота с хлоритом [7], что свидетельствует о более широком развитии Pd-Au-сульфидной минерализации, связанной с породами основного состава.

### Заключение

Результаты исследований свидетельствуют, что Pd-Au-сульфидная минерализация в андезитах в изученном разрезе месторождения Чудное пространственно связана с Pd-Au-фукситовым оруденением в риолитах, сменяя его по падению. Минеральные ассоциации золота в андезитах и риолитах резко отличаются, но их объединяет общая палладиевая специализация, что позволяет предполагать отложение самородного золота и минералов палладия в ходе единого гидротермального процесса, проявившегося, вероятнее всего, в позднепалеозойское время. В ассоциации с самородным золотом и арсеноантимонидами палладия находятся кобальтин, Pd-содержащий кобальтин, Se-содержащий галенит, пирит, Co-содержащий пирит, сфалерит, халькопирит, магнетит и алланит. Присутствие палладия в рудах и минерализованных зонах, как и хрома в составе фуксита, указывает на важную роль глубинных источников вещества. В районе хребта Малдынырд могут быть открыты новые золоторудные проявления.

*Работа выполнена по теме НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ № АААА-А17-117121270036-7 при частичной финансовой поддержке проекта УрО РАН № 18-5-5-57 «Перспективные рудные районы севера Урала, Пай-Хоя и Тимана».*

### Литература

1. Ефанова Л. И., Карчевский А. Ф., Онищенко Л. В., Приходько Н. Н. Геологическое строение месторождения Чудное (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России:



Материалы XIV съезда Республики Коми. Сыктывкар: Геопринт, 2004. Т. IV. С. 24–28.

2. Калустов С. В., Ефанова Л. И. Золоторудное месторождение Чудное на этапе подготовки к промышленному освоению // Горный журнал. 2013. № 9. С. 42–44.

3. Кузнецов С. К., Андреевичев В. Л. Возраст золото-фукситовой минерализации в риолитах хребта Малдынырд // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов: Материалы Всерос. конф. Сыктывкар, 1998. С. 18–19.

4. Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Соболева А. А. Минералогическо-геохимические особенности золото-фукситовых прожилков в риолитах хребта Малдынырд // Сыктывкарский минералогический сборник № 28. Сыктывкар. 1999. С. 146–154.

5. Кузнецов С. К., Онищенко С. А. Золотоносность локальных участков метасоматического изменения риолитов месторождения Чудное (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 12. С. 39–45.

6. Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В. и др. Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE-рудопоявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия. 2005. № 11. С. 1175–1195.

7. Мурзин В. В., Малугин А. А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 96 с.

8. Озеров В. С. Метаморфогенные россыпи золота Приполярного Урала // Руды и металлы. 1996. № 4. С. 28–37.

9. Онищенко С. А. Метасоматические преобразования пород в области контакта риолитов и базитов (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Строение, геодинамика и минерогенетические процессы в литосфере: Матер. междунар. науч. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 264–268.

10. Онищенко С. А. Кварц-серицитовые апорилитовые метасоматиты в зоне Малдинского разлома на хребте Малдынырд (Приполярный Урал) // Геодинамика, вещество, рудо-генез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всерос. научн. конф. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. С. 147–149.

11. Онищенко С. А., Онищенко Л. В., Ефанова Л. И., Артеева Т. А. Золоторудное месторождение Чудное на Приполярном Урале // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. Т. III. С. 172–175.

12. Соболева А. А. Вулканы и ассоциирующие с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 146 с.

13. Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Моралев Г. В., Соболева А. А., Лапутина И. П. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 15–30.

14. Шумилов И. Х., Остащенко Б. А. Минералогическо-технологические особенности Au-Pd-TR-оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 104 с.

## References

1. Efanova L. I., Karchevsky A. F., Onishchenko L. V., Prikhodko N. N. *Geologicheskoe stroenie mestorozhdeniya Chudnoe (hrebet Maldynyrd, Pripolyarnyi Ural)* (Geological structure of the deposit Chudnoye (Maldynyrd ridge, Subpolar Urals)). Geology and mineral resources of the European northeast of Russia: 14<sup>th</sup> Congress of Komi Republic, V. 4, Syktvykar: Geoprint, 2004, pp. 24–28.

2. Kalustov S. V., Efanova L. I. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Chudnoe na etape podgotovki k promyshlennomu osvoeniyu*

(Chudnoe gold ore deposit at the stage of preparation for industrial development). Mining Journal. 2013, No. 9, pp. 42–44.

3. Kuznetsov S. K., Andreichev V. L. *Vozrast zoloto-fuksitovoi mineralizatsii v riolitah hrebtu Maldynyrd* (Age of gold-fuchsite mineralization in the rhyolites of the Maldynyrd ridge). Gold, platinum and diamonds of Komi Republic and adjacent regions. Proceedings of conference. Syktvykar, 1998, pp. 18–19.

4. Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Soboleva A. A. *Mineralogogehimicheskie osobennosti zoloto-fuksitovykh prozhilok v riolitah hrebtu Maldynyrd* (Mineralogical and geochemical features of the gold-fuchsite veins in rhyolites of the Maldynyrd ridge). Syktvykar mineralogical collection No. 28. Syktvykar, 1999, pp. 146–154.

5. Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A. *Zolotonosnost' lokal'nykh uchastkov metasomaticheskogo izmeneniya riolitov mestorozhdeniya Chudnoe (Pripolyarnyi Ural)* (Gold-bearing local areas of the metasomatic alteration of rhyolites from the Chudnoye deposit (Subpolar Ural)). IG Komi SC UB RAS, 2018, No. 12, pp. 39–45.

6. Moralev G. V., Borisov A. B., Surenkov S. V. et al. *Raspredelenie i formy nahozhdeniya redkozemel'nykh elementov na Au-Pd-REE rudoproyavleniyah Chudnoe i Nesterovskoe (hrebet Maldynyrd, Pripolyarnyi Ural)* (Distribution and forms of finding rare earth elements on Au-Pd-REE ore occurrences Chudnoe and Nesterovskoye (Maldynyrd ridge, Subpolar Ural)). Geochemistry, 2005, No. 11, pp. 1175–1195.

7. Murzin V. V., Malyugin A. A. *Tipomorfizm zolota zony gipergenezu (na primere Urala)* (Gold typomorphism of hypergenesis zone (on the example of the Urals)). Sverdlovsk: USC USSR AS, 1987, 96 p.

8. Ozerov V. S. *Metamorfogennyye rossypi zolota Pripolyarnogo Urala* (Metamorphogenic gold placers of the Subpolar Urals). Ores and metals, 1996, No. 4, pp. 28–37

9. Onishchenko S. A. *Metasomaticheskyye preobrazovaniya porod v oblasti kontakta riolitov i bazitov (hrebet Maldynyrd, Pripolyarnyi Ural)* (Metasomatic transformations of rocks in the area of contact between rhyolites and basites (Maldynyrd ridge, Subpolar Urals)). Structure, geodynamics and mineragenic processes in lithosphere: proceedings of international scientific conference. Syktvykar: Geoprint, 2005, pp. 264–268.

10. Onishchenko S. A. *Kvarts-seritsitovyye aporiolitovyye metasomatity v zone Maldinskogo razloma na hrebtu Maldynyrd (Pripolyarnyi Ural)* (Quartz-sericite aporiolite metasomatites in the Maldinsky fault zone on the Maldynyrd ridge (Polar Urals)). Geodynamics, substance, ore genesis of the East European platform and its folded framing: Proceedings. Syktvykar: IG Komi SC UB RAS, 2017, pp. 147–149.

11. Onishchenko S. A., Onishchenko L. V., Efanova L. I., Arteeva T. A. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Chudnoe na Pripolyarnom Urale* (Chudnoe gold deposit in the Subpolar Urals). Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proceedings of the 16<sup>th</sup> Congress of Komi Republic, V. 3, Syktvykar: IG Komi SC UB RAS, 2014, pp. 172–175.

12. Soboleva, A. A., *Vulkanity i assotsiiiruyuschie s nimi granitoidy Pripolyarnogo Urala* (Volcanites and associated granitoids of Subpolar Urals). Ekaterinburg: UB RAS, 2004, 146 p.

13. Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V., Soboleva A. A., Laputina I. P. *Novyy zoloto-palladievyy tip mineralizatsii v Kozhimskom raione Pripolyarnogo Urala* (New gold-palladium type of mineralization in the Kozhim district of the Subpolar Urals). Geology of ore deposits, 1996, V. 38, No. 1, pp. 15–30.

14. Shumilov I. Kh., Ostashchenko B. A. *Mineralogogehimicheskie osobennosti Au-Pd-TR orudneniya na Pripolyarnom Urale* (Mineralogical and technological features of Au-Pd-TR mineralization in the Subpolar Urals). Syktvykar: Geoprint, 2000, 104 p.