

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ПИРИТА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКОЕ И НОВОГОДНЕЕ-МОНТО (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)*

Ю.Н. Иванова

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)
Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017

По результатам локальных методов РСМА и LA-ICP-MS в работе дана сравнительная характеристика химического состава пирита месторождений Петропавловское (золото-порфировый тип) и Новогоднее-Монто (Au-Fe скарновый тип), а также прослежено изменение основных рудообразующих элементов в процессе формирования месторождений.

Ключевые слова: Полярный Урал, «невидимое» золото, РСМА, LA-ICP-MS

Новогодненское рудное поле локализовано в юго-восточной части Тоупугол-Ханмейшорской площади северного сектора Войкарской структурно-формационной зоны, отвечающей герцинскому Малоуральскому краевому вулканоплутоническому поясу. В его пределах расположены рудные объекты — среднее Fe-Au-скарновое месторождение Новогоднее-Монто и крупное Au-порфировое месторождение Петропавловское, а также выявлены многочисленные проявления золото-сульфидного, золото-скарнового и золото-сульфидно-кварцевого типов [1; 2] (рис. 1).

Основными вмещающими образованиями Au-Fe-скарновых тел на участке месторождения Новогоднее-Монто являются отложения вулканогенно-осадочной тоупугольской толщи (S_2-D_1tp). Разрез тоупугольской толщи в пределах месторождения представлен пирокластическими породами анедезито-базальтового состава и мраморизованными известняками (линзы мощностью до 200 м) [2; 4].

Au-порфировое месторождение Петропавловское расположено в 2 км западнее описанного и локализовано в тектонически проработанной зоне контакта тоупугольской толщи с многофазным массивом собского габбро-кварцеводиорит-тоналитового комплекса [2; 3].

Для аналитических исследований использовались штучные пробы из траншей и керна скважин, отобранные сотрудниками ИГЕМ РАН в ходе полевых работ в 2012 (И.В. Викентьев, Б.Р. Тагиров) и 2015 гг. (Ю.Н. Иванова, Е.Э. Тюкова), а также предоставленные А.П. Трофимовым (Бронницкая ГГЭ ИМГРЭ). Рудная микроскопия сопровождалась анализами на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-5300, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Link

* Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 14-17-00693.

ISIS и рентгено-спектральным микроанализатором SX-50 Сатеса (аналитик Н.В. Трубкин). Содержания макрокомпонентов и некоторых микропримесей в пирите (Co, As) были изучены методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (время экспозиции 100 с, предел обнаружения 0,005 мас. %).

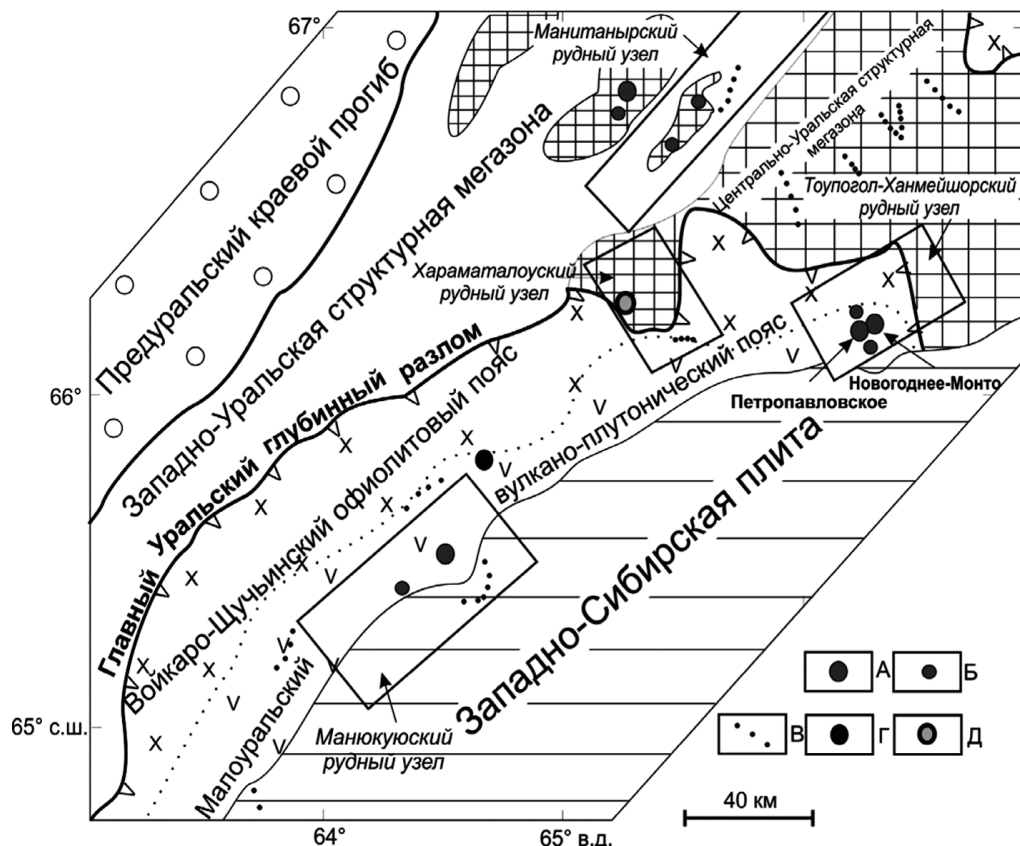


Рис. 1. Позиция месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто в Малоуральской зоне Тагило-Магнитогорской мегазоны (структурная основа — Черняев Е.В., 2005 г. с упрощением) [5]:
 А — месторождения золота, Б — проявления золота, В — россыпи золота,
 Г — колчеданные месторождения, Д — V-Fe-Cu-(Au) месторождения

Использовался высокочувствительный метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS), прибор Thermo Xseries, лазер — New Wave UP213, диаметр луча 40 μm . Вскрытие зерен пирита осуществлялось с помощью точечной и профильной (бороздой) абляции. Чувствительность для большинства элементов составляла 0.02—0.05 ppm.

Главными рудными минералами в рудах месторождений является пирит (3 генерации, табл. 1) и магнетит (месторождение Новогоднее-Монто), второстепенными — магнетит (месторождение Петропавловское) и халькопирит, редкими — галенит и сфалерит, крайне редкими — самородное золото, гессит, петцит, алтаит, калаверит, а также на месторождении Новогоднее-Монто арсенопирит, As-пирит и кобальтин.

**Сравнительная характеристика генераций пирита месторождений
Петропавловское и Новогоднее-Монто**

Генерации пирита	Месторождение	
	Петропавловское	Новогоднее-Монто
Py-1	Распространен в магнетит-сульфидных рудах (до первых см), образует рассеянную вкрапленность идиоморфных кристаллов (0,1—3 мм) или линейные разноориентированные скопления, реже гнезда (до 0,5—0,7 см)	Распространен в магнетит-сульфидных рудах и образует гнезда (до 0,6 см), мелкую рассеянную вкрапленность, ксеноморфные выделения (0,1—2 мм), тонкие и крупные прожилки (до 1,5 см), бесформенные скопления в магнетите, в породообразующих и жильных минералах
Py-2	Встречается в золото-сульфидно-кварцевых рудах. Входит в состав метасоматических ассоциаций, реже — в кварцевых прожилках в виде ксеноморфных зерен (100—500 мкм) в вулканиках; характеризуется тесной ассоциацией с халькопиритом (до 200 мкм), и в меньшей степени — с образующим в нем включения галенитом и сфалеритом	Образует сростания с галенитом и халькопиритом (до 200 мкм), оба минерала по микротрещинам интенсивно замещают или присутствуют в виде включений в Py-1
Py-3	Встречается в золото-сульфидно-кварцевых рудах. Образует наложенную рассеянную до густой вкрапленности ксеноморфных агрегатов или разноориентированные линейные скопления до 1 см в рудных метасоматитах	Образует агрегаты до 1—2 см, часто катаклазированные и сцементированные халькопиритом

Редкие выделения самородного золота в рудах связаны в основном с пиритом (Петропавловское — с Py-2; Новогоднее-Монто — с Py-3), в единичных случаях — с халькопиритом. Пробность самородного золота месторождения Петропавловское имеет широкий диапазон (780—950), тогда как для месторождения Новогоднее-Монто характеризуется невысокими значениями (757—893). При этом теллуриды в рудах месторождения Новогоднее-Монто встречаются реже, чем в рудах Петропавловского месторождения.

Главные примеси в пирите представлены As, Co и на Новогоднем-Монто — также Ni, в незначительных концентрациях присутствует Ag и на Новогоднем-Монто — Zn; Sb, Te, Se; другие элементы обычно ниже предела обнаружения (PMCA) или близки к нему, но выявляются более чувствительным методом LA-ICP-MS (табл. 2 и 3).

По данным PMCA, наибольшие количества As (до 0,14 мас. %) и Co (до 2/52 мас. %) для месторождения Петропавловское содержит Py-1, тогда как Py-3 месторождения Новогоднее-Монто содержит наибольшую концентрацию Co до 7,24, As до 1,51 и Ni до 1,76 мас. %. Py-2, по сравнению с Py-1 он обогащен Ag (месторождение Петропавловское до 0,13 мас. %), тогда как наибольшее содержание серебра содержит Py-3 (до 0,16 мас. %). Иногда для Py-2 месторождения Новогоднее-Монто наблюдаются повышенные концентрации Ni (до 0,15 мас. % и в одном случае 1,67 мас. %) и Zn (до 1,61 мас. %).

Наибольшие содержания золота для Петропавловского месторождения установлены в Py-2 (до 49 ppm). Содержание золота в Py-1 от 0,02 до 13 ppm. Максимальные концентрации золота для месторождения Новогоднее-Монто установлены в Py-1 (12 ppm), в Py-2 и Py-3 до 0,8 и 2 ppm соответственно. При этом вариации в Py-1 на обоих месторождениях более значительны, чем в Py-2 и Py-3.

Таблица 2

Пределы и средние значения содержания некоторых элементов в пирите по данным LA-ICP-MS месторождения Петропавловское

Генерация	n	As	Sn	Se	Ni	Co	Au	Ag	Te	Bi	Zn
1	25	18—417 (45)	0,04—1 (0,2)	1,6—42 (15)	8—75 (26)	3,4—2825 (124)	0,02—13 (2)	0,03—16 (0,6)	1,01—66 (6)	0,03—3 (0,4)	0,3—19 (2)
2	15	23—33 (27,3)	0,03—0,4 (0,1)	2—26 (11)	6—42 (16)	2—91 (9)	0,02—49 (0,35)	0,05—105 (1)	0,6—76 (3,5)	0,03—6 (0,34)	0,4—6 (2)
3	21	9—53 (27)	0,05—1,3 (1,2)	3,2—78 (13)	5—66 (16)	2,4—153 (35)	0,03—47 (1)	0,03—86 (1,6)	0,03—65 (4,3)	0,03—4,2 (0,5)	0,8—6 (2)

Условные обозначения (здесь и в табл. 3): в числителе приведены пределы содержания, в знаменателе — среднее геометрическое; n — количество зерен.

Таблица 3

Пределы и средние значения содержания некоторых элементов в пирите по данным LA-ICP-MS месторождение Новогоднее-Монто

Генерация	n	As	Sn	Se	Ni	Co	Au	Ag	Te	Bi	Zn
1	19	75—11050 (497)	0,09—0,3 (0,2)	35—347 (136)	3—774 (95)	51—3530 (355)	0,15—12 (0,6)	0,02—159 (3,6)	0,02—141 (20)	0,03—15 (0,16)	2,3—3130 (41)
2	9	6—5287 (677)	0,4—11 (2)	43—117 (74)	0,02—438 (13)	137—1207 (502)	0,04—0,8 (0,2)	0,4—11 (2)	1,3—9 (4)	0,02—0,4 (0,1)	0,4—15 (3)
3	17	53—4210 (221)	0,04—5 (0,4)	5—363 (44)	8—40 (10)	14—2290 (271)	0,02—2 (0,4)	0,04—5 (0,4)	0,5—60 (7)	0,02—0,6 (0,07)	0,7—280 (4)

По данным LA-ICP-MS, для месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто наблюдаются тенденция положительной связи содержаний Au и Ag (коэффициент корреляции $r = 1$ и $r = 0,7$) для Py-2 и Au и Te ($r = 1$ — Py-2 и $r = 0,5$ — Py-1) (рис. 2), а также между другими элементами.

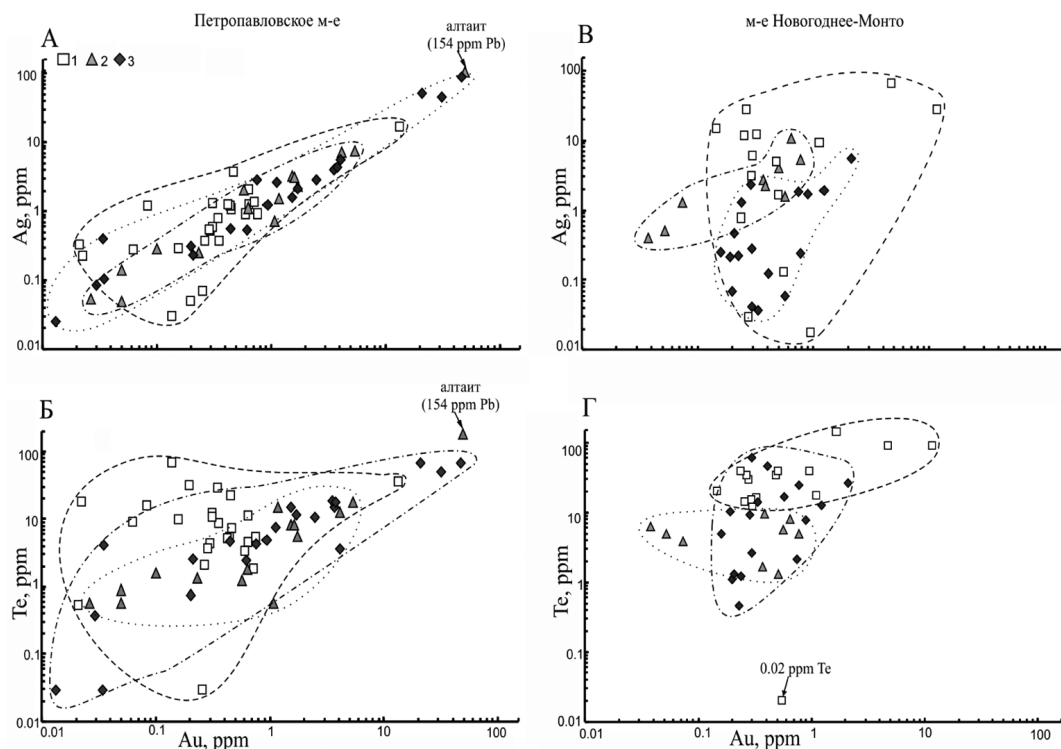


Рис. 2. Бинарные диаграммы содержаний Au, Ag, Te (ppm) в пирите месторождений Петропавловское (А, Б) и Новогоднее-Монто (В, Г) по данным метода LA-ICP-MS: 1—3 — генерации пирита: 1 — Py-1; 2 — Py-2; 3 — Py-3, пунктирные линии — области распределения фигуративных точек для разных генераций пирита. Стрелками показаны выпавшие из контуров соответствующих областей зерна пирита с аномально-высокими и аномально-низким содержаниями других элементов-примесей (Pb — 154 ppm, Te — 0.02 ppm)

Следует отметить, что в отдельных анализах Py-1 фиксируются повышенные содержания Cu (до 1442 ppm), Co (до 2825 ppm), As (до 417 ppm), Ni (75 ppm), Zn (до 19 ppm); для Py-2 — Au (до 49 ppm), Ag (до 105 ppm), Te (до 76 ppm); для Py-3 — Pb (до 838 ppm) и Bi (до 4 ppm) (рис. 2, а, б), — месторождение Петропавловское. Также для месторождения Новогоднее-Монто фиксируются повышенные содержания Au (до 12 ppm), Ag (до 159 ppm) (рис. 2, в, г), Cu (до 4520 ppm), Ni (до 774 ppm), Co (до 2530 ppm), As (до 1105 ppm), Zn (до 3130 ppm), что вероятно связано с захватом нановключений петцита (Ag_3AuTe_2), калаверита ($AuTe_2$), электрума (Ag), алтаита (Pb, Te), гессита ($AgTe$), блеклой руды (Cu, As, Sb), кобальтина (Co, As, Ni), а также сульфосолей (Ag, As). Кроме того, изредка присутствуют пониженные значения Te — 0,02 ppm (Новогоднее-Монто, рис. 2, г).

Обращает на себя внимание параллельный рост содержания в пирите Au, Ag и Te (см. рис. 2, а, б). Это можно интерпретировать как присутствие все большего числа включений петцита (Au_3AgTe_2) в пирите с увеличением концентрации

золота в этом сульфиде, а также на месторождении Новогоднее-Монто — калаверита (AuTe_2) (параллельный рост Au и Te, см. рис. 2, в, з).

Главным золотоконцентрирующим минералом руд обоих месторождений является пирит. Самородное золото ассоциируется в основном с Py-2 (месторождение Петропавловское) и Py-3 (месторождение Новогоднее-Монто), реже — с халькопиритом. Доля «невидимой» формы золота можно оценить на уровне 10–15% от валового содержания золота в рудах.

Для Петропавловского месторождения концентрации «невидимого» золота в пирите-2 находятся в диапазоне от 0,02 до 49 ppm (ср. геом. — 0,7 ppm), а для для месторождения Новогоднее-Монто в пирите-1 от 0,15 до 12 ppm (ср. геом. — 0,6 ppm). Самые высокие содержания серебра для месторождения Новогоднее-Монто также установлены в Py-1 до 159 ppm (ср. геом. — 3,6 ppm), а для месторождения Петропавловское в Py-2 чуть меньше до 105 ppm (ср. геом. — 1 ppm).

Рассматривая характер «невидимого» золота для Петропавловского месторождения, можно сделать вывод, что оно по крайней мере частично связано с наноразмерными выделениями самородного золота и петцита, а для месторождения Новогоднее-Монто — с наноразмерными выделениями самородного золота и калаверита. Теллуриды в рудах месторождения Новогоднее-Монто встречаются редко и их содержание в рудах очень низкое, что доказывают пониженные содержания (Te — 0,02 ppm). По данным LA-ICP-MS, Py-1 месторождение Новогоднее-Монто содержит наибольшее количество As (до 11050 ppm), Cu (до 4520 ppm), Ni (774 ppm), Au (до 12 ppm), Ag (до 159 ppm), Te (до 141 ppm), Bi (до 15 ppm), Zn (до 3130 ppm) и Py-2 характеризуется повышенными содержаниями Sn (до 1,2 ppm) и Py-3 — Se (до 347 ppm).

Для месторождения Петропавловское Py-1 имеет повышенные значения Cu (до 1442 ppm), Co (до 2825 ppm), As (до 417 ppm), Ni (75 ppm), Zn (до 19 ppm); Py-2 — Au (до 49 ppm), Ag (до 105 ppm), Te (до 76 ppm) и Py-3 — Se (до 78 ppm).

Кроме того, содержания Co, Zn, As, Se, Te в пирите на месторождении Новогоднее-Монто значительно выше, чем на месторождении Петропавловское.

Таким образом, концентрации микропримесей изменяются по мере развития минералообразования. Содержания Ni, Zn, Co, As, (Au, Ag, Te, Bi — месторождение Новогоднее-Монто) максимальны в начале гидротермального этапа. Концентрации Se, наоборот, увеличиваются в последнюю стадию гидротермального этапа.

Автор благодарит И.В. Викентьева и Е.Э. Тюкову за помощь и советы; А.П. Трофимова за предоставлены образцы; Н.В. Трубкина (СЭМ/ЭДС), В.Д. Абрамовой (LA-ICP-MS), Е.В. Ковальчук (РСМА) за микроанализы, а также руководство ОАО «Ямалзолото» за содействие в проведении полевых работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беневольский Б.И., Волчков А.Г., Процкий А.Г. Перспективы создания рудной сырьевой базы золотодобывающей промышленности в Полярноуральском регионе // Минеральные ресурсы России // Экономика и управление. 2004. № 2. С. 10–15.

- [2] *Кениг В.В., Бутаков К.В.* Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское — новый золоторудный район на Полярном Урале // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 11. С. 22—24.
- [3] *Мансуров Р.Х.* Геологическое строение Петропавловского золоторудного месторождения, Полярный Урал // *Руды и металлы*. 2009. № 5. С. 70—74.
- [4] *Трофимов А.П., Лющкин В.А., Пивоваров А.П.* Геолого-геохимическая модель золоторудного железо-скарнового месторождения Новогоднее-Монто на Полярном Урале // *Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Мат. науч. конф. «XI Чтения А.Н. Заварицкого»*. Екатеринбург, 2005. С. 102—107.
- [5] *Черняев Е.В., Черняева Е.И., Седельникова А.Ю.* Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // *Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Мат. науч. конф. «XI Чтения А.Н. Заварицкого»*. Екатеринбург, 2005. С. 131—137.

THE FEATURES PYRITE COMPOSITION OF PETROPAVLOVSKOE AND NOVOGODNEE- MONO GOLD DEPOSITS (THE POLAR URALS)

Yu.N. Ivanova

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography,
Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences (IGEM RAS)
Staromonetny per., 35, Moscow, Russia, 119017

The paper shows the comparative characteristics of the pyrite chemical composition of Petropavlovskoe (Au-porphyry type) and Novogodnee-Monto (Au-Fe-skarн type) deposits. We used EPMA and LA-ICP-MS that traced the variation of the main ore-forming elements in the presses of deposits formation.

Key words: the Polar Urals, “invisible” gold, EPMA, LA-ICP-MS

REFERENCES

- [1] Benevol'skij B.I., Volchkov A.G., Prockij A.G. Prospects of creation of the ore resource base of gold mining industry on the Polar Urals region // *Mineral resources of Russia // Economics and management*. 2004. № 2. P. 10—15. [Benevol'skij B.I., Volchkov A.G., Prockij A.G. Perspektivy sozdaniya rudnoj syrevoj bazy zolotodobyvaush'e promyshlennosti v Pripoljarnouralskom regione // *Mineralnye resursy Rossii // Ekonomika i upravlenie*. 2004. № 2. S. 10—15.]
- [2] Kenig V.V., Butakov K.V. Novogodnee-Monto and Petropavlovskoe ore gold deposits are new gold district on the Polar Urals // *Exploration and protection of mineral resources*. 2013. № 11. P. 22—24. [Kenig V.V., Butakov K.V. Mestorozhdeniya rudnogo zolota Novogodnee-Monto i petropavlovskoe novyj zolotorudnyj rajon na Polyarnom Urale // *Razvedka-i-ohrana neдр*. 2013. № 11. S. 22—24.]
- [3] Mansurov R.H. Geological structure of Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals // *Ores and metals*. 2009. № 5. P. 70—74. [Mansurov R.H. Geologitheskoe stroenie Petropavlovskogo zolotorudnogo mestorogdenija, Polarnyj Ural // *Rudy i metally*. 2009. № 5. S. 70—74.]
- [4] Trofimov A.P., Ljuchkin V.A., Pivovarov A.P. Geological and geochemical model of the Au-Fe-skarн Novogodnee-Monto deposit on the Polar Urals // *Skarns, their genesis and ore content (Fe,*

Cu, Au, W, Sn, ...): Mat. of scientific. conf. "XI Reading of A.N. Zavaritskogo". Ekaterinburg. 2005. S. 102—107. [Trofimov A.P., Ljuchkin V.A., Pivovarov A.P. Geologo-geokhimicheskaya model zolotorudnogo zhelezo-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodneye-Monto na Polyarnom Urale // Skarny, ikh genezis i rudonosnost (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Mat. nauch. konf. «XI Chteniya A.N. Zavaritskogo». Yekaterinburg. 2005. S. 102—107.]

- [5] Chernjaev E.V., Chernjaeva E.I., Sedel'nikova A.Ju. Geology of Fe-skarn Novogodnee-Monto deposit (the Polar Urals) // Skarns, their genesis and ore content (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Mat. of scientific. conf. "XI Reading of A.N. Zavaritskogo". Ekaterinburg. 2005. S. 131—137. [Chernjaev E.V., Chernjaeva E.I., Sedel'nikova A.Ju. Geologiya zoloto-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodneye-Monto (Polyarny Ural) // Skarny, ikh genezis i rudonosnost (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Mat. nauch. konf. «XI Chteniya A.N. Zavaritskogo». Yekaterinburg. 2005. S. 131—137.]