

Минералогия и технология обогащения руд проявлений серебра Хачакчан и Ночное (Якутия)

Осипов А.С.¹, Глазунова М.Ю.², Калашников А.О.², Компанченко А.А.²,
Пахомовский Я.А.², Романов А.А.³, Фомин А.В.⁴

¹ Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, osipov.anst@yandex.ru

² Геологический институт КНЦ РАН

³ ООО «ГК «Сырьевые активы», Санкт-Петербург, romanovalex@inbox.ru

⁴ Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. В работе приведены предварительные результаты изучения минералогии и технологии гравитационного обогащения серебряных руд проявлений Хачакчан и Ночное. Рудные тела представлены зонами кварц-карбонатного прожилкования в песчаниках и алевролитах. Основными серебросодержащими рудными минералами являются самородное серебро, луанхеит, еугенит, ленаит, пираргирит, аргентотетраэдрит-(Fe), стефанит, имитерит, акантит, аргентополибазит и халькопиритом. Ключевой особенностью является присутствие интерметаллида Ag-Hg (амальгамы серебра) в качестве основного носителя полезного компонента, что отличает представленные проявления от известных на территории России месторождений серебра и свидетельствует о нетипичных условиях минералообразования. Приведены основные сходства и различия рассматриваемых проявлений в отношении минерального состава, оценено его влияние на гравитационное обогащение руд.

Ключевые слова: технологическая минералогия, серебро, амальгама серебра, рудная минерализация, месторождения серебра.

Mineralogy and mineral processing technology of the Khachakchan and Nochnoe silver deposits (Yakutia)

Osipov A.S.¹, Glazunova M.Yu.², Kalashnikov A.O.², Kompanchenko A.A.²,
Pakhomovsky Ya.A.², Romanov A.A.³, Fomin A.V.⁴

¹ Nanomaterials Research Centre of Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, osipov.anst@yandex.ru

² Geological Institute of Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity

³ GK «Syr'evye aktivy» LLC, Saint-Petersburg, romanovalex@inbox.ru

⁴ Mining Institute of Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity

Abstract. This paper provides preliminary results of the mineralogy and technology of gravitational enrichment study of silver ores of the Khachakchan deposit. The material for the research is presented by technological samples of ore from the Khachakchan and Nochnoe sites. Ore bodies are represented by zones of veining in sandstones and siltstones. The main silver-bearing ore minerals are native silver, luanheite, eugenite, lenaite, pyrrargyrite, argentotetrahedrite-(Fe), stephanite, imiterite, acanthite, argentopolybasite and chalcopryrite. The key feature is the presence of Ag-Hg intermetallic compound (silver amalgam) as the main carrier of silver. This distinguishes them from the silver deposits known in Russia and indicates atypical conditions of mineral formation. The main similarities and differences of the considered ore occurrences in relation to the mineral composition are presented, its influence on the gravitational enrichment of ores is estimated.

Keywords: technological mineralogy, silver, silver amalgam, ore mineralization, silver deposits.

Введение

Серебро – один из основных применяемых в различных областях промышленности благородных металлов. В природе оно встречается как в самородном виде, так и в соединениях с другими элементами. При этом чаще всего серебро добывается в качестве попутного компонента в золото-серебряных, свинцово-цинковых и других комплексных месторождениях, в то время как собствен-

ные месторождения серебра распространены значительно реже. На территории России одним из таких объектов является Аллара-Сахский рудный узел.

Аллара-Сахский рудный узел находится в центральной части Верхоянского хребта (Республика Саха (Якутия)), в юго-западной части Томпо-Делинынской минерагенической зоны. Узел был обнаружен в ходе геологической съемки масштаба 1:200 000, проводившейся в 1985–1990 гг. Он объединяет 5 серебряных рудопоявлений – Ночное, Кит, Холоднинское, Сокольское и наиболее крупное в отношении ресурсного потенциала – Хачакчан (рис. 1). Все участки приурочены к восточному крылу Аллара-Сахской антиклинали. Вмещающие образования представлены переслаиваниями осадочных пород – песчаников, алевролитов и аргиллитов пермской и триасовой систем. Рудные минерализованные зоны связаны с многочисленными непротяженными (первые километры) тектоническими нарушениями северо-восточного и субширотного простирания. Серебряная минерализация приурочена к зонам дробления и прожилкования мощностью 0.1–5 м, содержания серебра в отдельных пробах достигают 15–20 кг/т Ag.

Материал для изучения отобран в ходе поисково-оценочных работ, выполнявшихся ООО «ГК Сырьевые Активы» в 2022 г. на проявлениях Хачакчан и Ночное. Он представлен двумя технологическими пробами руд – Х-2022 и Н-2022 соответственно. В настоящий момент авторами осуществляются исследования минералого-петрографического состава и технологических особенностей данных руд. Изучение аншлифов и искусственных препаратов, изготовленных из смеси эпоксидной смолы и технологических продуктов, проводилось в отраженном поляризованном свете на рудно-петрографическом микроскопе Leica DM 2500P. Рентгенофазовый анализ выполнялся на дифрактометре Rigaku SmartLab Miniflex II в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ РАН, электронная микроскопия – при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1450 Carl Zeiss с энергодисперсионным спектрометром AZtecLive Advanced Ultim Max 100 в Геологическом институте КНЦ РАН.

В представленной статье отражены промежуточные результаты исследования.

Минералого-петрографическая характеристика руд

Рудные тела представлены зонами кварцевого, кварц-карбонатного и карбонатного прожилкования в песчаниках и алевролитах. Мощность отдельных прожилков колеблется от первых миллиметров до 10–15 см. Основные нерудные жильные минералы формируют гнезда и прожилки. Они представлены кварцем и сидеритом (рис. 2), при этом их соотношение для разных проявлений существенно отличается.

Сидерит, как правило, частично или полностью замещается гематитом и гидроокислами железа. Результаты рентгенофазового анализа проб представлены в таблице 1. Видно, что руды Ночного и Хачакчана существенно различаются количеством сидерита, а также присутствием в пробе Х-2022 доломита. Отличия в соотношении кварца, альбита и клинохлора, вероятно, связаны с локальными колебаниями в составе вмещающих осадочных пород.

Таблица 1. Результаты рентгенофазового анализа проб
Table 1. Results of X-ray powder diffraction of samples

Минерал, %	Ночное	Хачакчан
Кварц	42.9	52.5
Альбит	13.4	21.5
Анортит	10.5	8.4
Мусковит	4.2	4.7
Гётит	2.5	3.6
Сидерит	21.6	2.3
Клинохлор	4.0	–
Галенит	0.9	0.3
Доломит	–	6.6
Сумма	100.0	100.0

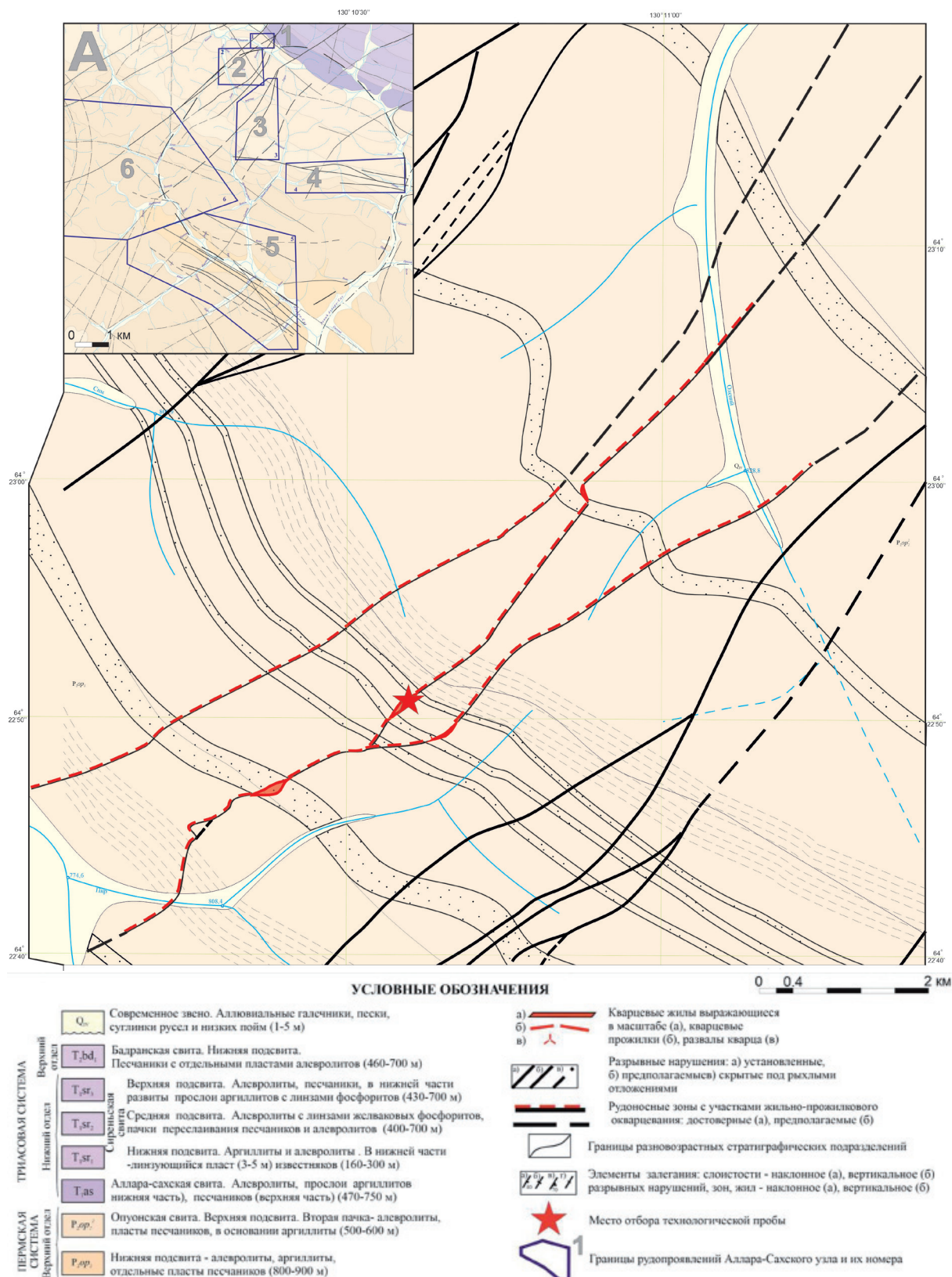


Рис. 1. Геологическая карта проявления Хачакчан.

Деталь А – план расположения рудопроявлений в пределах Аллара-Сахского рудного узла.
1 – Кит, 2 – Хачакчан, 3 – Сокольское, 4 – Ночное, 5 – Холоднинское, 6 – Западный фланг (перспективная площадь).

Fig. 1. Geological map of Khachakchan deposit.

Detail A is a plan for the location of ore sites within the Allara-Sakhsky ore node.
1 – Kit, 2 – Khachakchan, 3 – Sokolskoye, 4 – Nochnoe, 5 – Kholodninskoye, 6 – Western flank (perspective site).

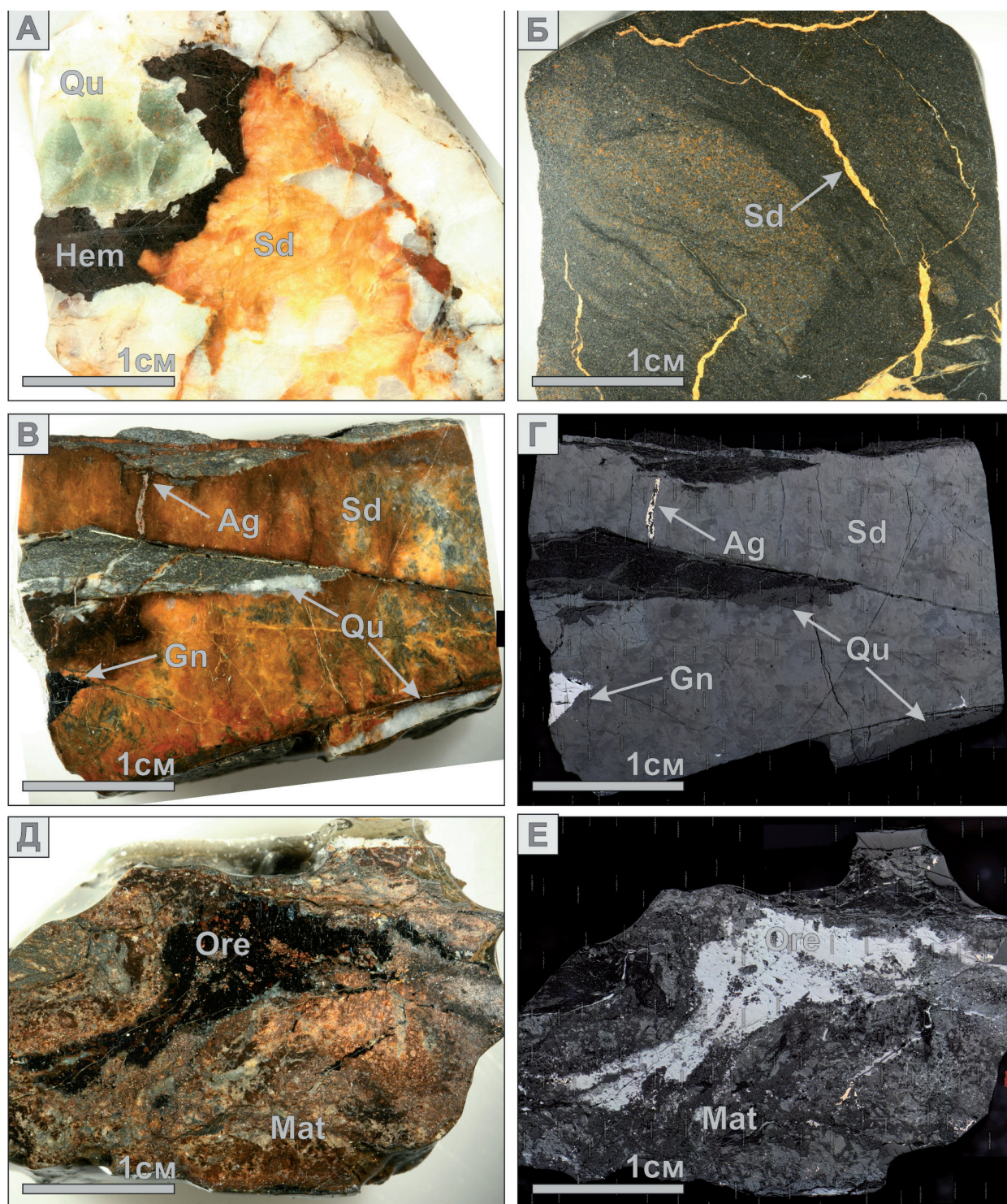


Рис. 2. Аншлифы из руд проявлений Хачакчан и Ночное.

А – материал кварц (Qu)-сидеритовой (Sd) жилы. Сидерит замещается гематитом (Hem); Б – тонкое сидеритовое (Sd) прожилкование в алевропесчанике; В, Г – сидеритовый (Sd) прожилок в рассеянном (В) и отраженном (Г) свете. Наблюдаются выделения кварца (Qu), галенита (Gn) и тонкий прожилок самородного серебра (Ag). Д, Е – рудный прожилок (Ore) в жильной кварц-сидеритовой матрице (Mat) в рассеянном (Д) и отраженном (Е) свете.

Fig. 2. Polished sections of the Khachakchan and Nochnoe ores.

А – quartz (Qu)-siderite (Sd) vein. Siderite is replaced by hematite (Hem); Б – thin siderite (Sd) veining in sandstone; В, Г – siderite (Sd) veins in scattered (В) and reflected (Г) light. Quartz (Qu), galena (Gn) and thin native silver (Ag) vein. Е, F – ore veins (Ore) in a vein quartz-siderite matrix (Mat), scattered (Е) and reflected (F) light.

Для зон кварц-карбонатного прожилкования характерно присутствие различных рудных минералов. Они формируют ксеноморфные включения размером от первых миллиметров до 1–2 см в массе других жильных минералов и во вмещающей породе. В редких случаях встречаются тонкие (до 5–7 мм) мономинеральные прожилки, выполненные амальгамой серебра.

Рудные минералы условно можно разделить на две группы. Первая группа представлена фазами, содержащими в своем составе серебро. Наиболее распространены из них – минералы группы амальгамы серебра, пираргирит, аргентотетраэдрит-(Fe), стефанит. Они составляют основную массу прожилков и других выделений. В виде отдельных зерен в таких участках встречаются имитерит, самородное серебро, ленаит и серебросодержащий халькопирит. Широко распространен акантит, формирующий каймы вокруг других минералов. Примечательно, что халькопирит наблюдается в виде мелких реликтовых зерен, которые замещаются ленаитом и, далее, акантитом. Такие выделения характерны только для руд Ночного. Интересной является находка сульфосоли, по своему составу отвечающей аргентополибазиту. Ранее опубликованные составы минерала (Števkó et al., 2023) демонстрируют заметную примесь мышьяка (0.22–0.61 ф.к. As), в то время как обнаруженная нами фаза отличается полным его отсутствием. Диагностика будет дополнена другими методами. Химический состав серебросодержащих минералов приведен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав серебросодержащих минералов
Table 2. Chemical composition of silver-bearing minerals

Вес. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S	н.о.	н.о.	н.о.	26.39	17.57	18.87	14.98	12.77	11.98	33.21	14.06
Sb	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	22.08	24.54	14.68	н.о.	н.о.	н.о.	10.07
Fe	н.о.	0.38	н.о.	22.68	1.96	3.23	н.о.	1.76	н.о.	29.16	н.о.
Ni	0.47	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.26	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Cu	2.18	н.о.	н.о.	6.25	1.99	13.48	0.59	0.59	н.о.	31.61	0.58
Zn	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3.54	2.94	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Ag	97.86	64.19	70.42	44.73	51.71	33.00	68.60	46.11	87.72	2.97	73.67
Hg	н.о.	34.00	29.00	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	37.16	н.о.	н.о.	н.о.
Сумма	100.51	98.57	99.42	100.05	98.86	96.07	99.12	98.39	99.69	96.96	98.39

Примечание. *1 – серебро Ag; 2 – луаньхейт (Ag_3Hg); 3 – евгенит ($\text{Ag}_{11}\text{Hg}_2$); 4 – ленаит (AgFeS_2); 5 – пираргирит (Ag_3SbS_3); 6 – аргентотетраэдрит-(Fe) ($\text{Ag}_6(\text{Cu}_4\text{Fe}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{12}\text{S}$); 7 – стефанит (Ag_5SbS_4); 8 – имитерит (Ag_2HgS_2); 9 – акантит (Ag_2S); 10 – халькопирит (CuFeS_2); 11 – аргентополибазит (?) ($\text{Ag}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$); н.о. – элемент не обнаружен.

Таблица 3. Вариации составов интерметаллидов Ag-Hg
Table 3. Variations of Ag-Hg intermetallic compounds

Проба	Ночное (20 изм.)			Хачакчан (40 изм.)		
Элемент	Мин.	Макс	Сред.	Мин.	Макс	Сред.
S	н.о.	0.53	0.05	н.о.	н.о.	н.о.
Sb	н.о.	2.46	0.67	н.о.	н.о.	н.о.
Fe	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1.0	0.06
Ni	н.о.	0.45	0.06	н.о.	0.3	0.02
Cu	н.о.	2.00	0.29	н.о.	1.3	0.19
Ag	63.45	87.99	80.23	64.2	83.0	75.11
Hg	9.66	36.59	18.18	15.5	34.0	24.13
Сумма	99.47			99.50		

Примечание. н.о. – элемент не обнаружен.

Минералы группы амальгамы серебра характеризуются переменным соотношением Ag/Hg. Как правило, в пределах их зерен наблюдается зональность, вызванная колебаниями данных элементов. По химическому составу можно выделить два минеральных вида – евгенит и луаньхейт.

При этом основная часть проанализированных зерен интерметаллидов Ag-Hg содержит меньшее количество ртути, чем предполагает идеальная формула луаньхеита. Так, усреднённый состав амальгамы серебра отвечает соотношению Ag/Hg 80.23/18.18 вес. % в рудах Ночного и 75.11/24.13 вес. % в рудах Хачакчана (табл. 3). Чистое в отношении ртути серебро встречается редко.

Прочие рудные минералы представлены галенитом, сфалеритом, арсенопиритом, пиритом, халькопиритом и гематитом. Широко развиты более поздние фазы, такие как англезит, церуссит, азурит и гётит (гидроокислы железа). Галенит формирует крупные (до нескольких сантиметров) субидiomорфные выделения, которые по краям замещают акантит, англезит и церуссит. Сфалерит развивается в виде идиоморфных зерен на границе индивидов пираргирита. Арсенопирит образует шестоватые и ромбовидные кристаллы в качестве включений в прустите и скопления более мелких, неправильных, трещиноватых зерен в породе. Пирит встречается в виде фрамбоидов во вмещающей породе, реже – в виде отдельных кристаллов в рудных прожилках. Гематит встречается в виде псевдоморфоз по сидериту. Он образует футляровидные кристаллы, и, в свою очередь, замещается гидроокислами железа.

В целом, для обоих исследованных рудопоявлений характерен сходный набор минеральных видов (табл. 4). В то же время их соотношение существенно различается. Так, руды проявления Хачакчан в большей степени обогащены серебросодержащими фазами – аргентотетраэдритом-(Fe), стефанитом, пираргиритом и амальгамой серебра. В рудах Ночного, напротив, эти минералы наблюдаются относительно редко, при этом широко распространены галенит и арсенопирит, отмечен также халькопирит. В обоих пробах часто встречаются поздние акантит, гематит и гидроокислы железа.

Таблица 4. Соотношение основных рудных минералов
Table 4. The ratio of the main ore minerals

Минерал	Ночное	Хачакчан
Самородное серебро (Ag)	+	+
«Амальгама серебра» Ag_xHg_y	+	++
Пираргирит Ag_3SbS_3	+	++
Стефанит Ag_5SbS_4	+	+++
Аргентотетраэдрит-(Fe) $Ag_6(Cu_4Fe_2)Sb_4S_{12}$	+	+++
Акантит Ag_2S	++	++
Галенит PbS	+++	+
Арсенопирит $FeAsS$	++	+
Сфалерит ZnS	+	+
Пирит FeS_2	+	+
Халькопирит $CuFeS_2$	+	–
Гематит Fe_2O_3	+++	+++
Гидроокислы железа	+++	+++
Графит C	+	+

Примечание. +++ – главные минералы; ++ – второстепенные минералы; + – редкие минералы; – – минерал не обнаружен.

Гравитационное обогащение проб

Обогащение проб проводилось по традиционной схеме – первоначальный материал был раздроблен до фракции -5 мм. Далее производилось квартование и дробление до фракции -1 мм, после чего была отобрана навеска на проведение опыта по двухстадийному гравитационному обогащению на концентрационном столике. На первой стадии были получены концентрат КС-1, промпродукт ПП-1 и хвосты ХВ, после чего концентрат был отправлен на вторую перераспределку, получены кон-

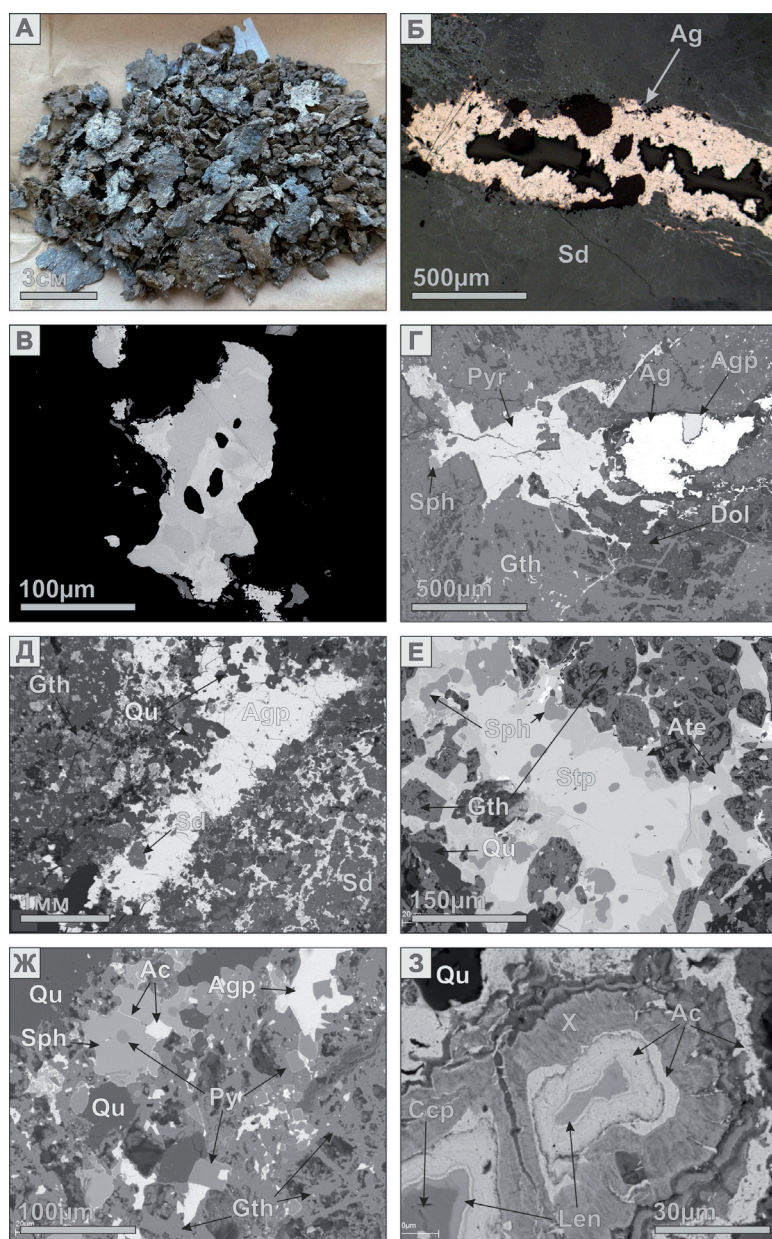


Рис. 3. А – недробимый остаток в классе +5 мм пробы с участка Хачакчан, сложенный различными сростками самородного серебра; Б – серебряный прожилок (Ag) в массе сидерита (Sd) в отраженном свете; В–З – рудная минерализация в препаратах, BSE-изображения; В – зональность в зерне «амальгамы серебра», вызванная колебаниями соотношения Ag/Hg; Г – пираргирит (Pyr), «амальгама серебра» (Ag), аргентополибазит (Agp), сфалерит (Sph) и доломит (Dol) в массе гётита (Gth); Д – аргентополибазит в гётит (Gth) – кварц (Qu) – сидеритовой (Sd) матрице; Е – агрегат стефанита (Stp), аргентотетраэдрита (Ate) и сфалерита (Sph) в массе гётита (Gth) и кварца (Qu); Ж – акантит (Ac) формирует тонкие каймы вокруг зерен пирита (Py) и сфалерита (Sph) в ассоциации с аргентополибазитом (Agp), кварцем (Qu) и гётитом (Gth); З – последовательное развитие ленаита (Len) и акантита (Ac) по халькопириту (Ccp). Часть кайм сложена предположительно тонким агрегатом данных минералов (X).

Fig. 3. A – non-crushable residue in the +5 mm class of the Khachakchan site sample, composed of various intergrowths of native silver; B – silver (Ag) vein in the mass of siderite (Sd) in reflected light; C–H – ore mineralization in polished sections, BSE-images; C – zoning in the grain of “silver amalgam” expressed by fluctuations in the Ag/Hg ratio; D – pyrrhite (Pyr), “silver amalgam” (Ag), argentopolybasite (Agp), sphalerite (Sph) and dolomite (Dol) in the mass of goethite (Gth); E – argentopolybasite in a goethite (Gth) – quartz (Qu) – siderite (Sd) matrix; F – aggregate of stephanite (Stp), argentotetrahedrite (Ate) and sphalerite (Sph) in the mass of goethite (Gth) and quartz (Qu); G – acanthite (Ac) forms thin rims around pyrite (Py) and sphalerite (Sph) grains in association with argentopolybasite (Agp) quartz (Qu) and goethite (Gth); H – sequential development of lenaite (Len) and acanthite (Ac) by chalcopryrite (Ccp). Part of the rims is presumably composed of a fine aggregate of these minerals (X).

центрат КС-2 и промпродукт ПП-2. Для проведения минералогических исследований все продукты были расситованы на три класса ($-1+0.315$ мм, $-0.315+0.04$ мм, -0.04 мм). Обилие самородного серебра было учтено на этапах дробления – на каждом из них недробимый остаток просеивался на сите, взвешивался и отбирался в отдельную навеску. Несмотря на существенное различие в выходах, материал недробимого остатка для обеих проб идентичен. Это пластинки и проволоки самородного серебра (амальгамы), а также его сростки с блеклыми рудами, сидеритом и, реже, с кварцем. Недробимый остаток класса $+5-1$ мм пробы Х-2022 изображен на рисунке 3 А.

Таблица 5. Выходы недробимого остатка по классам проб

Table 5. Non-crushable residue masses by sample classes

Проба	Х-1 (Хачакчан)	Н-1 (Ночное)
Класс	Недробимый остаток, г	
+5 мм	1 361.1	54.9
-5+1 мм	337.7	12.1
Итого:	1 698.8	67.0

Результаты анализа продуктов обогащения показали существенное влияние на них минеральной ассоциации исходных проб. Так, концентрат Ночного (рис. 4) демонстрирует довольно скудный состав. Основные минералы – галенит и сидерит, изредка встречаются сульфосоли серебра. Самородное серебро находится либо в раскрытом виде, либо в сростках с породообразующими минералами и образующимися по ним гидроокислами железа.

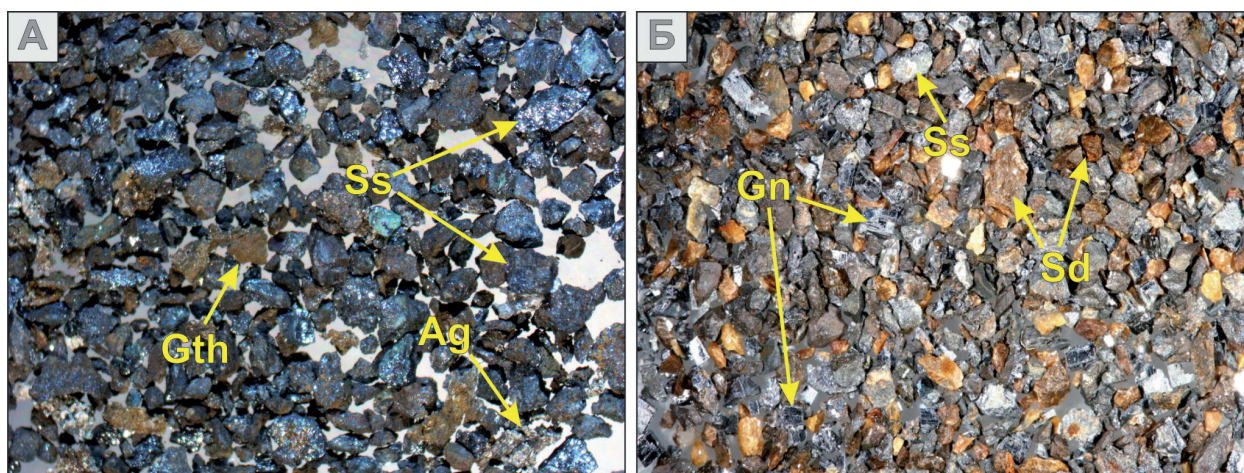


Рис. 4. Изображения концентрата КС-2 проб в классе $-1+0.315$ мм. А – Хачакчан. Ag – самородное серебро, Gth – гётит, Ss – сульфосоли серебра; Б – Ночное. Sd – сидерит, Gn – галенит, Ss – сульфосоли серебра.

Fig. 4. Images of the sample concentrates in class $-1+0.315$ mm. А – Khachakchan. Ag – native silver, Gth – goethite, Ss – silver sulfosalt; Б – Nochnoe. Sd – siderite, Gn – galena, Ss – silver sulfosalt.

Концентрат Хачакчана более разнообразен по минеральному составу. Основной объем формируют серебросодержащие фазы и гётит. Серебро встречается в раскрытом виде, в сростках с породообразующими минералами и образующимися по ним гидроокислами железа, а также в сростках с серебросодержащими сульфидами и сульфосолями.

В концентратах КС-2, ожидаемо, с уменьшением класса крупности, число раскрытых зерен серебра увеличивается, а число сростков с серебром – уменьшается (рис. 5). В промпродуктах ПП-2 и хвостах ХВ раскрытое серебро также присутствует. При этом потери раскрытого серебра в пробе Х-2022 значительно превышают таковые в Н-2022. Это может объясняться, во-первых, в целом более высоким содержанием серебра в рудах проявления Хачакчан, а во-вторых, формой его нахождения.

Концентрат КС-2, полученный из пробы Х-2022 показывает взрывной рост раскрытого серебра в тонком классе, тогда как в концентрате пробы Н-2022 рост происходит постепенно.

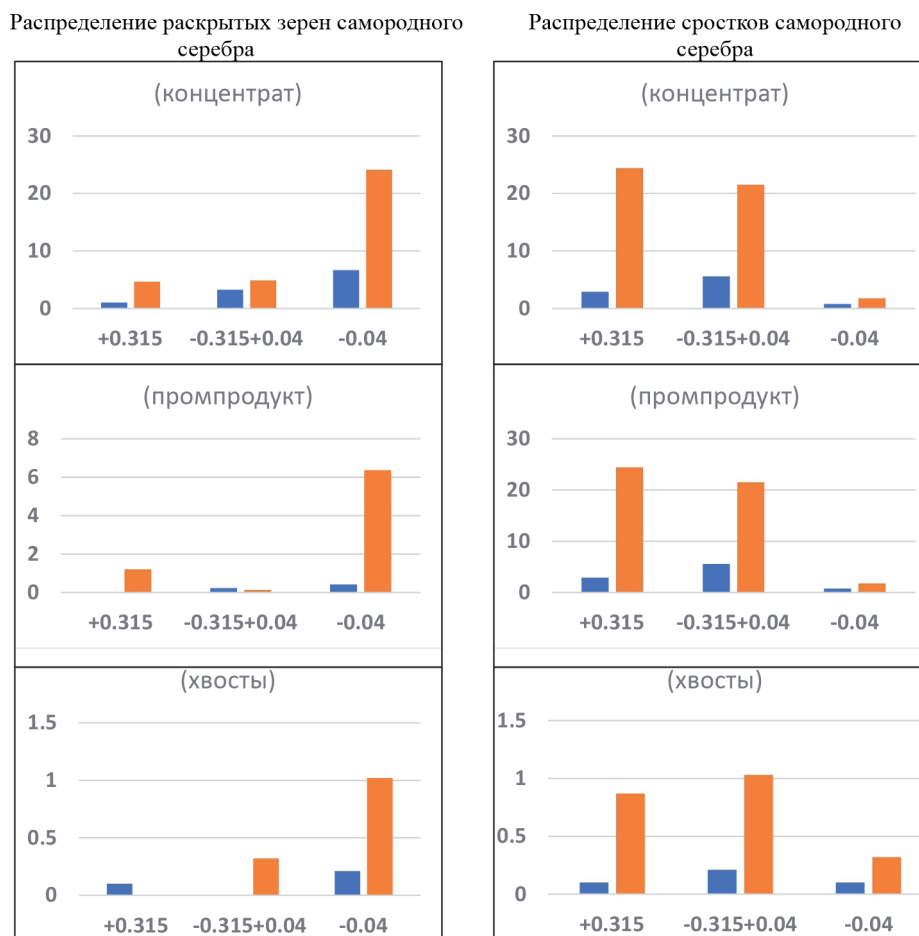


Рис. 5. Распределение раскрытых зерен и сростков самородного серебра (%) в различных классах продуктов гравитационного обогащения руд проявлений Хачакчан (оранжевый) и Ночное (синий).

Fig. 5. Distribution of liberated grains and intergrowths of native silver (%) in various classes of gravity ore enrichment products of Khachakchan (orange) and Nochnoe (blue) sites.

Количество сростков серебра уменьшается от более крупного класса к тонкому, но в тонких классах они все же присутствуют.

Для обеих проб характерен рост числа раскрытых зерен серебросодержащих сульфидов и сульфосолей во всех продуктах, что необычно – даже в хвостах (рис. 6). Наряду с тонковкрапленным самородным серебром это потенциально будет приводить к потере серебра в процессе обогащения.

Тонкие классы хвостов обеих рудопроявлений характеризуются присутствием раскрытых серебросодержащих минералов и почти полным отсутствием их сростков. В пробе X-2022 число раскрытых зерен серебросодержащих минералов в хвостах в несколько раз превышает число раскрытых зерен серебра.

Промежуточные выводы

Полученные данные позволяют сделать некоторые промежуточные выводы и обобщения. Несмотря на наличие типичных для серебряных месторождений сидерита, кварца и сульфосолей серебра в качестве жильных минералов, руды проявлений Ночное и Хачакчан характеризуются присутствием минералов группы амальгамы серебра в качестве основных носителей полезного компонента. Это отличает их от известных на территории России сереброрудных месторождений и, по всей видимости, свидетельствует о нетипичных условиях минералообразования. В то же время минеральный состав проявлений существенно отличается в части количественного соотношения фаз, что оказывает влияние на процесс гравитационного обогащения. Так, руды проявления Хачакчан содержат большое количество сульфосолей серебра, в то время как руды Ночного обогащены

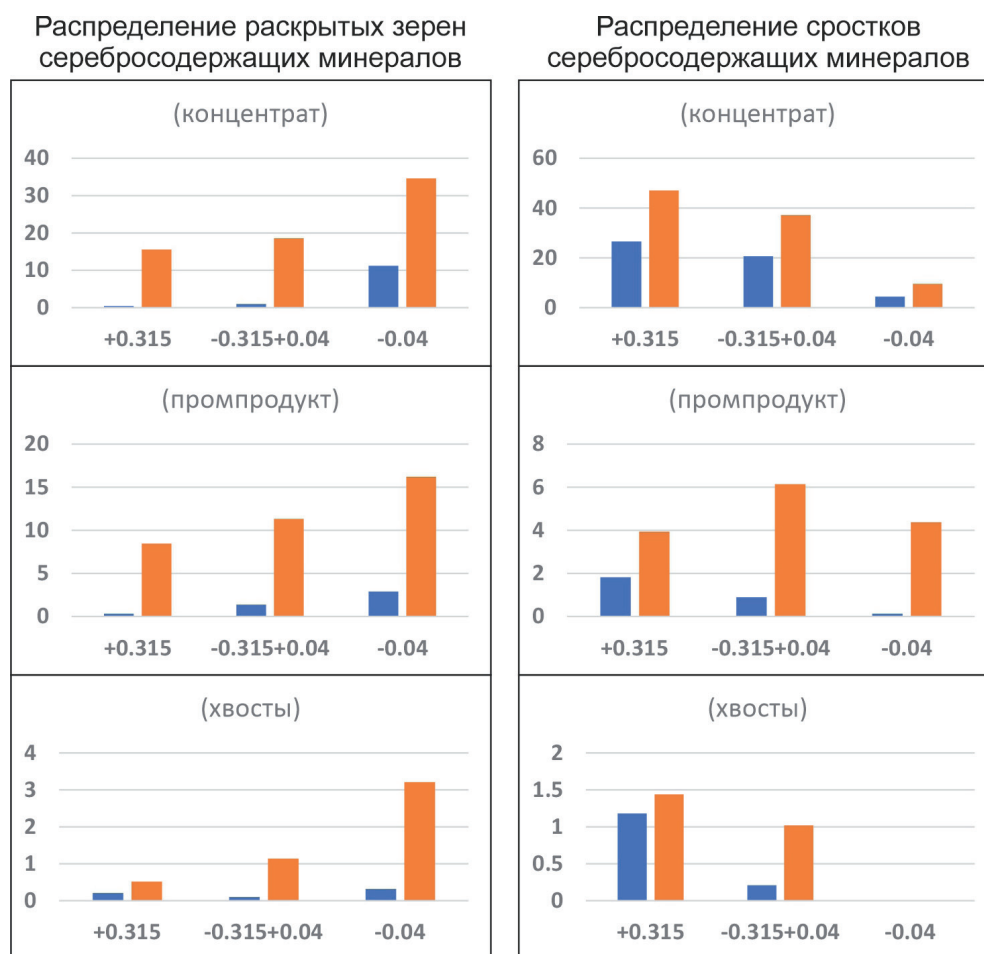


Рис. 6. Распределение раскрытых зерен и сростков серебросодержащих минералов (%) в различных классах продуктов гравитационного обогащения руд проявлений Хачакчан (оранжевый) и Ночное (синий).

Fig. 6. Distribution of liberated grains and intergrowths of silver-bearing minerals (%) in various classes of gravity ore enrichment products of Khachakchan (orange) and Nochnoe (blue) sites.

галенимом и сидеритом. Вследствие этого концентрат пробы Н-2022 содержит до 50 % сидерита и требует доочистки.

Обилие недробимого самородного серебра требует его отсitolку и учет на стадии обработки проб для корректного анализа содержаний полезных компонентов в пробах. При этом в классе -1+0.315 мм отмечено присутствие существенного числа нераскрытых сростков серебра, таким образом, дробления проб до фракции -1 мм недостаточно для проведения гравитационного обогащения. Кроме того, из-за присутствия тонковкрапленного серебра, в процессе обогащения значительная его часть уходит в хвосты, что должно учитываться при создании технологической схемы переработки.

Работа выполнена при поддержке НИР: №122022400093-9 и ООО «ГК «Сырьевые активы»

Литература

1. Амузинский В.А., Жданов Ю.Я., Заякина Н.В., Лескова Н.В. Ленаит – AgFeS_2 – новый минеральный вид // Записки всероссийского минералогического общества. 1995. Т. 124. № 5. С. 85–92.
2. Костин А.В., Окунев А.Е., Денисов Г.В., Осипов Л.В. Особенности серебряной минерализации Нижнеимканского и Аллара-Сахского рудных узлов (Восточная Якутия) // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 3–11.
3. Bindi L., Spry P.G., Pratesi G. Lenaite from the Gies gold–silver telluride deposit, Judith Mountains, Montana, U.S.A.: occurrence, composition, and crystal structure. The Canadian Mineralogist. 2006. Т. 44. Р. 207–212.
4. Števkó M., Mikuš T., Sejkora J., Plášil J., Makovický E., Vlasáč J., Kasatkin A. Argentopolybasite, $\text{Ag}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$, a new member of the polybasite group // Mineralogical Magazine. 2023. In print. DOI: 1-42. 10.1180/mgm.2022.141.