Оригинальная статья / Research article

https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-3
УДК 553.435(470.5)

Галлоплюмбогуммит в рудах Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения, Северный Урал

Н. П. Сафина[1]*, В. А. Котляров[1], М. А. Рассомахин[1], В. Н. Бочаров[2], Н. С. Власенко[2]
[1] Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 45317 Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, 199034 Россия
**e-mail: natali.safina2015@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 00.00.2026 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. Галлоплюмбогуммит – минерал группы плюмбогуммита надгруппы алунита с усредненной эмпирической формулой $(Pb_{1.03}Ca_{0.05})_{1.08}(Ga_{1.62}Al_{1.49}Fe_{0.10})_{3.21}[(P_{1.75}S_{0.23})_{1.98}O_{7.94}](OH)_{6.06}$ – установлен впервые в рудах Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения (Северный Урал). Ранее этот минерал был известен только в зоне окисления полиметаллического месторождения Цумеб (Намибия). На Ново-Шемурском месторождении минерал выявлен в цементе сульфидных брекчий в виде зональных агрегатов размером до 40 мкм в ассоциации с кварцем и сульфидами (пиритом, халькопиритом, сфалеритом, гринокитом (?), минералами ряда теннантит-тетраэдрит и арсенопиритом), а также другими галлийсодержащими минералами (касситеритом, гематитом, хлоритом и мусковитом). По результатам СЭМ-ЭДС и микрозондовых анализов содержание Ga_2O_3 в галлоплюмбогуммите составляет 17–32 мас. %, что соответствует 1.16–2.38 атома Ga в октаэдрической позиции на формулу минерала. На основании отношения Ga/(Al+Ga) составы минерала разделены на Ga-доминантные (Ga в позиции >0.5) и Al-доминантные (Al/(Al+Ga) >0.5). Широкий диапазон этого отношения подтверждает существование непрерывного изоморфного ряда от обогащенного Ga плюмбогуммита до галлоплюмбогуммита. Спектр КР галлоплюмбогуммита соответствует эталонному спектру такового из месторождения Цумеб. Предполагается, что источником Ga служили обломки первичных сульфидных руд. Химический состав и минеральные ассоциации отличаются от галлоплюмбогуммита из месторождения Цумеб и указывают на возможность его формирования не только в классических гипергенных зонах окисления.

Ключевые слова: галлоплюмбогуммит, галлий, колчеданные руды, Ново-Шемурское месторождение, Северный Урал.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетных тем № 122031600292-6 (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия) и № 124032000029-9 (Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия).

Благодарности. Авторы благодарят Е.В. Белогуб, И.А. Блинова и У.А. Ятимова за помощь в проведение анализов и обсуждение результатов исследований и редакторов журнала за улучшение стиля статьи.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Н.П. Сафина – разработка концепции, исследование, визуализация, написание рукописи; В.А. Котляров – исследование, аналитические работы (рентгеноспектральный микроанализатор), М.А. Рассомахин – исследование, аналитические работы (сканирующий электронный микроскоп). В.Н. Бочаров – исследование, аналитические работы (спектры КР), Н.С. Власенко – исследование, аналитические работы (сканирующий электронный микроскоп, ЭДС карты). Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования. Сафина Н. П., Котляров В. А., Рассомахин М. А., Бочаров В. Н., Власенко Н. С. Галлоплюмбогуммит в рудах Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения, Северный Урал . *Минералогия*, 2026, 12(4), 40–57. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-3

not reviewed

Galloplumbogummite from ores of the Novy Shemur massive sulfide deposit, North Urals

N. P. Safina[1]*, V. A. Kotlyarov[1], M. A. Rassomakhin[1], V. N. Bocharov[2], N. S. Vlasenko[2]
[1] South Ural Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 45317 Russia
[2] St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia
**e-mail: natali.safina2015@yandex.ru*

Received 00.00.2026, revised 00.00.2026, accepted 00.00.2026

Abstract. Galloplumbogummite with an average empirical formula $(Pb_{1.03}Ca_{0.05})_{1.08}(Ga_{1.62}Al_{1.49}Fe_{0.10})_{3.21}[(P_{1.75}S_{0.23})_{1.98}O_{7.94}](OH)_{6.06}$, a mineral of the plumbogummite group of the alunite supergroup, is identified for the first time at the Novy Shemur massive sulfide deposit (North Urals). Previously, the mineral was known from the oxidation zone of the Tsumeb polymetallic deposit (Namibia) only. At the Novy Shemur deposit, the mineral occurs as aggregates of zoned crystals up to 40 μm in size, which are associated with quartz and sulfides (pyrite, chalcopyrite, sphalerite, greenockite (?), minerals of the tennantite-tetrahedrite series and arsenopyrite), as well as other Gabearing minerals (cassiterite, hematite, muscovite and mica) in matrix of sulfide breccias. According to SEM-EDS and electron microprobe analyses, the Ga_2O_3 content of galloplumbogummite is 17–32 wt. % corresponding to 1.16–2.38 atoms per formula units of Ga in the octahedral site. Based on the Ga/(Al + Ga) ratio, the composition of galloplumbogummite is subdivided into Gadominant (Ga amount of >0.5 in the site) and Aldominant (Al/(Al + Ga) of >0.5) types. A broad range of this ratio supports an isomorphic series between the Gaenriched plumbogummite to galloplumbogummite. The Raman spectrum of galloplumbogummite matches the reference spectrum of this mineral from the Tsumeb deposit. It is suggested that Ga was sourced from sulfide clasts. The chemical composition and mineral assemblages of the Novy Shemur galloplumbogummite differ from those of the Tsumeb galloplumbogummite indicating its possible formation not only in supergene oxidation zones.

Keywords: galloplumbogummite, gallium, massive sulfide ores, Novy Shemur deposit, North Urals.

Funding. This work was supported by state contract no. 122031600292-6 (South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia) and no. 124032000029-9 (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia).

Acknowledgments. We thank E.V. Belogub, I.A. Blinov and U.A. Yatimov for their help with analytical works and discussion of results and editors for style editing.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest related to the manuscript.

Author contributions. N.P. Safina – conceptualization, investigation, visualization, writing of the manuscript; V.A. Kotlyarov – investigation, analytical work (electron microprobe analyses); M.A. Rassomakhin – investigation, analytical work (scanning electron microscope analyses); V.N. Bocharov – investigation, analytical work (Raman spectra), N.S. Vlasenko – investigation, analytical work (scanning electron microscope analyses, EDS maps). All authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Safina N. P., Kotlyarov V. A., Rassomakhin M. A., Bocharov V. N., Vlasenko N. S. Galloplumbogummite from ores of the Novy Shemur massive sulfide deposit, North Urals. *Mineralogy*, 2026, 12(4), 40–57. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-3

not corrected

ВВЕДЕНИЕ

Галлоплюмбогуммит $(Pb(Ga,Al,Ge)_3(PO_4)_2(OH)_6)$ – редкий фосфат группы плюмбогуммита надгруппы алунита, утвержденный Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной Минералогической Ассоциации в 2010 г. До настоящего времени он был известен только на стратиформном полиметаллическом месторождении Цумеб (Намибия) – уникальном объекте, отличающемся разнообразием галлийсодержащих минералов, включая собственные минералы Ga (Geier, Ottemann, 1970; Jambor et al., 1996; Schlüter et al., 2003; Mills et al., 2009; Schlüter et al., 2014; Спиридонов и др., 2023; Kampf et al., 2024). Галлоплюмбогуммит на месторождении Цумеб был найден в частично окисленных рудах, залегающих в терригенно-карбонатной толще (Mills et al., 2009; Schlüter et al., 2014). Минерал образует сферолиты, ромбоэдрические кристаллы и их агрегаты размером до 0.15 мм в пустотах медной руды с халькозином, галлобедантитом, сфалеритом, обогащенным Cd, галенитом и пиритом.

В целом Pb-содержащие минералы надгруппы алунита – типичные представители субаэральных зон окисления полиметаллических, колчеданно-полиметаллических и колчеданных месторождений мира (Яхонтова, Грудев, 1987; Jambor et al., 1996; Mills et al., 2009; Белогуб, 2009; Pirajno et al., 2010; Koski, 2012; Пеков и др., 2012; Schlüter et al., 2014; Блинов, 2015). Однако плюмбогуммин и гинсдалит найдены и в продуктах субмаринного окисления – гематитсодержащих тонкослоистых рудах медноколчеданного месторождения Яман-Касы на Южном Урале (Сафина и др., 2023). Минералы этой надгруппы отличаются большой изоморфной емкостью в катионной и анионной позициях и могут концентрировать в своем составе различные элементы, включая Ga^{3+} (Иванов, 1996; Jambor, 1999; Bayliss et al., 2010).

Обзор литературы показывает, что вхождение Ga в минералы надгруппы алунита исследовано слабо, хотя примесь Ga в алуните и ярозите известна. Высокие содержания Ga в бедантите привели к выделению самостоятельного минерального вида – галлобедантита, который на месторождении Цумеб содержит 19.3 мас. % Ga_2O_3 (Jambor et al., 1996). Содержание Ga в алуните составляет 5–30 г/т, а в отдельных месторождениях, например, на эпитермальном Au–Ag–Cu месторождении Маунт-Карлтон в Австралии или Загликском месторождении алунита в Азербайджане составляет 339 и 500 г/т, соответственно (Иванов, 1996; Sahlström et al., 2017; Тагиева, 2020). Ярозит из окисленных руд колчеданно-полиметаллического месторождения Апекс (штат Юта, США) содержит 7000 г/т Ga (Dutrizac et al., 1986)

Нами галлоплюмбогуммит обнаружен не в зоне окисления, а в первичных рудах (халькопирит-сфалерит-пиритовых брекчиях) Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения на Северном Урале. В этих же рудах ранее установлены повышенные концентрации Ga (40–126 г/т) и Ga-содержащие силикаты (Сафина и др., 2018). Цель настоящей работы – характеристика галлоплюмбогуммита и ассоциирующих с ним минералов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью установления форм нахождения Ga в колчеданных рудах в связи с отнесением этого металла к критическим и его использованием в широком спектре высокотехнологичных производств от микроэлектроники до солнечной энергетики (Бортников и др., 2022; Викентьев, 2023).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы сульфидных руд для исследований отобраны в 2018 г. в карьере Ново-Шемурского месторождения на горизонте –375 м от поверхности. Из образцов изготовлены полированные аншлифы для оптических исследований. Минеральный состав руд определен на микроскопе Olympus BX 51 с цифровой приставкой для микрофотографирования.

Морфология и химический состав минералов изучены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 SBU с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments Xact и рентгеноспектральном микроанализаторе (РСМА) JEOL733 с волновыми спектрометрами (спектральное разрешение на линии Mn – 114 эВ) (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия). Условия съемки на СЭМ Tescan Vega 3 SBU: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 6 нА, время набора спектра 120 с, диаметр пучка 1–3 мкм, оценочный размер области возбуждения ~5 мкм. Условия съемки на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL-733: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 12 нА, время набора спектра 10 с, диаметр пучка 1–3 мкм, оценочный размер области возбуждения ~10 мкм. Для количественного анализа галлоплюмбогуммита использованы следующие стандарты: PbMα – PbS/$PbCrO_4$, GaKα – GaAs/GaP, CaKα – апатит/анортит, MgKα – MgO, MnKα – манганит, VKα – туранит, FeKα – гранат/Fe_2O_3, AlKα – гранат/жадеит, PKα – апатит, SKα – барит, SiKα – гранат/жадеит, ZnKα – ZnO. Для рудных минералов: FeKα – пирит/халькопирит, CuKα – халькопирит, SKα – $AgSbS_2$/халькопирит, ZnKα – сфалерит, PbMα – галенит, AgLα – $AgSbS_2$/Ag, SbLα – $AgSbS_2$/антимонит, AsKα – арсенопирит/скуттерудит, CdLα – гринокит, SnLα – касситерит.

Карты распределения элементов в галлоплюмбогуммите получены на СЭМ HITACHI S3400N, оснащенном ЭДС Oxford Instruments XMax 20 и кремниевым полупроводниковым детектором, при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 1.5 нА, рабочем расстоянии 10 мм, размере пучка 1–5 мкм и времени набора сигнала 20 с (Ресурсный центр (РЦ) «Геомодель», Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия). Результаты обработаны в программах Hitachi S3400N SEM, версия 7.3, и AZtek 2.2 SP1. Карты построены с разрешением 2048 пикселей.

Not corrected

Таблица 1. Химический состав галлоплюмбогуммита (3–5, 7) и Ga-содержащего плюмбогуммита (1, 2, 6, 8–10) Ново-Шемурского месторождения (по данным СЭМ-ЭДС), мас. %
Table 1. Chemical composition of galloplumbogummite (3–5, 7) and Ga-bearing plumbogummite (1, 2, 6, 8–10) from the Novy Shemur deposit (SEM-EDS), wt. %

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PbO	32.52	31.94	32.74	36.65	31.83	34.37	32.78	33.17	36.33	33.70
CaO	0.43	0.52	0.49	0.60	0.40	0.23	0.17	0.49	0.45	0.47
Ga_2O_3	20.34	21.72	26.37	22.08	26.47	19.55	32.26	18.85	18.92	18.27
Al_2O_3	13.11	12.99	8.40	11.02	8.98	12.94	4.43	13.87	13.00	14.23
Fe_2O_3	1.57	1.35	0.95	0.65	0.78	1.04	1.12	1.44	1.22	1.22
P_2O_5	19.52	19.85	18.53	17.40	17.85	17.61	14.00	19.79	18.23	20.43
SO_3	1.78	1.11	2.52	2.18	3.52	4.10	6.50	1.95	1.86	1.19
$H_2O_{расч.}$	9.98	10.06	9.47	9.24	9.64	9.77	9.13	10.02	9.49	9.99
Сумма	99.24	99.54	99.47	99.81	99.47	99.62	100.39	99.58	99.51	99.52
Коэффициенты формул, рассчитанные на сумму катионов (Al+Ga+Fe)+(P+S) = 5										
Pb	0.92	0.90	0.98	1.12	0.93	0.99	1.01	0.94	1.08	0.95
Ca	0.05	0.06	0.06	0.07	0.05	0.03	0.02	0.05	0.05	0.05
$\sum A$	0.97	0.96	1.04	1.19	0.98	1.02	1.03	0.99	1.14	1.01
Ga	1.37	1.45	1.87	1.61	1.85	1.35	2.38	1.27	1.34	1.23
Al	1.63	1.60	1.10	1.48	1.15	1.64	0.60	1.71	1.70	1.76
Fe^{3+}	0.12	0.11	0.08	0.06	0.06	0.08	0.10	0.11	0.10	0.10
$\sum B$	3.12	3.16	3.05	3.14	3.07	3.07	3.08	3.09	3.14	3.09
P	1.74	1.75	1.74	1.67	1.65	1.60	1.36	1.75	1.71	1.82
S	0.14	0.09	0.21	0.19	0.29	0.33	0.56	0.15	0.15	0.09
$\sum T$	1.88	1.84	1.95	1.86	1.93	1.93	1.92	1.91	1.86	1.91
Ga/Ga+Al	0.45	0.47	0.62	0.52	0.61	0.45	0.80	0.42	0.44	0.41

Примечание. Здесь и в таблице 2, содержание H_2O приведено по стехиометрии, сумма – с учетом содержания H_2O. Анализы относятся к агрегату, показанному на рис. 3а-в.

Note. Here and in Table 2, the H_2O content is given according to stoichiometry; the total includes H_2O content. The analyses belong to an aggregate shown in Fig. 3а-в.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) получены на спектрометре Horiba JobinYvon LabRam HR800, оснащенном оптическим микроскопом Olympus BX41 и твердотельным лазером с длиной волны 532 нм (РЦ «Геомодель»). Номинальная мощность лазера составляла 100 мВт; при регистрации спектра использовали нейтральный светофильтр, снижавший мощность до 3 мВт. Спектры регистрировались в диапазоне от 70 до 4000 $см^{-1}$ при спектральном разрешении 2 $см^{-1}$.

Сопоставление результатов определения химического состава, полученных разными методами, демонстрирует удовлетворительную сходимость данных (табл. 1, 2). Вариации суммарного содержания оксидов (в том числе в случаях завышения) обусловлены частичным захватом смежных фаз в зоне возбуждения (~10 мкм), матричными эффектами и особенностями нормировки эмпирических формул. При анализе тонкозональных агрегатов (размеры зон 3–5 мкм) указанные эффекты приводят к усреднению составов смежных зон и, как следствие, к вариациям содержаний элементов и нарушению баланса зарядов в отдельных рассчитанных формулах. Для минимизации влияния зональности аналитические точки выбирались на гладких и однородных участках агрегатов. Эмпирические формулы рассчитывались двумя независимыми способами (на сумму катионов, равную 5, и на сумму анионов O + OH, равную, 14) с последующей проверкой баланса зарядов. Валентность железа принята равной 3^+; содержания H_2O и OH определяли по стехиометрии с учетом баланса зарядов. В статью включены

not corrected

Таблица 2. Химический состав галлоплюмбогуммита (2) и Ga-содержащего плюмбогуммита (1, 3–6) Ново-Шемурского месторождения (по данным РСМА), мас. %
Table 2. Chemical composition of galloplumbogummite (2) and Ga-bearing plumbogummite (1, 3–6) from the Novy Shemur deposit (EMPA data), wt. %

Оксиды	1	2	3	4	5	6
PbO	29.34	27.84	24.78	28.15	28.83	32.01
CaO	0.42	0.46	0.46	0.29	0.41	0.30
Ga_2O_3	21.69	22.01	18.73	18.48	17.80	20.75
Al_2O_3	11.63	10.86	11.00	12.43	13.04	12.98
Fe_2O_3	1.65	1.61	4.19	2.04	1.31	1.05
ZnO	1.12	1.40	1.35	0.39	–	–
P_2O_5	21.81	21.87	18.90	18.65	23.22	22.42
SO_3	2.24	2.86	7.93	4.06	2.08	2.02
$H_2O_{расч.}$	10.50	10.50	10.76	9.90	10.35	10.46
Сумма	100.35	99.42	98.11	94.38	97.36	102.00
Коэффициенты формул, рассчитанные на сумму катионов (Al+Ga+Fe)+(P+S) = 5						
Pb	0.80	0.75	0.65	0.80	0.80	0.86
Ca	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03
∑A	0.84	0.80	0.70	0.83	0.84	0.89
Ga	1.39	1.41	1.17	1.26	1.16	1.33
Al	1.37	1.28	1.26	1.55	1.56	1.53
Fe^{3+}	0.12	0.12	0.31	0.16	0.10	0.08
Zn	0.08	0.13	0.12	0.03	–	–
∑*B*	2.98	2.93	2.86	3.00	2.82	2.94
P	1.85	1.85	1.56	1.67	1.99	1.90
S	0.17	0.21	0.58	0.32	0.16	0.15
∑*T*	2.02	2.07	2.14	1.99	2.15	2.05
Ga/Ga+Al	0.50	0.52	0.48	0.44	0.42	0.46

Примечание. Прочерк – не обнаружено. Анализы № 1 и 2, 3–5 и 6 соответствуют агрегатам, показанным на рис. 3а-в, 3г и 3д, соответственно.

Note. Dash – not detected. Analyses № 1 and 2, 3–5 and 6correspond to aggregates shown in Figs. 3а–в, 3г and 3д, respectively.

not corrected

анализы с удовлетворительной расчетной суммой в интервале 98.5–101.5 мас. % и разницей между суммой положительных и отрицательных зарядов, не превышающей ±0.2. Полный массив данных представлен в Электронном приложении (ЭП). Символы минералов в статье приведены по (Warr, 2021).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ново-Шемурское медноколчеданное месторождение находится в Ивдельском рудном районе на Северном Урале и относится к медно-цинково-колчеданному типу (Прокин и др., 1988). Оно приурочено к западному крылу Тагильского погружения и располагается в центральной части Шемурской тектоно-вулканической структуры, которая сложена вулканитами риолит-базальтовой формации ордовикскосилурийского возраста (Прокин и др., 1988; Контарь, 2013) (рис. 1а, б). В геологическом разрезе месторождения выделены три толщи: 1) нижняя базальтовая; 2) рудовмещающая риолит-дацитовая и 3) верхняя базальтовая с лавами, грубообломочными и мелкообломочными лавокластитами и гиалокластитами, тефроидами, яшмами и силицитами. Вмещающие породы и руды Ново-Шемур-

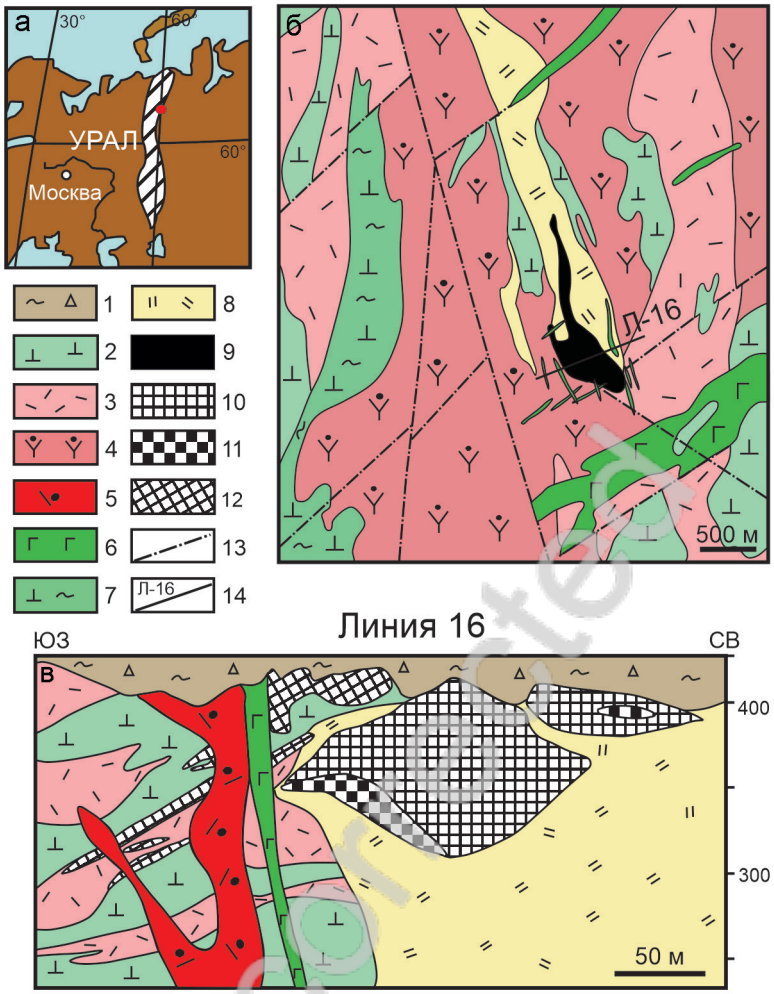

Рис. 1. Географическая позиция (а), геологическое положение Ново-Шемурского колчеданного месторождения в пределах Шемурской площади (б, по фондовым материалам Северного медно-цинкового рудника) и геологические разрез по линии 16 (в, по фондовым материалам Северного медно-цинкового рудника).

1 – рыхлые отложения; 2 – андезибазальты, базальты; 3, 4 – риолиты, андезидациты; 5 – плагиориодациты; 6 – диабазы, габбродиабазы; 7 – лавобрекчия андезибазальтов и базальтов; 8 – серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты; 9 – рудное тело (на рис. 1б); 10–12 – руды: 10 – серноколчеданные; 11 – медные; 12 – медно-цинковые; 13 – разломы; 14 –положение разведочной линии 16 на карте.

Fig. 1. Geographical location (a), geological setting of the Novy Shemur massive sulfide deposit in the Shemur area (б, after unpublished materials of the Severny copper-zinc mine) and geological cross-section along line 16 (в, after unpublished materials of the Severny copper-zinc mine).

1 – loose sediments; 2 – basaltic andesite, basalt; 3, 4 – rhyolite, dacitic andesite; 5 – plagiorhyodacite; 6 – diabase, gabbrodiabase; 7 – lava breccia of basaltic andesite and basalt; 8 – sericite-chlorite-quartz metasomatite; 9 – ore body (in Fig. 1б); 10–12 – ores: 10 – pyrite; 11 – copper; 12 – copper-zinc; 13 – faults; 14 – position of exploration line 16 on the map.

ского месторождения метаморфизованы в условиях эпидот-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Злотник-Хоткевич, 1984).

Единая рудная залежь линзовидной формы размером 1050 × 500 м протягивается в субмеридиональном направлении и падает на запад под углом 40–50°. Многочисленные пострудные дайки диабазов и плагиоклазовых риолитов разбивают рудную залежь на мелкие пластообразные тела с резким тупым выклиниванием. В «ядре» рудной залежи доминируют массивные серноколчеданные руды (рис. 1в). Верхние горизонты залежи и фланги месторождения в северном юго-западном и юго-восточном направлениях сложены богатыми медными и медно-цинковыми рудами обломочного строения, среди которых преобладают сульфидные брекчии

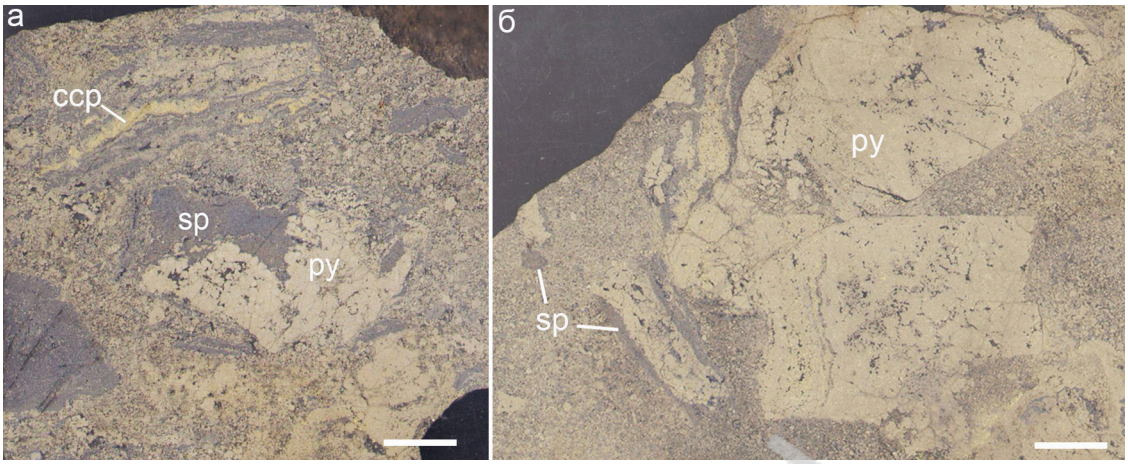

Рис. 2. Халькопирит-сфалерит-пиритовые брекчии Ново-Шемурского месторождения:
а, б – обломки пирита (py), халькопирита (ccp) и сфалерита (sp) в цементирующей массе того же состава.
Длина линейки – 1 см.

Fig. 2. Chalcopyrite-sphalerite-pyrite breccias of the Novy Shemur deposit: а, б – pyrite (py), chalcopyrite (ccp) and sphalerite (sp) clasts in matrix of the same composition.
Scale bar – 1 cm.

и полосчатые руды. Брекчии характеризуются разнообразным составом обломков, среди которых установлены фрагменты труб черных курильщиков и оруденелой фауны (Ayupova et al., 2017; Сафина и др., 2018). Наиболее распространенными разновидностями являются сульфидные брекчии, сложенные обломками существенно пиритовых и сфалеритовых агрегатов в халькопирит-сфалерит-пиритовом цементе. Полосчатые руды представляют собой ритмичное чередование сфалеритовых и пиритовых слоев.

Главные рудные минералы – пирит, халькопирит, сфалерит и магнетит; второстепенные – марказит, Ag- и Se-содержащий галенит, теннантит-(Fe), тетраэдрит-(Zn), арсенопирит, гематит, борнит, ковеллин и халькозин; редкие – самородное золото, ютенбогардтит, арсенопирит, кобальтин, Ta- и Ga-содержащий касситерит, сульфид Cd (гринокит ?), энаргит, пирротин и макинавит (Прокин и др., 1988; Сафина и др., 2018; настоящая работа). Нерудные минералы представлены хлоритом, кварцем, серицитом, мусковитом, реже эпидотом, альбитом и кальцитом. Хлорит, мусковит и эпидот в этом типе руд обогащены Ga от 1.24 до 4.88 мас. % Ga_2O_3 (Сафина и др., 2018).

Эксплуатационные запасы руд составляют 21 528 тыс. т (350 тыс. т Cu, 468 тыс. т Zn) при следующих содержаниях: 1.86 % Cu, 2.66 % Zn, 0.33 г/т Au 10.3 г/т Ag (Санкович и др., 1986ф). В медно-цинковых рудах содержания Ga составляют 30 г/т. В настоящее время месторождение отрабатывает открытым способом АО «Святогор» (г. Красноуральск, Свердловская область). В 2018 г. глубина карьера достигала 50 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минеральный состав руд с галлоплюмбогуммитом

Галлоплюмбогуммит обнаружен в сульфидных брекчиях, сложенных пиритовыми и халькопирит-пиритовыми, халькопирит-сфалеритовыми и сфалеритовыми обломками размером до 5 см, редко до 10 см (рис. 2). Обломки отличаются формой и текстурами. Преобладают обломки пирита с массивным и колломорфным строением. Угловатые и удлиненные обломки сфалерита массивные и ритмичнозональные с чередованием полос халькопирита, пирита и сфалерита. Обломки в брекчиях сцементированы тонко и мелкозернистым сульфидным материалом, в котором помимо мелких обломков, присутствуют аутигенные сфалерит, халькопирит, пирит и кварц.

Аутигенный сфалерит в цементе образует гипидиоморфные кристаллы с двойниковой структурой. В сфалерите установлены включения халькопирита, галенита, блеклой руды, сульфида Cd (гринокита ?), гематита, касситерита и силикатов. Также в ассоциации со сфалеритом отмечены ковеллин и халькозин. По данным РСМА, содержание Fe в сфалерите варьирует от 0.84 до 6.73 мас. %. Пирит

not corrected

образует идиоморфные и гипидиоморфные кристаллы с прожилками и включениями сфалерита, халькопирита, блеклой руды, галенита, арсенопирита и касситерита. Халькопирит присутствует в меньшем количестве по сравнению со сфалеритом и пиритом. Он образует прожилки и включения в пирите, угловатые или изометричные включения размером первые десятки микрометров в сфалерите. Для халькопирита характерна ассоциация с касситеритом.

Галенит встречается в виде включений размером до 200 мкм в других сульфидах. Серебросодержащий тетраэдрит-(Fe) образует скопления угловатых зерен размером 10–15 мкм в сфалерите в ассоциации с арсенопиритом и халькопиритом. По данным РСМА, его состав характеризуется высоким содержанием Ag (14–17 мас. %) и преобладанием Fe (5.3 и 8.0 мас. %) над Zn (4.0 и 6.4 мас. %).

Сульфид Cd (гринокит ?) встречается вместе со сфалеритом. Он образует кристаллы вытянутой формы, иногда изогнутые, а также развивается по границам двойниковых индивидов сфалерита. Длина кристаллов достигает 10–12 мкм, ширина – 2 мкм. По данным РСМА, минерал содержит Zn (6.49 мас. %) и Fe (0.82 мас. %). Формула минерала: $(Cd_{0.79}Zn_{0.13}Fe_{0.02})_{0.94}S_{1.00}$ (рассчитана на S = 1).

Арсенопирит в виде ксеноморфных зерен размером 20 мкм срастается с блеклой рудой и халькопиритом в сфалерите. Халькозин и ковеллин образуют тесные срастания между собой и формируют каймы вокруг зерен сфалерита.

Касситерит срастается с халькопиритом и образует в пирите многочисленные угловатые и изометричные зерна размером от первых до 50 мкм. Гораздо реже касситерит встречается в кварце в виде ксеноморфных зерен размером до 30–35 мкм. По данным РСМА, касситерит содержит Fe_2O_3 1.36–2.85 мас. %. Касситерит в кварце также содержит 0.33–0.36 мас. % Ga_2O_3. Средняя формула минерала: $(Sn_{0.95}Fe_{0.05}Ga_{0.01})_{1.01}O_{2.00}$ (рассчитана на два атома кислорода).

Гематит обнаружен в сфалерите в виде единичных включений удлиненной формы длиной до 20 мкм. По данным РСМА, в составе гематита присутствует Ga_2O_3 (4.38–4.45 мас. %) и MgO (0.17 мас. %). Формула минерала: $Fe_{1.92\text{-}1.93}Ga_{0.07\text{-}0.08}Mg_{0.00\text{-}0.01}O_3$ (рассчитана на три атома кислорода).

Галлийсодержащий мусковит образует включения преимущественно в сфалерите, реже – в пирите. Минерал заполняет интерстиции между зернами сульфидов и образует угловатые либо удлиненные кристаллы и агрегаты размером до 30 мкм. Кристаллы нередко слабоизогнуты и располагаются по контурам включений халькопирита или пирита в сфалерите. Содержание Ga_2O_3 в мусковите варьирует от 6.06 до 31.77 мас. %, также присутствуют MnO (0.13 мас. %) и V_2O_5 (0.25 мас. %). В ассоциации с галлийсодержащим мусковитом наблюдается кварц. Галлийсодержащий хлорит образует мелкие (до 20 мкм) рассеянные включения в сфалерите; содержание Ga_2O_3 в нем составляет 14.39–16.46 мас. %, отмечается также MnO (0.34–0.59 мас. %).

Кварц – один из главных нерудных минералов изученных руд. Он представлен, главным образом, сростками зерен размером до 100 мкм и более; в виде включений или сростков со слюдой кварц присутствует и в сульфидах. С кварцем ассоциируют галлийсодержащий касситерит и галлоплюмбогуммит.

Морфология и минеральные ассоциации галлоплюмбогуммита

Галлоплюмбогуммит в ассоциации с кварцем заполняет интерстиции между кристаллами пирита (рис. 3). Наиболее крупный агрегат минерала достигает 40 мкм в длину и 20 мкм в ширину (рис. 3а). Агрегат состоит из зональных кристаллов, в которых в большинстве случаев темное ядро окружено светлой каймой. На отдельных участках кристаллы сливаются и окружаются общей каймой с волнистыми контурами. Местами, наоборот, в центре зонального кристалла располагается светлое ядро размером 4–5 мкм, окруженное промежуточной темной и внешней светлой каймами (рис. 3г). В изогнутых агрегатах с однородным внутренним строением иногда просматриваются контуры ромбических или шестиугольных сечений размером до 10 мкм в длину и фрагменты граней с зональностью роста (рис. 3д, е). Контакты галлоплюмбогуммита с кварцем неровные, зубчатые; нередко они срезаны гранью кварца (рис. 3а, б, г). Кварц также заполняет трещины в галлоплюмбогуммите и пирите, и образует включения в пирите. Контакты галлоплюмбогуммита с пиритом преимущественно ровные, местами – компенсационные, с неровными очертаниями.

Химический состав галлоплюмбогуммита

Химический состав галлоплюмбогуммита неоднороден по содержанию Ga: содержание Ga_2O_3

Not corrected

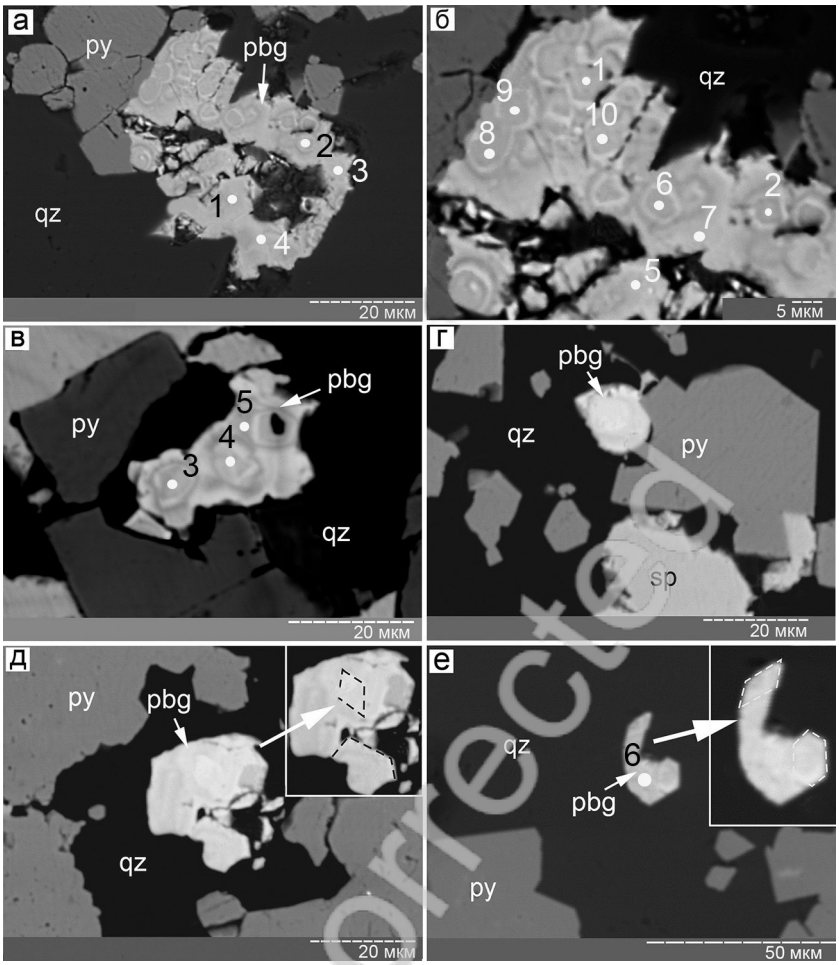

Рис. 3. Галлоплюмбогуммит в цементе сульфидных брекчий Ново-Шемурского месторождения: а-в – агрегаты галлоплюмбогуммита (pbg) в кварце (qz) в ассоциации с пиритом (py); б – деталь рис. 3а: зональные кристаллы галлоплюмбогуммита; г – зональный кристалл галлоплюмбогуммита; д, е – однородные агрегаты галлоплюмбогуммита в кварце, окруженные пиритом и сфалеритом (sp).

На врезках (рис. 3д–е) пунктиром выделены контуры кристаллов, соответствующие ромбоэдрической и гексагональной формам. Цифрами показаны точки анализов: белое – по данным СЭМ-ЭДС, табл. 1; черное – по данным РСМА, табл. 2.

Fig. 3. Galloplumbogummite in matrix of sulfide breccias of the Novy Shemur deposit: а-в – galloplumbogummite (pbg) aggregate in quartz (qz) in assemblage with pyrite (py); б – detail of Fig. 3a: zoned galloplumbogummite crystals; г – zoned galloplumbogummite crystal; д, е – homogeneous galloplumbogummite aggregates in quartz surrounded by pyrite and sphalerite (sp).

Insets (Figs. 3д, е) show the rhombohedral and hexagonal forms contoured by the dotted line. The SEM-EDS (Table 1) and EMPA (Table 2) analytical points are indicated by white and black symbols.

варьирует от 17.80 до 32.36 мас. % (1.44–2.38 к. ф.) и обратно коррелирует с содержанием Al_2O_3 (4.43–14.52 мас. %; 0.60–1.27 к. ф.), что указывает на замещение Al ↔ Ga в октаэдрической позиции B (табл. 1, 2; рис. 4а). Отношение Ga/(Ga+Al) заметно меняется от составов с преобладанием Al над Ga до преобладания Ga над Al. Максимальное отношение Ga/Ga+Al достигает 0.8 (табл. 1, 2; рис. 4б). Свинец является доминирующим катионом в позиции A: содержание PbO по данным СЭМ-ЭДС составляет 31.83–36.33 мас. % (0.92–1.08 к. ф. Pb), а по данным РСМА – 24.78–32.01 мас. % (0.65–0.86 к. ф. Pb). Содержание фосфора, входящего в состав тетраэдрических групп (PO_4) (позиция T), относительно стабильно (17.40–23.22 мас. % P_2O_5), тогда как концентрации SO_3 существенно варьируют (1.11–7.93 мас. %), что согласуется с возможностью изоморфного замещения (PO_4) ↔ (SO_4). Минерал также содержит CaO (0.17–0.52 мас. %), ZnO (до 1.40 мас. %) и Fe_2O_3 (0.65–4.19 мас. %). Вариации состава

not corrected

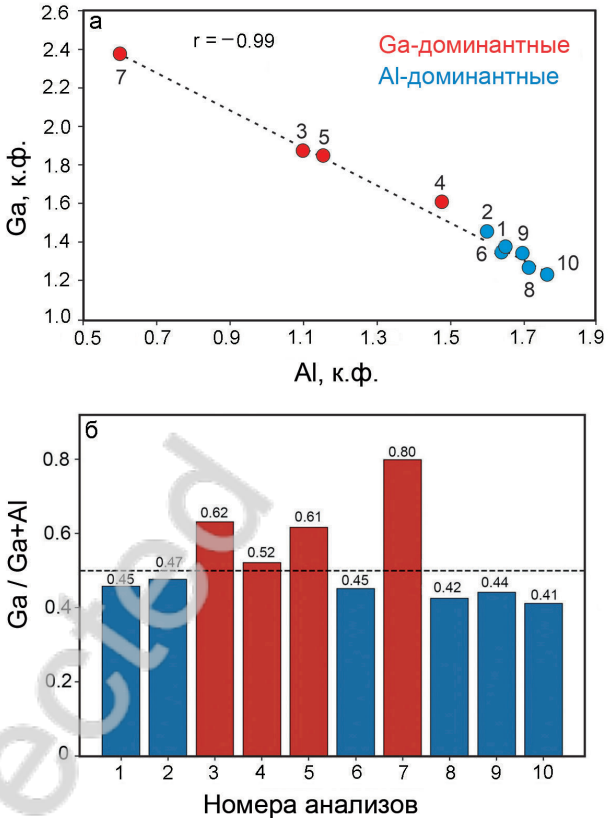

Рис. 4. Отношение Ga/Al (а) и Ga/Ga+Al (б) в октаэдрической позиции галлоплюмбогуммита по результатам СЭМ-ЭДС анализа.

Номера анализов соответствуют номерам в таблице 1.

Fig. 4. Ga/Al (a) and Ga/Ga+Al (б) ratio in octahedral site of galloplumbogummite based on SEM-EDS results.

The numbers of analyses correspond to those in Table 1.

подтверждаются картами распределения элементов в зональнах агрегатах галлоплюмбогуммита, на которых свинец распределен равномерно (рис. 5б) и наблюдается чередование зон, обогащенных алюминием и фосфором (рис. 5в, д), с зонами, обогащенными галлием и серой (рис. 5г, е).

В спектрах КР зонального агрегата проявлены решеточные колебания (83–243 см$^{-1}$), деформационные колебания фосфатных групп (490, 493 и 564–636 см$^{-1}$), валентные колебания фосфатных и гидрофосфатных групп (980–1090 см$^{-1}$) и гидроксильных групп (3241 и 3244 см$^{-1}$) (рис. 6). Помимо полос гллоплюмбогуммита в спектрах присутствуют полосы пирита (343, 379 и 430 см$^{-1}$) и кварца (128, 206, 464, 810 и 1082 см$^{-1}$) (Frezzoti et al., 2012). Сопоставление спектров со спектрами галлоплюмбогуммита Цумеба (Schlüter et al., 2014) и плюмбогуммита из Китая и Чехии (Frost et al., 2013) подтверждает диагностику минерала (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Позиция галлоплюмбогуммита в рудах. В отличие от месторождения Цумеб, где галлоплюмбогуммит является типичным минералом гипергенной зоны окисления (Mills et al., 2009; Schlüter et al., 2014), на Ново-Шемурском месторождении он обнаружен в обломочных сульфидных рудах, не затронутых приповерхностным окислением. Присутствие обломочных руд на флангах колчеданных месторождений свидетельствует о разрушении холмообразной сульфидной постройки на морском дне и формировании шлейфа обломочных отложений, претерпевших изменения в субмаринной обстановке (Maslennikov et al., 2019). На Ново-Шемурском месторождении они представлены элювиальными (неперемещенными) и коллювиальными (перемещенными) брекчиями, градационно-слоистыми сульфидными песчаниками и алевролитами, слагающими северную, западную, юго-западную и юго-восточную выклинки сульфидной залежи (Сафина и др., 2018).

Галлоплюмбогуммит установлен в коллювиальных брекчиях, где обломочный материал преобладает над аутигенными минералами тонко и мелкозернистого цемента, представленного сфалеритом, пиритом, халькопиритом и кварцем. Структурные взаимоотношения кварца с агрегатами галлоплюмбогуммита (внедрение кварца в агрегаты, заполнение им трещин и срезание зональности агрегатов) свидетельствуют о более раннем формировании алюмофосфатной фазы по отношению к кварцу. Присутствие Zn в галлоплюмбогуммите и включения галлийсодержащих силикатов в сфа-

not corrected

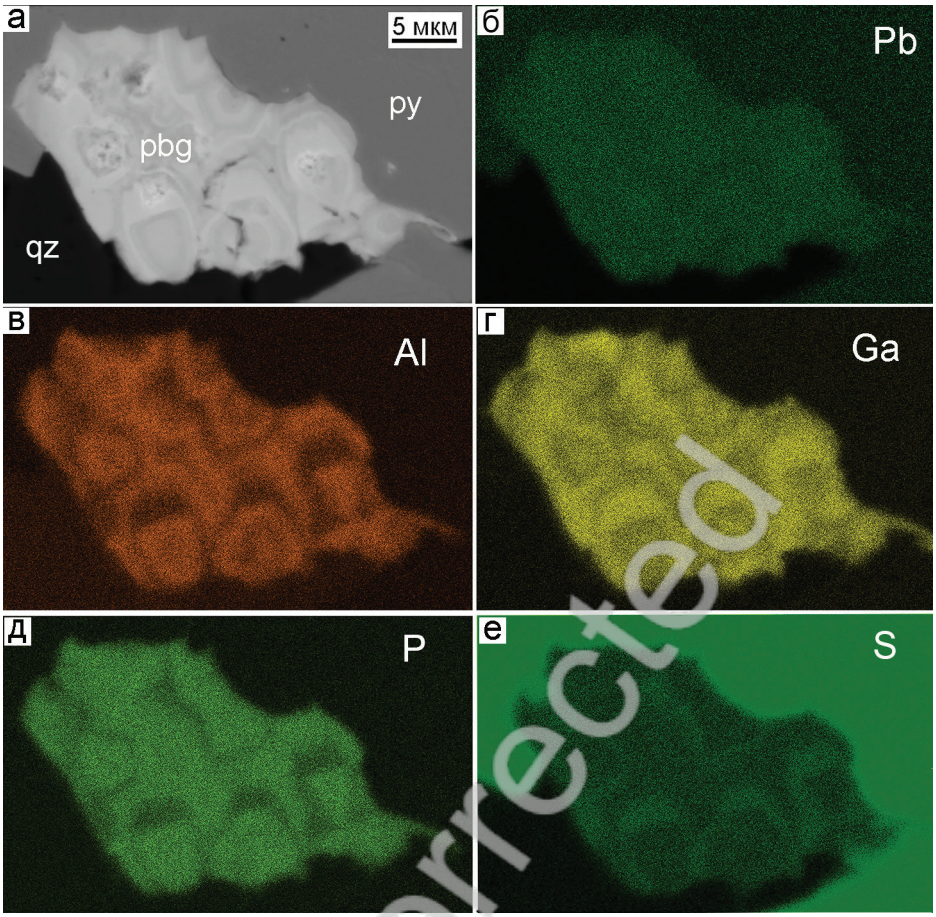

Рис. 5. ЭДС карты распределения Pb (б), Al (в), Ga (г), P (д) и S (е) в зональном агрегате галлоплюмбогуммита (pbg) между кварцем (qz) и пиритом (py).

Рис. 5а – BSE фото.

Fig. 5. EDS distribution maps for Pb (б), Al (в), Ga (г), P (д), and S (е) within the zoned plumbogummite (pbg) aggregate between pyrite (py) and quartz (qz) crystals.

Fig. 5a – BSE image.

not corrected

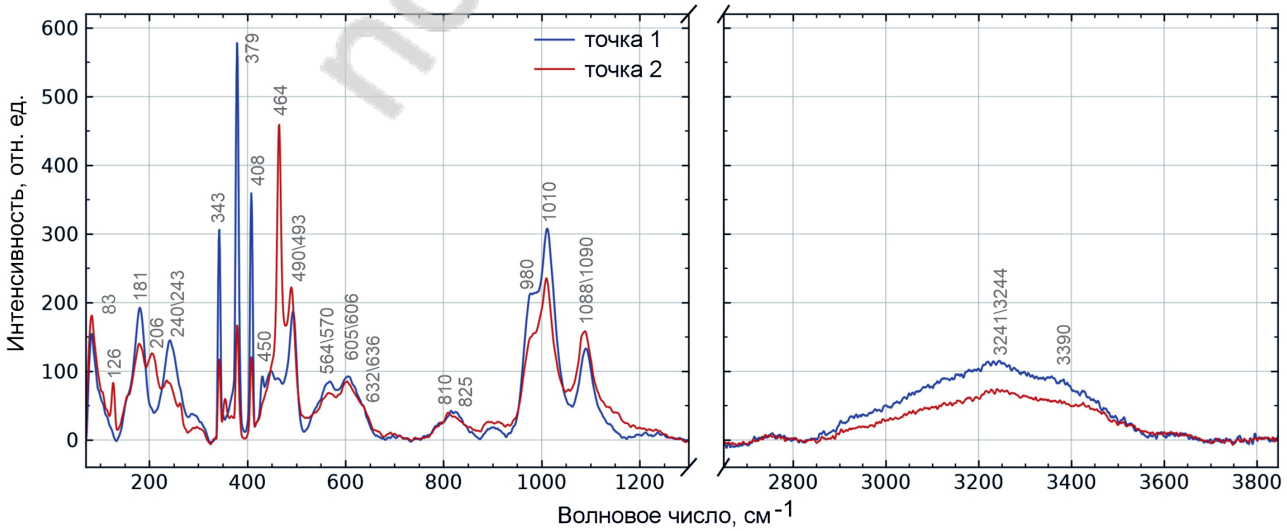

Рис. 6. КР спектры зонального агрегата галлоплюмбогуммита (рис. 5а).

Fig. 6. Raman spectra of zoned aggregate of galloplumbogummite (Fig. 5a).

Таблица 3. Сопоставление полос на спектрах КР на спектре КР галлоплюмбогуммита Ново-Шемурского месторождения (точки 1 и 2) со таковыми на спектрах КР галлоплюмбогуммита месторождения Цумеб (Schlüter et al., 2014) и плюмбогуммита Чехии и Китая (Frost et al., 2006, 2013)

Table 3. Comparison of bands of Raman spectra of galloplumbogummite from the Novy Shemur deposit (points 1 and 2) with those for galloplumbogummite from the Tsumeb deposit and plumbogummite from localities in the Czech Republic and China

Полосы, см$^{-1}$	Точка 1	Точка 2	Месторождение Цумеб	Плюмбогуммит	Отнесение
55–85	83	83	55; 85	–	Решеточные колебания с участием Pb
126	–	126	–	–	Кварц
160–310	181; 243	181; 206; 240	~150; ~200; ~300	145; 163; 187; 251; 281	Решеточные колебания Pb–O, кварц, колебание водородной связи OH···OP
340–430	343; 379; 408 (сильные); 430	343; 379; 408 (слабые)	~350	364; 367; 368; 374; 388	Валентные колебания Pb–O и Me–O (Me = Al, Ga); пирит; кварц
440–475	450	464 (сильная)	–	464	Симметричные деформационные колебания $\nu_2(PO_4)$; кварц
480–510	493	490	~490	492-507	Симметричные деформационные колебания $\nu_2(PO_4)$
560–640	570; 606; 632	564; 605; 636	~600	579; 611; 613; 634	Асимметричные деформационные колебания $\nu_4(PO_4)$
800–830	825	810; 825	–	826	Либрация H_2O; кварц
970–1050	Широкая полоса 1010 с плечом 980	Широкая полоса 1010 с плечом 980	~1000; ~1050	971; 996–1026	Симметричные валентные колебания $\nu_1(PO_4^{3-}$ и $(PO_3OH)^{2-})$
1090	1090	1088	1090	1057; 1102–1106; 1179; 1182	Асимметричные валентные колебания $\nu_3(PO_4^{3-}$ и $(PO_3OH)^{2-})$; кварц
3200–3400	3241; 3390	3244; 3390	3252; 3377	3227; 3249	Валентные колебания ν(OH)

Примечание. Интенсивности полос на спектрах КР кварца и пирита взяты из работы (Frezzotti et al., 2012). Прочерк – отсутствие данных. Интенсивности полос из спектра КР галлоплюмбогуммита месторождения Цумеб, обозначенные символом «~» и взятые авторами настоящей статьи из работы (Schlüter et al., 2014), не обсуждаются в цитированной работе.

Note. Band intensities from Raman spectra of quartz and pyrite are taken from (Frezzotti et al., 2012). Dash – no data. Band intensities from Raman spectra of galloplumbogummite, which marked by «~» and taken by the authors of this work from (Schlüter et al., 2014), are not discussed by cited authors.

лерите указывают на близкое время их кристаллизации. Таким образом, галлоплюмбогуммит, вероятно, маркирует промежуточную стадию минералообразования – между формированием аутигенных сульфидов и кварца.

Форма нахождения и источники Ga. Формы нахождения Ga на Ново-Шемурском медноколчеданном месторождении и стратиформном полиметаллическом месторождении Цумеб имеют черты сходства и отличия. На месторождении Цумеб Ga концентрируется преимущественно в фосфатах и арсенатах надгруппы алунита (галлоплюмбогуммит, галлобедантит, карлзайфертит), а также в зенгеите $Ga(OH)_3$, цумгаллите GaO(OH) и галлите $CuGaS_2$. Образование этих фаз связано с гипергенными процессами и отражает поведение Ga в окислительной обстановке при относительно низких температурах, обычно не превышающих 80–100 °C (Mills et al., 2009; Schlüter et al., 2003; Schlüter et al., 2014). Повышенные содержания Ga характерны для первичных сульфидов месторождения Цумеб: сфалерита (от первых сотен до 3120 г/т; Cook et al., 2009; Paradis, 2015), реньерита (0.1–0.3 мас. %) и германита (0.05–0.10 мас. %; Schlüter et al., 2014). В условиях субаэрального окисления первичные минералы оказываются неустойчивыми и высвобождающийся галлий (Ga) переходит в галлоплюмбогуммит и оксиды Ga, устойчивые в окислительной среде.

Для постседиментационных условий Ново-Шемурского медноколчеданного ме-

not for distribution

сторождения характерны другие концентраторы Ga. Помимо галлоплюмбогуммита, Ga концентрируется в силикатах (хлорите, мусковите и эпидоте), тогда как галлийсодержащие оксиды (касситерит, гематит) встречаются крайне редко (Сафина и др., 2018; настоящая работа). Перечисленные галлийсодержащие минералы образуют включения в аутигенном сфалерите, который также содержит примесь Ga (от 40 г/т до 0.2 мас. %) (результаты ЛА-ИСП-МС анализа, неопубликованные данные Н.П. Сафиной), содержание которого сопоставимо со сфалеритом свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах (до первых процентов), а также колчеданных месторождений (до 148 г/т) (Cook et al., 2009; Frenzel et al., 2016).

Появление на Ново-Шемурском месторождении галлоплюмбогуммита, а также галлийсодержащих хлорита и мусковита, касситерита и гематита, а также присутствие в ассоциации с основными сульфидами галенита, блеклых руд, арсенопирита и гринокита (?), вероятно, связано с растворением обломков первичных руд и осаждением аутигенных минералов в условиях постседиментационного преобразования обломочных сульфидных отложений. Такой механизм формирования аутигенной акцессорной минерализации описан для других колчеданных месторождений Урала (Maslennikov et al., 2019). Насыщение порового флюида Ga, а также Sn и другими элементами обусловило отложение новых минералов в межзерновом пространстве. По данным ЛА-ИСП-МС анализа, содержания Ga в обломках сфалерита и халькопирита в изученных рудах составляют 40 и 55 г/т, соответственно, а содержание Sn в халькопирите – 26 г/т (неопубликованные данные Н.П. Сафиной). Присутствие Ga в первичных сульфидах подтверждает их роль как основного источника поступления элементов. Предполагается, что промежуточным концентратором элемента служили глинистые минералы, цементировавшие рудные обломки на стадии захоронения и литификации осадка. В результате постседиментационных процессов формировался галлоплюмбогуммит, а также и галлийсодержащие мусковит и хлорит. Содержания Ga в морской воде очень низкие – $3 \cdot 10^{-5}$ мг/л (0.00003 г/т) (Иванов, 1996; Савенко, Савенко, 2010), поэтому она, вероятно, не могла служить значимым источником этого элемента.

В качестве источника свинца выступали галенит и различные сульфосоли, которые также неустойчивы в условиях субмаринного гипергенеза. Источником фосфора предполагаются биогенные остатки: возможность их присутствия в изученных обломочных рудах Ново-Шемурского месторождения подтверждается находками псевдоморфоз по трубчатым организмам в цементе сульфидных брекчий (Ayupova et al., 2017). Разложение органики способствовало мобилизации фосфора и его фиксации в виде новообразованных фаз.

Химический состав галлоплюмбогуммита. Сравнительный анализ галлоплюмбогуммита из Ново-Шемурского месторождения и месторождения Цумеб показал в целом близкий химический состав минерала из обоих объектов при некоторых отличиях (табл. 1 ЭП, табл. 4). Отсутствие GeO_2 в галлоплюмбогуммите Ново-Шемурского месторождения (содержание ниже предела обнаружения по данным РСМА – <0.35 мас. %) согласуется с отсутствием в его рудах собственных германийсодержащих фаз, тогда как в рудах месторождения Цумеб установлены германоколусит, германит, реньерит и другие минералы Ge (Geier, Ottemann, 1970; Schlüter et al., 2014; Спиридонов и др., 2023).

По данным РСМА, галлоплюмбогуммит Ново-Шемурского месторождения содержит варьирующие концентрации Zn (до 1.40 мас. % ZnO; табл. 2, табл. 2 ЭП), обусловленные либо присутствием субмикроскопических включений сфалерита, либо вхождением цинка в структуру минерала в виде изоморфной примеси. Сосуществование галлоплюмбогуммита и сфалерита в руде свидетельствует о близких по времени этапах минералообразования, в ходе которых цинк поступал в поровый флюид и захватывался растущим фосфатом.

Обратная корреляция между содержаниями Ga и Al ($r = -0.99$, рис. 4а; $r = -0.96$, рис. 1 ЭП) указывает на изоморфное замещение $Al^{3+} \leftrightarrow Ga^{3+}$ в октаэдрической позиции B галлоплюмбогуммита. Оно обусловлено одинаковой валентностью этих элементов и близостью ионных радиусов Ga^{3+} (0.62 Å) и Al^{3+} (0.535 Å) при координационном числе 6 (Shannon, 1976). Смещение полос деформационных колебаний минерала $\nu_2(PO_4)$ и $\nu_4(PO_4)$ в низкочастотную область на спектрах КР относительно плюмбогуммита (490, 493 и 564, 606 $см^{-1}$ против 492–507 и 579, 613 $см^{-1}$, соответственно; табл. 3, Frost et al., 2013) согласуется с этим выводом: замещение Al более крупным и тяжелым Ga приводит к удлинению связей B–O (Schlüter et al., 2014) и, как следствие, к смещению полос, коррелирующим с ионными радиусами катионов позиции B (Maubec et al., 2012).

Изоморфные замещения также проявляются в вариациях состава изученных агрегатов: со-

Not corrected

Таблица 4. Сравнение среднего химического состава галлоплюмбогуммита Ново-Шемурского месторождения (настоящая работа) и месторождения Цумеб (Schlüter et al., 2014), мас. %

Table 4. Comparison of average chemical composition of galloplumbogummite from the Novy Shemur (this work) and Tsumeb (Schlüter et al., 2014) deposits, wt. %

Месторождение	n	PbO	CaO	Ga_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	SO_3	GeO_2	H_2O	Сумма
Ново-Шемурское	10	33.60	0.42	22.13	11.07	1.11	18.04	2.71	–	9.93	100.00
Формула	$(Pb_{1.03}Ca_{0.05})_{1.08}(Ga_{1.62}Al_{1.49}Fe_{0.10})_{3.21}[(P_{1.75}S_{0.23})_{1.98}O_{7.94}](OH)_{6.06}$										
Месторождение	n	PbO	CaO	Ga_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	SO_3	GeO_2	H_2O	Сумма
Цумеб	14	34.45	0.42	19.64	10.19	0.20	20.04	1.71	5.93	7.42	100.00
Формула	$(Pb_{1.04}Ca_{0.05})_{1.09}(Ga_{1.41}Al_{1.35}Ge_{0.38}Fe_{0.02})_{3.16}[(P_{1.91}S_{0.14})_{2.05}O_{8.44}](OH)_{5.56}$										

Примечание. *Среднее содержание* минерала рассчитано по данным СЭМ-ЭДС (табл. 1 ЭП), которые характеризуются лучшей воспроизводимостью и меньшим дисбалансом зарядов по сравнению с микрозондовыми микроанализами (табл. 2, табл. 2 ЭП). *Содержание* H_2O *определено по разности между* 100 *мас*. *%* и *суммой оксидов*.

Note. The average composition was calculated from SEM-EDS data (Table 1 SM), which show better reproducibility and a lower charge imbalance than EMPA data (Table 2, Table 2 SM). The H_2O calculated by difference between 100 wt. % and oxide sum.

держания Ga и Al варьируют от Ga-доминантной фазы (галлоплюмбогуммит) через промежуточные составы с близкими содержаниями этих элементов до Al-доминантной (плюмбогуммит, обогащенный Ga), что подтверждает существование непрерывного изоморфного ряда между этими минералами. Зональность агрегатов, вероятно, отражает локальные колебания активности компонентов в слабо литифицированном осадке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Галлоплюмбогуммит – редкий минерал надгруппы алунита – установлен в цементе коллювиальных сульфидных брекчий Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения (Северный Урал) в ассоциации с кварцем, галлийсодержащими мусковитом, хлоритом, касситеритом и гематитом. Минерал соответствует Ga-доминантному члену изоморфного ряда галлоплюмбогуммит – плюмбогуммит; в позиции A доминирует Pb (PbO до 36 мас. %); в октаэдрической позиции Ga (17–32 мас. %) и Al (4–14 мас. %) замещают друг друга. Источником Ga для образования минерала, предположительно, служили обломки гидротермального сфалерита и халькопирита, источником Pb – галенит, присутствующий в обильных включениях в сульфидных обломках; фосфор, вероятно, имеет биогенную природу и поступал при разложении органического вещества.

По условиям образования и составу, в частности, по отсутствию примеси Ge, минерал отличается от галлоплюмбогуммита из зоны окисления стратиформного полиметаллического месторождения Цумеб (Намибия). Присутствие Ga в фосфатах надгруппы алунита, силикатах и оксидах сульфидных брекчий Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения свидетельствует о его способности концентрироваться не в субаэральной, а в субмаринной обстановке. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал колчеданных месторождений как концентраторов галлия.

ЛИТЕРАТУРА

Белогуб Е.В. (2009) Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала. Дисс. на соиск. степ. доктора геол.-мин. наук. Миасс, ИМин УрО РАН, 617 с.

Блинов И.А. (2015) Самородные металлы, селениды, галогениды и ассоциирующие минералы из бурых железняков Амурского и Верхне-Аршинского месторождений (Южный Урал). *Литосфера,* (1), 65–74.

Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Аристов В.В., Мурашов К.Ю. (2022) Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России. *Геология рудных месторождений,* 64(6), 617–633. https://doi.org/10.31857/S0016777022060028

Викентьев И.В. Критическое и стратегическое минеральное сырье в Российской Федерации. *Геология рудных месторождений,* 65(5), 463–475. https://doi.org/10.31857/S0016777023050106

Иванов В.В. (1996) Экологическая геохимия элементов: справочник в 6 кн. Кн. 3: Редкие рэлементы. Москва, Недра, 351 с.

Злотник-Хоткевич А.Г. (1984) Минеральные продукты палагонитизации субмаринных базальтов и их роль в образовании и локализации колчеданных руд. *Метасоматизм и рудообразование. Материалы 5й Всесоюзной конференции*. Москва, Наука, 160–172.

not corrected

Контарь Е.С. (2013) Геологопромышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург, УГГУ, 199 с.

Пеков И.В., Лыкова И.С., Чуканов Н.В., Кабалов Ю.К., Зырянова Л.А. (2012) Минералы надгруппы алунита из зоны окисления полиметаллических месторождений Рубцовского рудного района (СевероЗападный Алтай, Россия). *Записки РМО,* 141(3), 90–107.

Прокин В.А., Нечеухин В.М., Буслаев Ф.П. и др. (1988) Медноколчеданные месторождения Урала: геологическое строение. Свердловск, УрО АН СССР, 241 с.

Савенко А.В., Савенко В.С. (2010) О формах нахождения растворенного галлия (III) в морской воде. *Геохимия,* (9), 1006–1008.

Санкович П.П., Киркин Э.В., Кусков В.Н. (1986ф) НовоШемурское медноколчеданное месторождение на Северном Урале: отчет о результатах геологоразведочных работ с 1976 г. по 1986 г. с подсчетом запасов по состоянию на 01.09.1986. Ивдель, 285 с.

Сафина Н.П., Аюпова Н.Р., Целуйко А.С., Филиппова К.А. (2018) Минеральный состав рудокластитов Ново-Шемурского колчеданного месторождения, Северный Урал. *Минералогия,* 4(4), 68–81.

Сафина Н.П., Котляров В.А., Блинов И.А. (2023) Минерала надгруппы алунита в слоистых колчеданных рудах месторождения Яман-Касы, Южный Урал: морфология, ассоциации и химический состав. *Записки РМО,* 152(6), 95–110. https://doi.org/10.31857/S0869605523060047

Спиридонов Э.М., Мурашко М.Н., Япаскурт В.О., Куликова И.М., Коротаева Н.Н. (2023) Германоколусит и колусит вулканогенного колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб. *Новые данные о минералах*, 57(3), 81–90. https://doi.org/10.25993/fm.2023.57.2023.009

Тагиева Л.Т. (2020). Извлечение галлия и ванадия из алунитового остатка (красного шлама) путем сульфатизирующего обжига и вышелачивания. *Химия в интересах устойчивого развития,* (4), 432–438. https://doi.org/10.15372/KhUR2020248

Яхонтова Л.К., Грудев А.П. (1987) Минералогия окисленных руд: справочное пособие. Москва, Недра, 198 с.

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Tessalina S.G., Shilovsky O.P., Sadykov S.A., Hollis S.P., Danyushevsky L.V., Safina N.P., Statsenko E.O. (2017) Tube fossils from gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: Authigenic mineral assemblages and trace element distributions. *Ore Geology Reviews*, 85, 107–130. https://doi.org/0.1016/j.oregeorev.2016.11.007

Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E.H., Pring A. (2010) Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineralogical Magazine,* 74(5), 919–927. https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.5.919

Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., SainiEidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LAICPMS study. *Geochimica et Cosmochimical Acta,* 73, 4761–4791. https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045

Dutrizac J., Jambor J., Chen T. (1986) Host minerals for the galliumgermanium ores of the Apex Mine, Utah. *Economic Geology,* 81, 946–950. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.946

Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews,* 76, 52–78. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009

Frost R.L., Wills R.-A., Weier M.L., Martens W., Kloprogge J.Th. (2006) A Raman spectroscopic study of alunites. *Journal of Molecular Structure*, 785(1–3), 123–132. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2005.10.003

Frost R.L., Palmer S.J., Xi Y., Čejka J., Sejkora J., Plášil J. (2013) Raman spectroscopic study of the hydroxyphosphate mineral plumbogummite $PbAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6$. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 103, 431–434. https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.057

Geier B.H., Ottemann J. (1970) New primary vanadium-, germanium-, gallium-, and tin-minerals from the Pb-Zn-Cu deposit Tsumeb, South West Africa. *Mineralium Deposita,* (5), 29–40. https://doi.org/10.1007/BF00207004.

Jambor J.L. (1999) Nomenclature of the alunite supergroup. *The Canadian Mineralogist,* 37, 1323–1342. https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1298

Jambor J.L., Owens D.R., Grice J.D., Feinglos M.N. (1996) Gallobeudantite, $PbGa_3[(AsO_4)(SO_4)]_2(OH)_6$, a new mineral species from Tsumeb, Namibia, and associated new gallium analogues of the alunitejarosite family. *The Canadian Mineralogist*, 34, 1305–1315.

Kampf A.R., Désor J., Ma C. (2024) Karlseifertite, $Pb(Ga_2Ge)(AsO_4)_2(OH)_6$, a new dussertite-group mineral, from Tsumeb, Namibia. *European Journal of Mineralogy*, 36(5), 873–878. https://doi.org/10.5194/ejm-36-873-2024

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9(3), 150. https://doi.org/10.3390/min9030150.

Maubec N., Lahfid A., Lerouge C., Wille G., Michel K. (2012) Characterization of alunite supergroup minerals by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 96, 925–939. https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.094

Подготовлен

Mills S.J., Kampf A.R., Raudsepp M., Christy A. (2009) The crystal structure of Garich plumbogummite from Tsumeb, Namibia. *Mineralogical Magazine*, 73, 837–845. https://doi.org/10.1180/minmag.2009.073.5.837

Paradis S. (2015) Indium, germanium and gallium in volcanic- and sediment-hosted base-metal sulphide deposits. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, 23–29.

Pirajno F., Burlow R., Huston D.L. (2010) The Magellan Pb deposit, Western Australia; a new category within the class of supergene non-sulphide mineral systems. *Ore Geology Reviews*, 37(2), 101–113. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.01.001

Sahlström F., Arribas A., Dirks P., Corral I., Chang Z. (2017). Mineralogical distribution of germanium, gallium and indium at the Mt Carlton High-Sulfidation epithermal deposit, NE Australia, and comparison with similar deposits worldwide. *Minerals*, 7(11), 213. https://doi.org/10.3390/min7110213

Schlüter J., Klaska K.H., Adiwidjaja G., Gebhard G. (2003) Tsumgallite, GaO(OH), a new mineral from the Tsumeb Mine, Tsumeb, Namibia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, 11, 521–527. https://doi.org/10.1127/0028-3649/2003/2003-0521

Schlüter J., Malcherek T., Mihailova B. (2014) Galloplumbogummite from Tsumeb, Namibia: a new member of the alunite group with tetravalent charge balance. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte,* 191(3), 301–309. https://doi.org/10.1127/00777757/2014/0262.

Shannon R.D. (1976) Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A,* 32(5), 751–767. https://doi.org/10.1107/S0567739476001551.

Warr L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291–320. https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43

REFERENCES

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Tessalina S.G., Shilovsky O.P., Sadykov S.A., Hollis S.P., Danyushevsky L.V., Safina N.P., Statsenko E.O. (2017) Tube fossils from gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: Authigenic mineral assemblages and trace element distributions. *Ore Geology Reviews*, 85, 107–130. https://doi.org/0.1016/j.oregeorev.2016.11.007

Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E.H., Pring A. (2010) Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineralogical Magazine,* 74(5), 919–927. https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.5.919

Belogub E.V. (2009) Supergenese of sulfide deposits of the South Urals. Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Miass, IMin UrO RAN, 917 p. (in Russian)

Blinov I.A. (2015) Native metals, selenides, halides and associated minerals from iron ores of the Amur and Verkhnyaya Arsha deposits (South Urals). *Litosfera (Russian Lithosphere),* (1), 65–74. (in Russian)

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov AL., Vikent'ev I.V., Lalomov A.V., Aristov, V.V., Murashov K.Yu. (2022) Fundamental problems of development of the mineral-resource base of high-tech industry and energy of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 64(6), 617–633 (in Russian). https://doi.org/10.1134/S1075701522060022

Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., SainiEidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LAICPMS study. *Geochimica et Cosmochimical Acta,* 73, 4761–4791. https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045

Dutrizac J., Jambor J., Chen T. (1986) Host minerals for the galliumgermanium ores of the Apex Mine, Utah. *Economic Geology,* 81, 946–950. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.946

Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews,* 76, 52–78. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009

Frost R.L., Wills R.-A., Weier M.L., Martens W., Kloprogge J.Th. (2006) A Raman spectroscopic study of alunites. *Journal of Molecular Structure*, 785(1–3), 123–132. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2005.10.003

Frost R.L., Palmer S.J., Xi Y., Čejka J., Sejkora J., Plášil J. (2013) Raman spectroscopic study of the hydroxy-phosphate mineral plumbogummite $PbAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6$. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 103, 431–434. https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.057

Geier B.H., Ottemann J. (1970) New primary vanadium-, germanium-, gallium-, and tin-minerals from the Pb-Zn-Cu deposit Tsumeb, South West Africa. *Mineralium Deposita,* (5), 29–40. https://doi.org/10.1007/BF00207004.

Ivanov V.V. (1996) Environmental geochemistry of elements: handbook in six books. Book 3: Rare pelements. Moscow, Nedra, 351 p. (in Russian).

Jambor J.L. (1999) Nomenclature of the alunite supergroup. *The Canadian Mineralogist,* 37, 1323–1342. https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1298

Jambor J.L., Owens D.R., Grice J.D., Feinglos M.N. (1996) Gallobeudantite, $PbGa_3[(AsO_4)(SO_4)]_2(OH)_6$, a new mineral species from Tsumeb, Namibia, and associated new gallium analogues of the alunitejarosite family. *The Canadian Mineralogist*, 34, 1305–1315.

Kampf A.R., Désor J., Ma C. (2024) Karlseifertite, $Pb(Ga_2Ge)(AsO_4)_2(OH)_6$, a new dussertite-group mineral,

не для печати

from Tsumeb, Namibia. *European Journal of Mineralogy*, 36(5), 873–878. https://doi.org/10.5194/ejm-36-873-2024

Kontar E.S. (2013) Geological and industrial types of copper, zinc, and lead deposits in the Urals: geological setting, formation, prospects. Yekaterinburg, UGGU, 199 p. (in Russian).

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9(3), 150. https://doi.org/10.3390/min9030150.

Maubec N., Lahfid A., Lerouge C., Wille G., Michel K. (2012) Characterization of alunite supergroup minerals by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 96, 925–939. https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.094

Mills S.J., Kampf A.R., Raudsepp M., Christy A. (2009) The crystal structure of Garich plumbogummite from Tsumeb, Namibia. *Mineralogical Magazine*, 73, 837–845. https://doi.org/10.1180/minmag.2009.073.5.837

Paradis S. (2015) Indium, germanium and gallium in volcanic- and sediment-hosted base-metal sulphide deposits. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, 23–29.

Pekov I.V., Lykova I.S., Chukanov N.V., Kabalov Yu.K., Zyryanova L.A. (2012) Minerals of the alunite supergroup from the oxidation zone of polymetallic deposits of the Rubtsovsk ore district (Northwestern Altai, Russia). *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society),* 141(3), 90–107 (in Russian).

Pirajno F., Burlow R., Huston D.L. (2010) The Magellan Pb deposit, Western Australia; a new category within the class of supergene non-sulphide mineral systems. *Ore Geology Reviews*, 37(2), 101–113. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.01.001

Prokin V.A., Necheukhin V.M., Buslaev F.P. et al. (1988) Copper-sulfide deposits of the Urals: geological structure. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 241 p. (in Russian).

Safina N.P., Ayupova N.R., Tseluyko A.S., Filippova K.A. (2018) Mineral composition of ore clasts of the Novy Shemur massive sulfide deposit, North Urals. *Mineralogiya (Mineralogy),* 4(4), 68–81 (in Russian).

Safina N.P., Kotlyarov V.A., Blinov I.A. (2023) Minerals of the alunite supergroup in layered massive sulfide ores of the YamanKasy deposit, Southern Urals: morphology, associations and chemical composition. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 152(6), 95–110 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0869605523060047

Sahlström F., Arribas A., Dirks P., Corral I., Chang Z. (2017). Mineralogical distribution of germanium, gallium and indium at the Mt Carlton High-Sulfidation epithermal deposit, NE Australia, and comparison with similar deposits worldwide. *Minerals*, 7(11), 213. https://doi.org/10.3390/min7110213

Sankovich P.P., Kirkin E.V., Kuskov V.N. (1986) Novy Shemur copper-sulfide deposit in the Northern Urals: unpublished report on results of geological exploration works from 1976 to 1986 with reserve estimation as of September 1, 1986. Ivdel, 285 p. (in Russian).

Savenko A.V., Savenko V.S. (2010) About forms of dissolved gallium(III) in seawater. *Geokhimiya (Geochemistry)*, (9), 1006–1008 (in Russian). https://doi.org/10.1134/S0016702910090090.

Schlüter J., Klaska K.H., Adiwidjaja G., Gebhard G. (2003) Tsumgallite, GaO(OH), a new mineral from the Tsumeb Mine, Tsumeb, Namibia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, 11, 521–527. https://doi.org/10.1127/0028-3649/2003/2003-0521

Schlüter J., Malcherek T., Mihailova B. (2014) Galloplumbogummite from Tsumeb, Namibia: a new member of the alunite group with tetravalent charge balance. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte,* 191(3), 301–309. https://doi.org/10.1127/00777757/2014/0262.

Shannon R.D. (1976) Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A,* 32(5), 751–767. https://doi.org/10.1107/S0567739476001551.

Spiridonov E.M., Murashko M.N., Yapaskurt V.O., Kulikova I.M., Korotaeva N.N. (2023) Germanocolusite and colusite from the Tsumeb volcanogenic massive sulfide deposit: new data. *Novye dannye o mineralakh (New Data on Minerals)*, 57(3), 81–90 (in Russian). https://doi.org/10.25993/fm.2023.57.2023.009

Tagieva L.T. (2020) Extraction of gallium and vanadium from alunite residue (red mud) by sulfatizing roasting and leaching. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya (Chemistry for Sustainable Development),* 28, 432–438 (in Russian). https://doi.org/10.15372/CSD2020248

Vikentyev I.V (2023) Critical and strategic minerals in the Russian Federation. *Geology of Ore Deposits*, 65, 481–493 (in Russian). https://doi.org/10.1134/S1075701523050100

Yakhontova L.K., Grudev A.P. (1987) Mineralogy of oxidized ores: a reference guide. Moscow, Nedra, 198 p. (in Russian).

Warr L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291–320. https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43

Zlotnik-Khotkevich A.G. (1984) Mineral products of palagonitization of submarine basalts and their role in the formation and localization of massive sulfide ores. In: *Metasomatizm i rudoobrazovanie. Materialy 5-i Vsesoyuznoy konferentsii (Metasomatism and Ore Formation: Proceedings of the 5th AllUnion Conference).* Moscow, Nauka, 160–172 (in Russian).

Not for sale

Информация об авторах

Сафина Наталья Павловна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; natali.safina2015@yandex.ru

Котляров Василий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; kotlyarov@mineralogy.ru

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия, miha_rassomahin@mail.ru

Бочаров Владимир Николаевич – инженер, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; regbvn@gmail.com

Власенко Наталия Сергеевна – инженер, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; ly17@mail.ru

Information about the authors

Nataliya P. Safina – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Researcher, South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; natali.safina2015@yandex.ru

Vasily A. Kotlyarov – Cand. Sci. (Phys.-Mathem.), Leading Researcher, South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; kotlyarov@mineralogy.ru

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia, miha_rassomahin@mail.ru

Vladimir N. Bocharov – Engineer, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; regbvn@gmail.com

Natalia S. Vlasenko – Engineer, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ly17@mail.ru

not corrected