

УДК 553.45:553.44(571.55)

DOI: 10.24930/1681-9004-2026-26-2-434-448

## Особенности распределения индия в рудах полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья, Россия

Г. А. Юргенсон, Б. Н. Абрамов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а,  
e-mails: yurgga@mail.ru; b\_abramov@mail.ru

Поступила в редакцию 09.09.2025 г., принята к печати 07.11.2025 г.

**Объект изучения.** Содержание индия в главных минеральных ассоциациях руд оловополиметаллических и полиметаллических свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья. **Материалы и методы.** Образцы и пробы сульфидных руд, содержащих индий, изучены методом ICP MS, а также методами поляризационной и электронной микроскопии для определения химического состава минералов руд, в том числе содержания индия в аншлифах. **Результаты и выводы.** Установлено, что содержание индия вариабельно как в месторождениях, так и в минеральных ассоциациях. Средние содержания индия в изученных минеральных ассоциациях руд составляют, г/т: в оловополиметаллических (Шерловогорское – 244.5, Хапчерангинское – 196.4, среднее – 234.97 при  $\sigma = 238.4$ ); в свинцово-цинковых полиметаллических (Михайловское – 71.68, Акатуевское – 87.93, Воздвиженское – 149.43, Благодатское – 225.4, Нойон-Тологойское – 287.43, среднее – 186.42 при  $\sigma = 155.1$ ). Наибольшие средние содержания индия установлены в оловополиметаллических месторождениях. Среднее содержание по всем 32 пробам составило 200.12 г/т при  $\sigma = 183.75$ . Основным носителем индия является сфалерит, содержащий до 0.53 мас. % в его индивидах в оловополиметаллических месторождениях, до 2.06 – в индивидах Благодатского месторождения. Вхождение индия в структуру сфалерита имеет тенденцию к связи с особенностями содержания в нем железа и, соответственно, с соотношением цинка и железа, но максимальные содержания установлены в мало-железистом сфалерите Благодатского месторождения. Исследования подтвердили и уточнили известные данные, полученные в результате разведки полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Забайкалья.

**Ключевые слова:** оловополиметаллические месторождения, свинцово-цинковые полиметаллические месторождения, индий, сфалерит, Восточное Забайкалье, Россия

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках проекта ИПРЭК СО РАН, № госрегистрации 126020216344-7

## Distribution patterns of indium in ores from polymetallic and tin-polymetallic deposits of Eastern Transbaikalia, Russia

Georgi A. Yurgenson, Bair N. Abramov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, 16a Nedorozov st., Chita 672014, Russia,  
e-mails: yurgga@mail.ru; b\_abramov@mail.ru

Received 09.09.2025, accepted 07.11.2025

**Research subject.** The content of indium in the main mineral associations of tin-polymetallic and polymetallic lead-zinc deposits in Eastern Transbaikalia. **Materials and methods.** To determine the chemical composition of ore minerals, including indium content in polished sections, samples of sulfide ores containing indium were analyzed using ICP-MS, as well as polarization and electron microscopy. **Results and conclusions.** Indium content was found to be highly variable both among deposits and mineral assemblages, as well as within individual samples. The average indium content in the studied mineral associations of ores comprises (g/t): tin-polymetallic (Sherlovogorskoye, 244.5, and Khapcheranginskoye, 196.4, average – 234.97 with  $\sigma = 238.4$ ) and lead-zinc polymetallic in ascending order of concentrations (Mikhaylovskoye, 71.68; Akatuyevskoye, 87.93; Vozdvizhenskoye, 149.43; Blagodataskoye, 225.4; Noyon-Tologoy, 287.43, average 186.42

**Для цитирования:** Юргенсон Г.А., Абрамов Б.Н. (2026) Особенности распределения индия в рудах полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья, Россия. *Литосфера*, 26(2), 434-448. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-434-448>. EDN: LLUHBL

**For citation:** Yurgenson G.A., Abramov B.N. (2026) Distribution patterns of indium in ores from polymetallic and tin-polymetallic deposits of Eastern Transbaikalia, Russia. *Lithosphere (Russia)*, 26(2), 434-448. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-434-448>. EDN: LLUHBL

© Г.А. Юргенсон, Б.Н. Абрамов, 2026

with  $\sigma = 155.1$ ). The highest average content of indium was detected in tin-polymetallic deposits. The average content across all 32 samples was 200.12 g/t with  $\sigma = 183.75$ . The main carrier of indium was found to be sphalerite, containing up to 0.53 wt % of indium in individual samples of tin-polymetallic deposits and up to 2.06 wt % in individual samples of the Blagodatskoye deposit. The entry of indium into the structure of sphalerite tends to correlate with the characteristics of iron content, and, consequently, with the ratio of zinc to iron; however, its maximum concentrations were observed in the low-iron sphalerite of the Blagodatskoye deposit. The conducted research confirmed and clarified the existing data obtained from the exploration of polymetallic and tin-polymetallic deposits in Eastern Transbaikalia.

**Keywords:** tin-polymetallic deposits, lead-zinc polymetallic deposits, indium, sphalerite, Eastern Transbaikalia, Russia

**Funding information**

The work was carried out framework of the IPREK SB RAS project, state registration number 126020216344-7

## ВВЕДЕНИЕ

Индий входит в число стратегически важных химических элементов современной электронной, оборонной и машиностроительной промышленности. Непосредственно индий и его соединения (InN, InP, InSb, InAs) широко используются в производстве полупроводников и в основанных на них приборах и электронных системах. Он применяется в различных антикоррозийных покрытиях, чрезвычайно важных для поверхностных частей подшипников. В связи с этим актуальность изучения его источников увеличивается. Широкое использование индия в современном высокотехнологичном производстве привело к существенному повышению его цен и дефициту на мировом рынке. Производство индия в основном осуществляют из комплексных руд оловополиметаллических и полиметаллических месторождений, где индий как примесный элемент извлекается при химико-металлургическом переделе из касситеритовых, сфалеритовых и халькопиритовых минеральных концентратов (Павлова и др., 2016). Свинцово-цинковые полиметаллические и оловополиметаллические сульфидные месторождения являются главными источниками извлечения индия (Юргенсон, 2006, 2008; Гаськов и др., 2017; Иващенко, 2021). Промышленное производство индия в России изначально было ориентировано на колчеданно-полиметаллические руды, содержащие в среднем 10–25 г/т индия (Павлова и др., 2016). Среди зарубежных полиметаллических месторождений повышенные содержания индия известны в месторождении Хаммерлейн в Рудных горах в Германии, где разрабатывается жила с содержанием индия в сфалерите до 2.9% (Гаськов и др., 2014). Также повышенные содержания In (75.83 г/т) установлены на месторождении в северо-восточном Вьетнаме (Чан Туан Ань и др., 2012). Средние содержания индия в рудах полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья соответствуют требованиям экономической целесообразности возможности его извлечения. Запасы индия числятся в Воздвиженском, Михайловском, Октябрьском, Ново-Широкинском, Спасском, Центральном и Шерловогорском месторождениях (табл. 1). Среднее содержание индия в рудах Шерловогорского месторождения при подсчете запасов состав-

фидные месторождения являются главными источниками извлечения индия (Юргенсон, 2006, 2008; Гаськов и др., 2017; Иващенко, 2021). Промышленное производство индия в России изначально было ориентировано на колчеданно-полиметаллические руды, содержащие в среднем 10–25 г/т индия (Павлова и др., 2016). Среди зарубежных полиметаллических месторождений повышенные содержания индия известны в месторождении Хаммерлейн в Рудных горах в Германии, где разрабатывается жила с содержанием индия в сфалерите до 2.9% (Гаськов и др., 2014). Также повышенные содержания In (75.83 г/т) установлены на месторождении в северо-восточном Вьетнаме (Чан Туан Ань и др., 2012).

Средние содержания индия в рудах полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья соответствуют требованиям экономической целесообразности возможности его извлечения. Запасы индия числятся в Воздвиженском, Михайловском, Октябрьском, Ново-Широкинском, Спасском, Центральном и Шерловогорском месторождениях (табл. 1).

Среднее содержание индия в рудах Шерловогорского месторождения при подсчете запасов состав-

**Таблица 1.** Запасы индия в некоторых месторождениях Забайкальского края по состоянию на 1999 г. (Юргенсон, 2008)

**Table 1.** Indium reserves in some deposits of the Transbaikal Region as of 1999 (Yurgenzon, 2008)

Месторождение	Содержание In, г/т	Запасы, т	Добыто, т
Воздвиженское	12.00	24.20	Н. д.
Михайловское	30.00	3.18	Н. д.
Октябрьское	3.00	0.70	Н. д.
Ново-Широкинское	11.00	15.00	Н. д.
Спасское	8.00	41.50	Н. д.
Центральное	34.00	13.50	2.20
Шерловогорское	1.52	271.58	Н. д.

Примечание. Н. д. – нет данных.

Note. Н. д. – no data.

ляло 0.1–20.0 г/т, но среднее было принято 1.52 г/т, несмотря на то что в концентрате деревянистого олова оно составляло 0.23%, в обычных касситеритах – до 0.06%, а в сфалеритах – 0.005–0.080%. По данным “Читанедра”, запасы индия в Забайкальском крае по состоянию на 1 января 2006 г. достигли 241 т.

Н.М. Чумаченко с соавторами были сведены все данные о содержаниях индия в монофракциях сульфидов полиметаллических месторождений Забайкалья по состоянию на 1973 г. (Чумаченко и др., 1973). Они привели информацию о содержаниях индия в сфалерите (32–862 г/т), а также в галените (3.5–10.0), пирите (1.0–5.5), пирротине (3) и арсенопирите (7 г/т). Подобные обобщенные средние данные о содержаниях индия в рудных минералах свинцово-цинковых и оловополиметаллических месторождений приведены и В.В. Ивановым (1996), г/т: в свинцово-цинковых для сфалерита – 5–365, галенита – 1–5, а в оловополиметаллических для сфалерита – 670, касситерита – 23, станнина – 950, халькопирита – 250. Однако все эти сведения соответствуют содержаниям в отобранных под бинокуляр монофракциях, чистота которых всегда сомнительна. Поэтому данные о присутствии индия в пирите, пирротине, галените и арсенопирите, скорее всего, не соответствуют действительности. На электронно-микроскопических спектрах этих минералов индий отсутствует.

Основной целью исследования выступает выявление особенностей распределения индия в рудах полиметаллических и оловосульфидных месторождений Восточного Забайкалья посредством определения с помощью микрозонда.

На территории Восточного Забайкалья развито более 300 свинцово-цинковых месторождений и рудопроявлений. Их характерной особенностью является групповое размещение в тесной пространственной ассоциации с интрузивными и эффузивными образованиями, объединенными в единые вулканоплутонические комплексы (рис. 1).

По данным многих исследователей, полиметаллические месторождения Восточного Забайкалья находятся в пределах Приаргунского полиметаллического рудного пояса (Смирнов, 1961; Семинский, 2018). В Приаргунском рудном поясе полиметаллические руды приурочены к карбонатно-терригенной формации венда–нижнего кембрия, которая подразделяется на две субформации: нижнюю – углеродисто-карбонатно-терригенную (V) – и верхнюю – углеродисто-терригенно-карбонатную (C<sub>1-2</sub>). В пределах рассматриваемой структурно-формационной зоны полиметаллические месторождения локализованы в вулканогенных ассоциациях (VMS) – вулканогенно-осадочный (Нойон-Тологойский) формационный тип – и в осадочных толщах (SEDEX) – свинцово-цинково-колчеданный (Приаргунский) формационный тип (Викентьев и др., 2023).

Углеродисто-терригенно-карбонатная субформация является наиболее продуктивной для оруденения, сосредоточивая в себе более 90% запасов свинца и цинка месторождений Приаргунского типа. Она представлена переслаивающимися пачками доломитов и хемогенных известняков с прослоями глинистых сланцев и алевролитов, линзами осадочных карбонатных брекчий, реже конгломератов. В месторождениях рудные тела представлены трубообразными залежами, приуроченными к пересечению или сочленению различно направленных трещин, а также пластообразными жилообразными образованиями, генетически связанными с интрузивными магматическими породами.

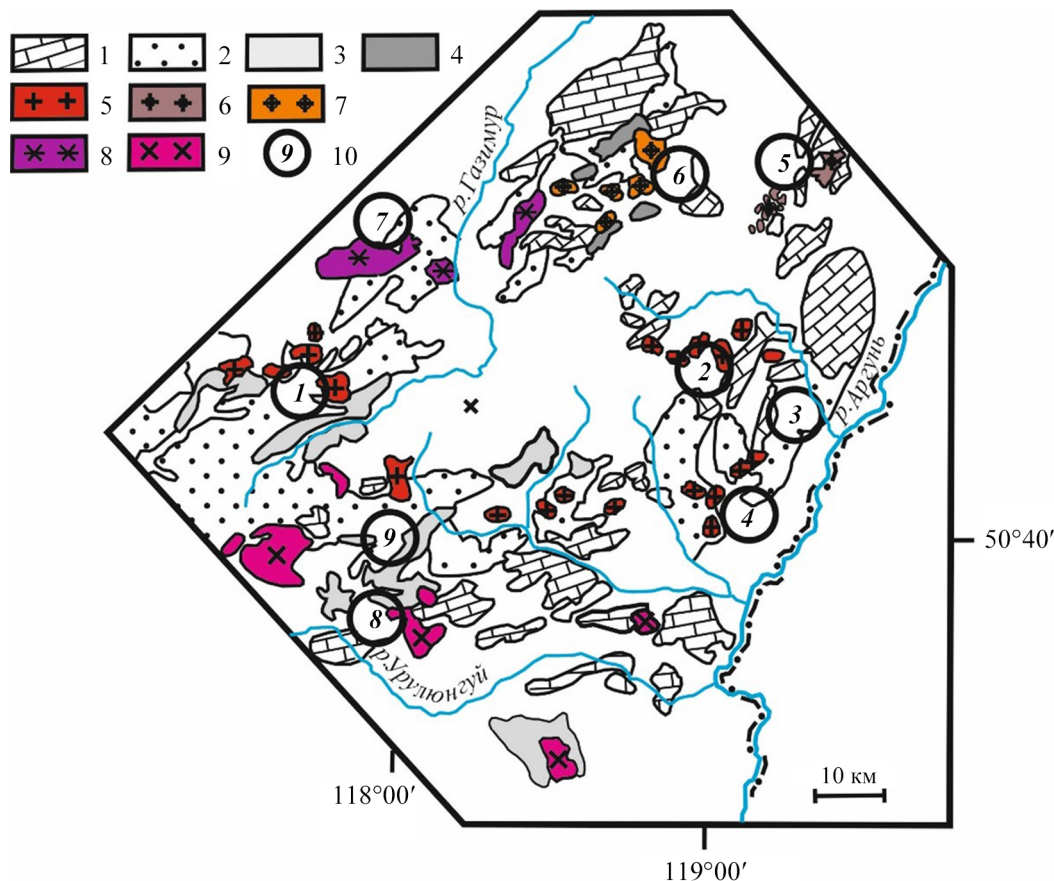
В венд-кембрийских отложениях Приаргунской рудной зоны из рассматриваемых в данной статье месторождений локализованы Благодатское, Михайловское, Воздвиженское и Акатуевское. Из полиметаллических месторождений, приуроченных к юрским андезито-дацитовым порфирирам, привлечены руды Нойон-Тологойского месторождения, содержащие индий. Из оловополиметаллических месторождений для исследования привлечены руды Шерловогорского и Хапчерангинского, генетически связанных с кукульбейским магматическим комплексом юрского возраста.

Впервые классификация полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья проведена С.С. Смирновым (1961). Он выделил четыре главных типа руд: 1) пирит-арсенопиритовый, 2) буланжерит-галенит-арсенопиритовый, 3) галенит-сфалерит-пиритовый, 4) галенит-сфалеритовый. Позднее по минеральному составу, источникам и условиям формирования полиметаллические месторождения разделили на три типа: галенит-сфалеритовый (акатуевский), скарново-галенит-сфалеритовый (кличкинский) и сульфосолено-галенит-сфалеритовый (благодатский) (Добровольская, Шадлун, 1974; Санин, Зорина, 1980).

В целом для всех полиметаллических свинцово-цинковых месторождений Приаргунского рудного района выделены семь основных последовательно образованных минеральных ассоциаций: 1) карбонатно-кварцевая, 2) арсенопирит-пиритовая, 3) сфалеритовая, 4) пирротиновая, 5) галенитовая, 6) буланжеритовая, 7) карбонатно-кварцевая (Добровольская, Шадлун, 1974).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактический материал получен при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН с 2010 по 2025 г. Для определения элементного состава в пробах руд использован рентгенофлуоресцентный метод и методы ICP-MS в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и ЗАО SGS Vostok Limited



**Рис. 1.** Схема размещения рудных полей свинцово-цинковых месторождений и юрских вулканоплутонических комплексов Восточного Забайкалья (Санин, Зорина, 1980).

1 – палеозойские карбонатные породы; 2 – юрские терригенные отложения; 3 – эффузивные образования акатуевского и нерчинско-заводского комплексов; 4 – эффузивные образования широкинского комплекса; 5–9 – интрузивные комплексы: 5 – Акатуевский, 6 – Нерчинско-Заводский, 7 – Широкинский, 8 – Позднешахтаминский, 9 – Кукульбейский; 10 – рудные узлы свинцово-цинковых месторождений: 1 – Акатуевский, 2 – Михайловский, 3 – Кадаинский, 4 – Запокровский, 5 – Нерчинско-Заводский, 6 – Широкинский, 7 – Шахтаминский, 8 – Кличкинский, 9 – Нойон-Тологойский.

**Fig. 1.** Scheme of the placement of ore fields of lead-zinc deposits and Jurassic volcanoplutonic complexes of Eastern Transbaikalia (Sanin, Zorina, 1980).

1 – Paleozoic carbonate rocks; 2 – Jurassic terrigenous deposits; 3 – Volcanic formations of the Akatuyevsky and Nerchinsk-Zavodsky complexes; 4 – Volcanic formations of the Shirokinsky complex; 5–9 – Intrusive complexes: 5 – Akatuyevsky, 6 – Nerchinsk-Zavodsky, 7 – Shirokinsky, 8 – Late Shahktamin, 9 – Kukulbeysky; 10 – Ore nodes of lead-zinc deposits: 1 – Akatuyevsky, 2 – Mikhailovsky, 3 – Kadainky, 4 – Zapokrovsky, 5 – Nerchinsk-Zavodsky, 6 – Shirokinsky, 7 – Shahktamin, 8 – Klichkinsky, 9 – Noyon-Tologoy.

(г. Чита). Минеральный состав руд и горных пород изучен в прозрачных шлифах, аншлифах минераграфическим, электронно-зондовым методами с помощью оптического поляризационного микроскопа AXIO ScopeAI, растрового электронного микроскопа LEO 1430 VP (аналитики канд. геол.-мин. наук Е.А. Хромова, Е.В. Ходырева, ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, руководитель лаборатории С.В. Канакин). В основу статьи положен материал, собранный авторами в процессе полевых исследований на свинцово-цинковых и оловополиметаллических месторождениях Юго-Восточного Забайкалья. Кроме того, использованы опубликованные

данные, сведения территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита) и обобщения из работы (Юргенсон, 2008).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Содержания индия в рудах

Содержания индия в изученных образцах руд оловополиметаллических и свинцово-цинковых полиметаллических месторождений приведены в табл. 2. Для всех изученных образцов руд, содержащих индий, обязательно присутствие в составе

**Таблица 2.** Среднее содержание индия в рудах месторождений Восточного Забайкалья, мас. %**Table 2.** Average indium content in ores of deposits in Eastern Transbaikalia, wt %

Порядковый номер	Проба	Содержание индия, г/т	Минеральная ассоциация	Месторождение
1	757	540.00	Канфилдит-пирит-галенит-сфалеритовая	Хапчерангинское
2	761	99.20	Касситерит-пирит-галенит-сфалеритовая	То же
3	762	163.00	Пирит-кварц-карбонатно-галенит-сфалеритовая	—“—
4	749	90.00	Арсенопирит-касситерит-галенит-пирит-кальцит-сфалеритовая	—“—
5	748	85.50	Касситерит-пирит-галенит-сфалеритовая	—“—
6	626-2	790.00	Висмутин-касситерит-пирит-кварц-галенит-сфалеритовая	Шерловогорское
7	630	140.00	Касситерит-халькопирит-пирит-галенит-сфалеритовая	То же
8	630-1	100.00	Касситерит-пирит-галенит-англезит-сфалеритовая	—“—
9	749-1	107.00	Касситерит-галенит-пирит-кальцит-сфалеритовая	—“—
n		9.00	Оловополиметаллические	—
x		234.97		
σ		238.44		
10	37-2	88.90	Сульфосолюно-пирит-галенит-сфалеритовая	Акатуевское
11	49	67.90	Пирит-халькопирит-галенит-сфалеритовая	То же
12	50	107.00	Сульфосолюно-пирит-халькопирит-галенит-сфалеритовая	—“—
13	825	152.00	Сфалерит-буланжерит-пирит-арсенопирит-галенитовая	Нойон-Тологойское
14	826-1	400.00	Буланжерит-пирит-арсенопирит-галенит-сфалеритовая	То же
15	826-3	110.00	То же	—“—
16	827-3	139.00	—“—	—“—
17	827-5	580.00	—“—	—“—
18	828-4	131.00	—“—	—“—
19	828	500.00	—“—	—“—
20	87	115.00	Арсенопирит-галенит-пирит-сфалеритовая	Воздвиженское
21	96	370.00	Арсенопирит-пирит-галенит-сфалеритовая	То же
22	97	66.10	Арсенопирит-пирит-сфалерит-галенитовая	—“—
23	101	48.60	То же	—“—
24	119	68.60	—“—	Михайловское
25	122	94.10	—“—	То же
26	143	72.00	—“—	—“—
27	145	52.00	—“—	—“—
28	497-2	309.00	Кварц-карбонатно-пирит-галенит-сфалеритовая	Благодатское
29	497-3	180.00	Иорданит-кварц-пирит-галенит-сфалеритовая	То же
30	497-4	425.00	То же	—“—
31	504	76.00	Иорданит-пирит-кварц-сфалерит-галенитовая	—“—
32	638	137.00	Кварц-карбонатно-пирит-галенит-сфалеритовая	—“—
n		23.00	Полиметаллические	—
x		186.42		
σ		145.13		
n		32.00	Все месторождения	—
x		200.12		
σ		183.75		

Примечание. n – число проб, x – среднее содержание, σ – среднее квадратичное отклонение.

Note. n – number of samples, x – mean content, σ – standard deviation.

минеральной ассоциации сфалерита. При этом для оловополиметаллических руд Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений наряду с ним обязательно присутствие минералов олова – касситерита, иногда станнина, редко канфильдита. Все эти минералы содержат индий, как это следует из анализа их спектров, но в количествах менее 0.01%. В касситерите, как уже указывалось, содержания индия в его деревянистой разности достигает 0.26%, а в обычных касситеритах доходит до 0.06%. Основная масса индия связана со сфалеритом. Канфильдит и касситерит присутствуют в рудах Хапчерангинского месторождения в ассоциации со сфалеритом, а также пиритом и галенитом. В индийсодержащей руде Шерловогорского месторождения (Сопка Большая) наряду со сфалеритом постоянно присутствуют касситерит, галенит, арсенопирит и пирит, реже станнин, а в части проб также висмутин и халькопирит. Все минералы, кроме сфалерита и касситерита, лишены примеси индия. Содержания его в руде Хапчерангинского месторождения составляет 85.5–540.0 г/т, при среднем 195.5, а Шерловогорского – 100–790 при среднем 284.25 г/т. Среднее для обоих месторождений – 234.97 г/т при среднеквадратичном отклонении 234.44.

В рудах свинцово-цинковых полиметаллических месторождений значимые содержания индия связаны исключительно со сфалеритом. Наименьшие содержания индия установлены в арсенопирит-пирит-сфалерит-галенитовой ассоциации Михайловского месторождения (52.0–94.1 г/т) при среднем 71.68 г/т. Для Акатуевского месторождения это сульфосоляно-пирит-халькопирит-галенит-сфалеритовая ассоциация с содержанием индия 67.9–107.0 г/т при среднем 87.93 г/т. В руде Воздвиженского месторождения индиеносной является арсенопирит-пирит-галенит-сфалеритовая ассоциация с содержанием индия 48.6–370.0 г/т при среднем 149.93 г/т. Особенностью Благодатского месторождения является присутствие в продуктивной на индий минеральной ассоциации иорданита наряду с преобладающим сфалеритом. Лишь в одном образце преобладал галенит, соответственно содержание индия было самым низким. Типичной является иорданит-кварц-пирит-галенит-сфалеритовая ассоциация. Содержания индия находятся в пределах 76–425 г/т при среднем 225.4 г/т. Сфалерит иорданит-кварц-пирит-галенит-сфалеритовой ассоциации содержал максимальное количество индия (2.06%). Высокие содержания индия обнаружены в руде Нойон-Тологойского месторождения в буланжерит-пирит-арсенопирит-галенит-сфалеритовой ассоциации: 110–580 г/т при среднем 287.4 г/т. Несмотря на то что максимально высокое содержание индия обнаружено в висмутин-касситерит-пирит-кварц-галенит-сфалеритовой ассоциации Шерловой Го-

ры (790 г/т), среднее содержание его (244.5 г/т при среднеквадратичном отклонении 273.33) несколько меньше, чем в руде Нойон-Тологойского месторождения (среднее 287.43 г/т при среднеквадратичном отклонении 185.08).

Тем не менее общее среднее содержание индия существенно выше в месторождениях оловополиметаллической формации (234.95 г/т при среднеквадратичном отклонении 234.44) по сравнению с показателем для месторождений свинцово-цинковой полиметаллической формации (186.42 г/т при среднеквадратичном отклонении 145.13). Это связано с тем, что здесь индий связан не только со сфалеритом, но и с касситеритом, содержание в котором достигает 600 г/т.

Из всех полученных данных по свинцово-цинковым полиметаллическим месторождениям большими содержаниями индия отличается Нойон-Тологойское месторождение, относящееся к VMS-типу, что подтверждает выводы относительно концентраций элементов-примесей в свинцово-цинковых полиметаллических месторождениях, приведенные в работе (Гасков и др., 2005).

Таким образом, индиеносность во всех рассмотренных месторождениях связана со сфалеритовой ассоциацией, но сфалерит может проявляться и в более поздних минеральных ассоциациях, где содержание в нем индия всегда менее 0.01%.

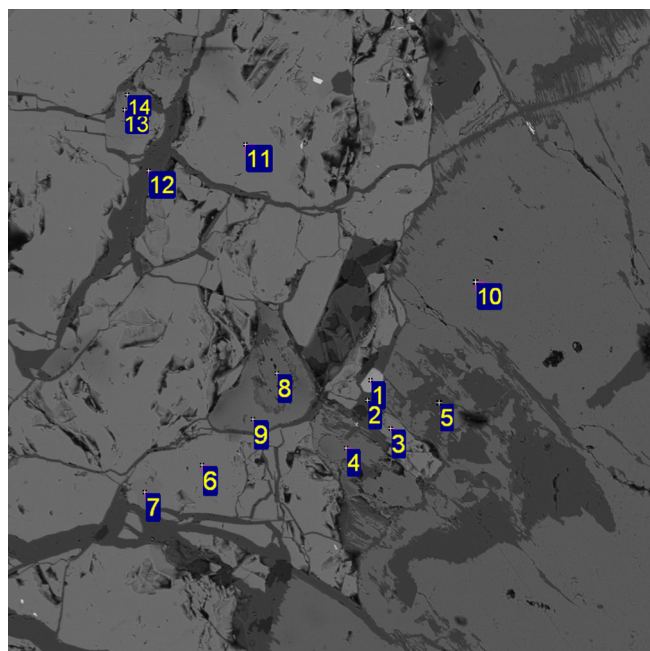
#### **Особенности минеральных ассоциаций сфалерита, содержащего индий**

Изучен химический состав 243 индивидов сфалерита, из которых лишь 54 содержали примеси индия в количестве более 0.01%, что составляет только 22% от общего их количества (табл. 3). Отсюда следует, что распределение индивидов с относительно высокими содержаниями индия крайне неоднородно. Частота их встречаемости составляет от 3.33 до 40.50%. Минимальная частота встречаемости сфалерита, содержащего индий, выявлена в минеральных ассоциациях Шерловогорского, Хапчерангинского, Воздвиженского и Нойон-Тологойского месторождений. Это обусловлено, вероятно, приуроченностью индийсодержащих сфалеритов к определенным ассоциациям сфалерита. Более того, даже в одном аншлифе присутствуют индивиды сфалерита, различающиеся содержанием индия на порядок цифр. Максимальное число индивидов сфалерита с высоким содержанием индия определено в одном из аншлифов Благодатского месторождения.

Для сфалерита месторождения Сопка Большая в Шерловогорском рудном узле типична ассоциация с пиритом, пирротинном, халькопиритом, касситеритом и сидеритом (рис. 2). Но на спектрах обратнорассеянных электронов в точках измерения состава сфалерита индий присутствует всегда. Кад-

**Таблица 3.** Доля измеренных индивидов сфалерита, содержащих более 0.01% индия**Table 3.** The proportion of measured sphalerite individuals containing more than 0.01% indium

Месторождение	Измерено индивидов	Индивиды с индием	Доля, %
Шерловогорское	20.00	1.00	5.00
Хапчерангинское	51.00	2.00	3.92
Воздвиженское	30.00	1.00	3.33
Нойон-Тологойское	21.00	1.00	5.00
Благодатское	121.00	49.00	40.50
Всего	243.00	54.00	22.00



200 мкм

**Рис. 2.** Сфалерит (3, 11) с высоким содержанием индия и кадмия в ассоциации со сфалеритом (6) с низкими их содержаниями.

Присутствуют пирит (4, 8, 10), пирротин (9, 14), халькопирит (7, 13), касситерит (1) и сидерит (2, 5, 12). Обр. 626-2. Месторождение Сопка Большая, Шерловогорское рудное поле. Электронно-микроскопический снимок.

**Fig. 2.** Sphalerite (3, 11) with a high content of indium and cadmium in association with sphalerite (6) with very low contents of these elements.

Pyrite (4, 8, 10), pyrrhotite (9, 14), chalcopyrite (7, 13), cassiterite (1), and siderite (2, 5, 12) are present. Sample 626-2. Sopka Bolshaya deposit, Sherlovogorskoye ore field. Scanning electron microscope image.

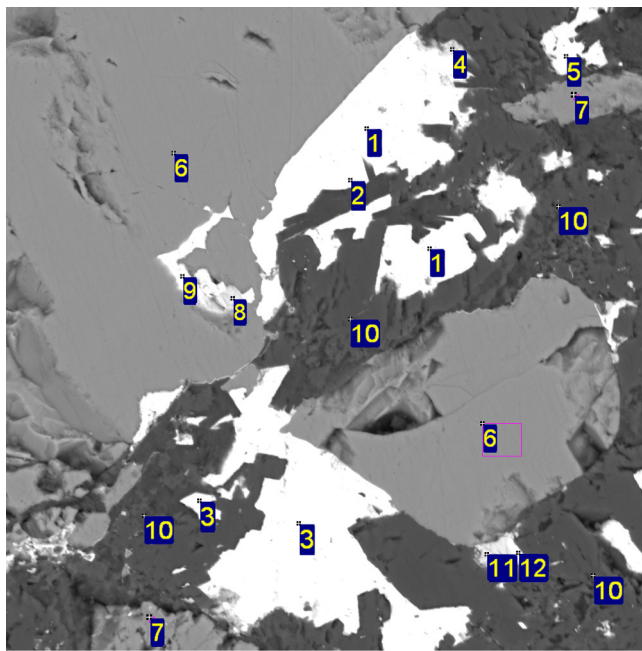
мий встречается в большем количестве индивидов сфалерита.

Все сфалериты этого месторождения характеризуются высокими содержаниями железа и относятся к марматитам. Касситерит в изученных аншлифах не имеет значимых количеств примеси индия, тем не менее на спектрах он присутствует вместе

с ниобием. Халькопирит обычен, а пирит и пирротин содержат до 0.58 и 0.62 мас. % никеля соответственно.

В сфалерите Хапчерангинского оловополиметаллического месторождения индий отмечен в содержаниях более 0.01% лишь в двух индивидах в одном из изученных аншлифов. Такой сфалерит находится в ассоциации с мелкими включениями канфильдита на контакте с галенитом (рис. 3).

Здесь индий наряду с кадмием также присутствует на спектрах (рис. 4).



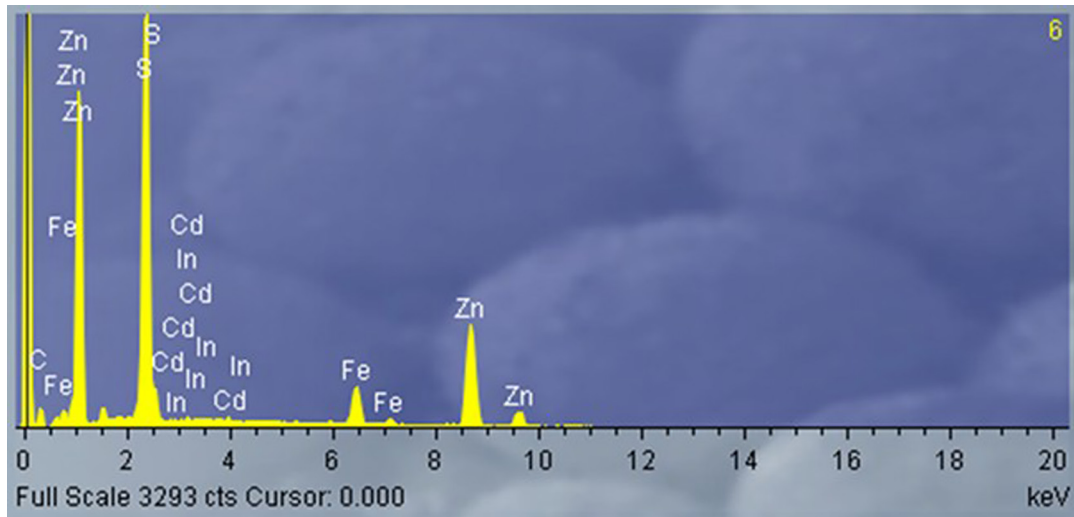
60 мкм

**Рис. 3.** Агрегат из сфалерита (6, 7, 11), галенита (1–5, 9, 12), сидерита (10) с мелкими включениями канфильдита (8, 11) на контакте с галенитом.

Обр.757. Хапчерангинское месторождение. Электронно-микроскопический снимок.

**Fig. 3.** Sphalerite (6, 7, 11), galena (1–5, 9, 12), siderite (10) aggregate with small inclusions of canfieldite (8, 11) at the contact with galena.

Sample 757. Khapcherangin deposit. Electron microscope image.



**Рис. 4.** Содержания индия и скандия в сфалерите менее порога обнаружения (0.01%) в аншлифе № 757, Хапчерангинское месторождение.

**Fig. 4.** The contents of indium and scandium in sphalerites are below the lower detection limit (0.01%) in thin section no. 757, Khapcheranginskoye deposit.

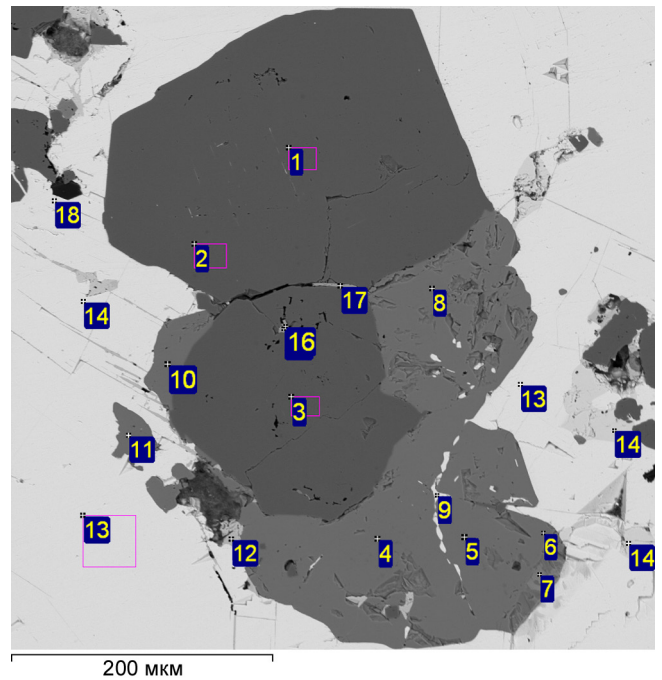
Индийсодержащие сфалериты, как уже сказано, в свинцово-цинковых полиметаллических месторождениях ассоциируют с галенитом, обычно содержащим серебро в количестве, достигающем 2.27%.

В Благодатском месторождении индийсодержащий сфалерит ассоциирует с иорданитом. На рис. 5 хорошо видно, что в пирите (1, 3) и между его индивидами, занимающими всю центральную часть, находятся включения раннего касситерита (15–17). На контакте галенита и сфалерита появляются мелкие выделения англезита (12). В галените присутствуют также включения раннего кварца (18).

#### Особенности химического состава сфалерита и ассоциирующих с ним минералов

Химический состав индийсодержащего сфалерита оловополиметаллических месторождений представлен в табл. 4. Среднее содержание индия в индивидах, где оно более 0.01%, составляет 0.52%. Из табл. 4 видно, что сфалерит содержит примеси кадмия, сопоставимые с примесями индия. Содержание железа находится в пределах 8.37–15.99 мас. %, что дает основание отнести его к марматиту.

Химический состав сфалеритов Благодатского и Воздвиженского месторождений представлен в табл. 5. Все сфалериты характеризуются низкими содержаниями железа в пределах 1.06–4.59%. Для них типична и низкая частота встречаемости кадмия выше 0.01%. Содержание индия варьирует широко и достигает 2.06%.



**Рис. 5.** Индийсодержащий сфалерит (4–8, 10, 11) в ассоциации с пиритом (1–3) в позднем галените (9, 13).

В галените присутствуют мелкие включения иорданита (14). Обр. 497-3. Благодатское месторождение. Электронно-микроскопический снимок.

**Fig. 5.** Indium-containing sphalerite (4–8, 10, 11) in association with pyrite (1–3) in late galena (9, 13).

The galena contains fine inclusions of jordanite (14). Sample 497-3. Blagodatsoyey deposit. Electron microscope image.

**Таблица 4.** Химический состав индийсодержащего сфалерита оловополиметаллических месторождений**Table 4.** Chemical composition of indium-containing sphalerite from tin-polymetallic deposits

Образец	Элемент и его содержание, мас. %					Сумма	Формула
	In	Cd	Fe	Zn	S		
626-2 Нормированный Ф.к.	0.53	<0.01	13.07	52.17	33.75	100.65	$(Zn_{0.77}Fe_{0.22}In_{0.01})S$
	0.53		12.99	52.06	33.53	100.00	
	0.01		0.22	0.77	1.00	2.00	
757-1 Нормированный Ф.к.	0.48	0.60	8.58	58.92	34.06	102.64	$(Zn_{0.84}Fe_{0.14}In_{0.01}Cd_{0.01})S$
	0.47	0.50	8.37	57.90	33.21	100.00	
	0.01	0.01	0.14	0.84	1.00	2.00	
757-2 Нормированный Ф.к.	0.57	0.55	15.55	49.62	34.68	100.97	$(Zn_{0.70}Fe_{0.26}In_{0.01}Cd_{0.01})S_{1.02}$
	0.56	0.54	15.39	49.17	34.34	100.00	
	0.01	0.01	0.26	0.70	1.02	2.00	

**Таблица 5.** Химический состав сфалерита Благодатского и Воздвиженского месторождений, содержащего индий**Table 5.** Chemical composition of sphalerite from the Blagodatskoye and Vozdvizhenskoye deposits containing indium

Измеренный индивид	Элемент и его содержание, мас. %					Сумма	Формула
	Zn	Fe	In	Cd	S		
497-3-3-1-1	63.23	1.22	1.80	<0.01	34.37	100.62	$Zn_{0.93}Fe_{0.02}In_{0.02}S_{1.03}$
497-3-3-1-2	63.74	1.19	2.06	<0.01	34.00	101.00	$Zn_{0.94}Fe_{0.02}In_{0.02}S_{1.02}$
497-3-3-1-3	62.11	1.48	1.69	<0.01	34.09	99.37	$Zn_{0.92}Fe_{0.03}In_{0.01}S_{1.04}$
497-3-3-1-4	62.49	1.37	1.51	<0.01	33.87	99.24	$Zn_{0.93}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.03}$
497-3-2-2	63.88	1.29	1.06	<0.01	32.76	99.00	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.01}$
497-3-2-3	63.17	1.34	0.56	<0.01	33.54	99.62	$Zn_{0.95}Fe_{0.02}In_{0.006}S_{1.02}$
497-3-2-5	64.85	1.06	1.00	<0.01	33.25	100.17	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.01}$
497-3-4-1	63.65	1.49	0.79	<0.01	33.30	99.23	$Zn_{0.95}Fe_{0.03}In_{0.01}S_{1.02}$
497-3-4-2	65.41	1.33	1.02	<0.01	33.11	100.87	$Zn_{0.97}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.00}$
497-3-4-3	64.62	1.22	0.59	<0.01	34.13	100.56	$Zn_{0.95}Fe_{0.02}In_{0.007}S_{1.02}$
497-3-4-4	65.90	1.47	0.83	<0.01	33.26	101.46	$Zn_{0.97}Fe_{0.03}In_{0.008}S_{1.00}$
497-3-9-4	62.28	3.48	0.47	0.57	32.56	99.35	$Zn_{0.93}Fe_{0.06}In_{0.001}S_{1.00}$
497-3-9-6	62.75	2.32	0.88	<0.01	32.26	98.22	$Zn_{0.93}Fe_{0.04}In_{0.008}S_{1.00}$
497-3-9-8	63.31	3.83	0.54	<0.01	32.62	100.09	$Zn_{0.94}Fe_{0.067}In_{0.003}S_{0.99}$
497-3-9-10	63.73	2.10	0.63	0.50	33.51	101.86	$Zn_{0.95}Fe_{0.04}In_{0.006}Cd_{0.004}S_{1.0}$
497-3-9-11	65.00	1.34	0.85	<0.01	33.22	100.41	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.00}$
87-4-1	61.43	4.59	0.66	<0.01	33.31	99.99	$Zn_{0.91}Fe_{0.08}In_{0.01}S_{1.01}$

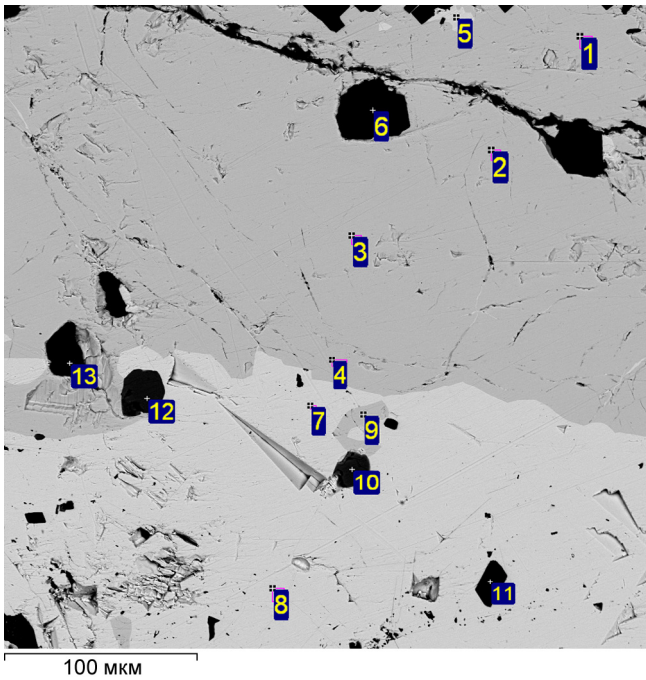
В двух индивидах индийсодержащего сфалерита Благодатского месторождения удалось измерить вариации содержания индия (рис. 6, 7) от центра к периферии. Эти индивиды находятся в галените (см. рис. 7а (9–13); 7б (6, 8, 11, 12); контактируя с иорданитом – 7б (7, 10)). Величина индивидов сфалерита 18 × 25 микрон. Вариации содержания индия в них приведены в табл. 6. Анализ данных табл. 6 и рис. 7 свидетельствует о тенденции уменьшения содержания индия в краевых частях по сравнению с центральными, что указывает на предпочтительное вхождение индия в структуру сфалерита в начале кристаллизации его индивидов.

Для сфалерита характерен избыток серы во всех измеренных точках, за исключением одной крае-

вой вблизи контакта с галенитом, в котором наблюдается избыток серы.

В большей части измеренных индивидов сфалерита, как это видно из табл. 5, также наблюдается избыток серы. Кадмий в количестве, превышающем 0.01%, одновременно с индием встречен лишь в одном индивиде из 17 измеренных.

Поскольку в сфалерите все изоморфные примеси, включая железо, индий и кадмий, замещают цинк, можно предположить, что связи между всеми этими элементами должны быть обратными. Исходя из этого, после формирования выборки “железо–индий” в порядке возрастания последнего построен график их зависимости, представленный на рис. 8. Из него следует, что при содер-

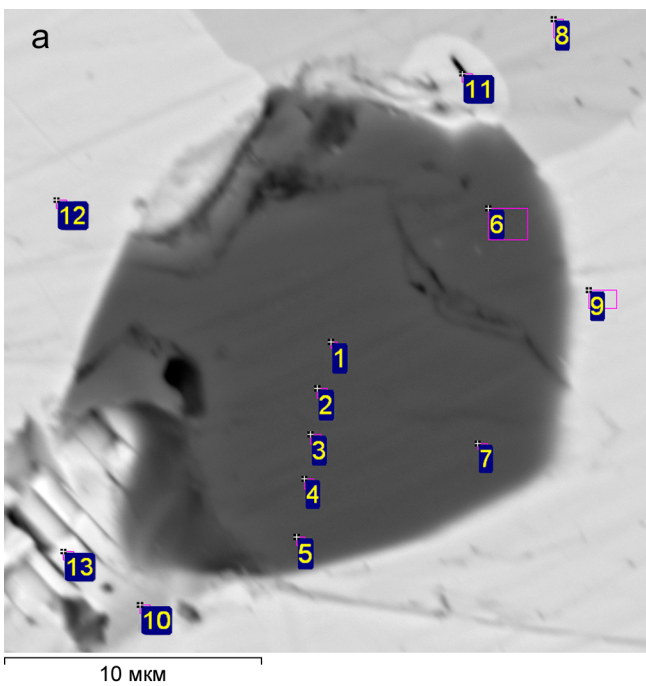


**Рис. 6.** Сфалерит (10, 12) в галените (5, 7, 8) и иорданите (1–4, 9), содержащем включения пирита (11, 13) и кварца (6).

Здесь и на рис. 7 обр. 497-3. Благодатское месторождение. Электронно-микроскопический снимок. Остальные пояснения см. в тексте.

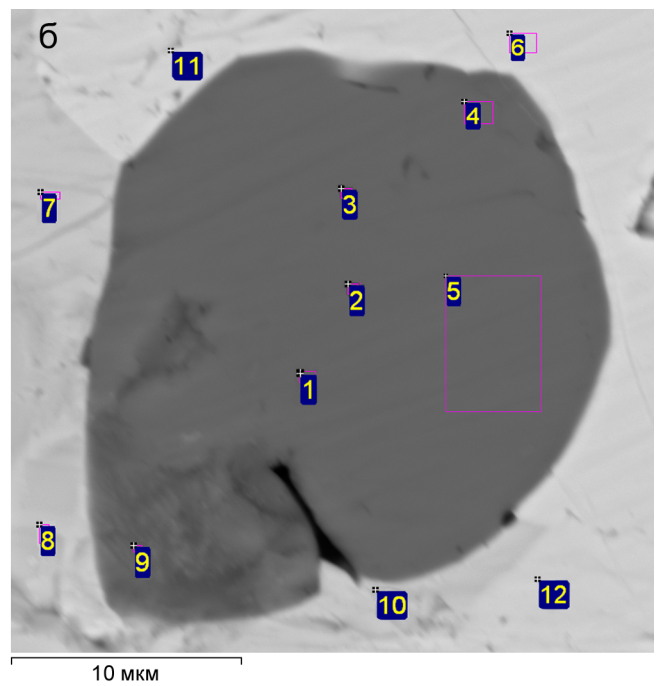
**Fig. 6.** Sphalerite (10, 12) in galena (5, 7, 8) and jordanite (1–4, 9), containing inclusions of pyrite (11, 13) and quartz (6).

Here and in Fig. 7 Sample 497-3. Blagodatskoye deposit. Electron microscope image. For further explanations, see the text.



**Рис. 7.** Точки измерения индия в сфалерите.

**Fig. 7.** Points of indium measurement in sphalerite.



жаниях индия <1.00% обратная зависимость между ними проявлена слабо, но при возрастании содержания индия до 2.06% и снижении содержания железа до <1.34% обратная зависимость между ними становится явной. Это указывает на влияние индия на вхождение железа в структуру сфалерита. Примечательно, что такой сфалерит с низ-

ким содержанием железа программа микрозонда называет вюрцитом.

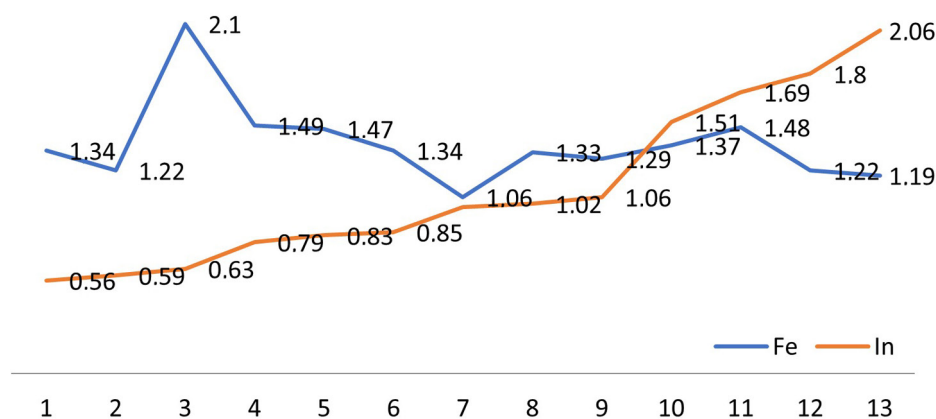
Однако попытка выявить эту связь при больших содержаниях железа и малых индия, как это характерно для высокожелезистых сфалеритов Хапчегинского и Шерловогорского рудных районов, не удалась.

**Таблица 6.** Вариации содержания индия в индивидах сфалерита**Table 6.** Variations of indium content in sphalerite individuals

Индивид и номер измерения	Вид результата анализа	Элемент и его содержание, мас. %					Сумма	Формула
		Zn	Fe	In	Cd	S		
<i>Индивид с рис. 7а</i>								
1	1	63.23	1.22	1.80	Н.о.	34.37	100.62	$Zn_{0.93}Fe_{0.02}In_{0.02}S_{1.03}$
	2	62.84	1.21	1.79		34.16	100.00	
2	1	63.74	1.19	2.06	Н.о.	34.00	101.00	$Zn_{0.94}Fe_{0.02}In_{0.02}S_{1.02}$
	2	63.12	1.18	2.04		33.67	100.00	
3	1	62.11	1.48	1.69	Н.о.	34.09	99.37	$Zn_{0.92}Fe_{0.03}In_{0.01}S_{1.04}$
	2	62.5	1.49	1.70		34.31	100.00	
4	1	62.49	1.37	1.51	Н.о.	33.87	99.24	$Zn_{0.93}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.03}$
	2	62.97	1.38	1.52		34.13	100.00	
5	1	62.61	1.02	0.99	Н.о.	33.83	98.44	$Zn_{0.94}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.03}$
	2	63.6	1.04	1.00		34.36	100.00	
6	1	61.80	1.38	Н.о.	0.51	35.09	98.78	$Zn_{0.91}Fe_{0.02}Cd_{0.01}S_{1.06}$
	2	62.55	1.40		0.53	35.52	100.00	
7	1	62.73	0.91	1.08	Н.о.	33.32	98.04	$Zn_{0.95}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.03}$
	2	63.98	0.93	1.10		33.99	100.00	
<i>Индивид с рис. 7б</i>								
1	1	63.33	1.21	Н.о.	Н.о.	33.72	98.26	$Zn_{0.95}Fe_{0.02}S_{1.03}$
	2	64.45	1.23			34.32	11.00	
2	1	63.88	1.29	1.06	Н.о.	32.76	99.00	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.01}$
	2	64.53	1.30	1.07		33.09	100.00	
3	1	64.17	1.34	0.56	Н.о.	33.54	99.62	$Zn_{0.95}Fe_{0.02}S_{1.02}$
	2	64.42	1.35	0.56		33.67	100.00	
4	1	63.63	0.90	Н.о.	Н.о.	33.18	97.71	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}S_{1.02}$
	2	65.12	0.92			33.96	100.00	
5	1	64.85	1.06	1.00	Н.о.	33.25	100.17	$Zn_{0.96}Fe_{0.02}In_{0.01}S_{1.01}$
	2	64.75	1.06	1.00		33.20		
9	1	60.99	0.92	0.00	Н.о.	27.56	89.46	$Zn_{0.103}Fe_{0.02}S_{0.95}$
	2	68.17	1.03			30.8	100.00	

Примечание. 1 – результаты анализа; 2 – результаты анализа, нормированные относительно 100%. Н.о. – не определялось.

Note. 1 – analysis results; 2 – analysis results normalized to 100%. Н.о. – not determined.



**Рис. 8.** Взаимосвязи содержания железа и индия в сфалерите свинцово-цинковых полиметаллических месторождений.

По горизонтальной оси номера измерений.

**Fig. 8.** Relationships of iron and indium contents in sphalerites of lead-zinc polymetallic deposits.

Measurement numbers are shown on the horizontal axis.

Первые данные о химическом составе канфильдита, ассоциирующего с индийсодержащим сфалеритом в руде Хапчерангинского месторождения, приведены в табл. 7. Он тесно ассоциирует с галенитом, как это видно на рис. 3. Величина его индивидов едва превышает 3–4 микрона, он ксеноморфен. Канфильдит постоянно содержит теллур от 18.37 до 19.95 мас. %. Подобный теллуристый канфильдит впервые был описан Д.О. Онтоевым с соавторами (1971) в руде Белухинского месторождения вольфрама в Забайкалье. Те-канфильдит в рудах Белухинского месторождения находится в ассоциации с висмутом самородным, тетрадимитом, селенистым галенитом, селенистым висмутином, самородным теллуrom, пирротинном, оруэтитом и броньяртитом (Онтоев, 1974, с. 87). Отметим, что два последних названия в настоящее время упразднены как соответствующие смесям. Те-канфильдит Лунного Au-U-месторождения, по данным К.А. Новоселова с соавторами (2019), содержит от 18.63 до 19.17 мас. % теллура, замещающего серу. В двух из измеренных индивидов присутствует также золото (1.13–1.14 мас. %). Для всех измеренных индивидов получен недостаток катионной части и избыток анионной. Лишь в одном из них наблюдается незначительный избыток олова.

В образце руды Благодатского месторождения было показано (см. рис. 6 и 7), что содержащий индий сфалерит находится в ассоциации иорданитом, образующим тесные сростания с галенитом. Химический состав иорданита, находящегося в ассоциации со сфалеритом, представлен в табл. 8.

Иорданит Благодатского месторождения, ассоциирующий с индийсодержащим сфалеритом, наряду с мышьяком постоянно содержит сурьму, которая преобладает над концентрацией мышьяка, хотя современная формула его, приведенная в последнем списке The New IMA List of Minerals – A Work in Progress – Updated: November 2024, не включает сурьму ( $Pb_{14}As_6S_{23}$ ). Отличается он и постоянным избытком свинца (в среднем на 0.52 форм. ед.) и недостатком серы (в среднем на 0.34 форм. ед.). Полученные формульные коэффициенты этого иорданита свидетельствуют о том, что здесь развита переходная разность между иорданитом и геокронитом.

Особенностью галенита, ассоциирующего с индийсодержащим сфалеритом, является почти постоянное присутствие железа (до 3.83 мас. %) и реже серебра (до 2.27 мас. %) (табл. 9), его примесь – менее 0.01 мас. % – постоянно фиксируется на электронно-микроскопических спектрах.

Таблица 7. Химический состав канфильдита Хапчерангинского месторождения

Table 7. Chemical composition of Canfieldite from the Khapcherangin deposit

Измеренный индивид	Элемент и его содержание, мас. %					Сумма	Формула
	Ag	Sn	Te	Au	S		
C-4-8	62.52	8.22	18.57		10.66	99.37	$Ag_{7.85}Sn_{0.94}(S_{4.25}Te_{1.97})_{6.22}$
C-4-1-6	63.75	8.77	18.91		10.13	101.66	$Ag_{7.85}Sn_{0.98}(S_{4.2}Te_{1.97})_{6.17}$
C-5-1-5	63.05	8.79	19.95		9.82	101.61	$Ag_{7.82}Sn_{0.99}(S_{4.1}Te_{2.09})_{6.19}$
C-5-1-6	63.01	9.41	18.97	1.13	10.76	103.29	$(Ag_{7.6}Au_{0.07})_{7.67}Sn_{1.03}(S_{4.36}Te_{1.93})_{6.29}$
C-5-1-7	61.87	7.88	18.57		9.47	97.79	$Ag_{7.96}Sn_{0.92}(S_{4.1}Te_{2.02})_{6.12}$
C-5-1-9	63.65	8.29	19.11		10.25	101.29	$Ag_{7.84}Sn_{0.93}(S_{4.25}Te_{1.99})_{6.24}$
C-6-2	60.95	8.40	18.37		9.53	97.24	$Ag_{7.87}Sn_{0.99}(S_{4.14}Te_{2.01})_{6.15}$
C-6-4	63.21	9.00	18.92	1.14	10.27	102.54	$(Ag_{7.74}Au_{0.08})_{7.82}Sn_{1.0}(S_{4.23}Te_{1.96})_{6.19}$

Таблица 8. Химический состав иорданита из ассоциации со сфалеритом Благодатского месторождения

Table 8. Chemical composition of jordanite associated with sphalerite from the Blagodatnoye deposit

Измеренный индивид	Элемент и его содержание, мас. %				Сумма	Формула
	Pb	As	Sb	S		
3-1	69.69	6.16	6.19	17.21	99.24	$Pb_{14.37}As_{3.51}Sb_{2.17}S_{22.94}$
3-2	70.93	6.43	6.61	16.79	100.75	$Pb_{14.63}As_{3.67}Sb_{2.32}S_{22.38}$
3-9	69.53	5.92	7.66	17.39	100.49	$Pb_{14.15}As_{3.33}Sb_{2.65}S_{22.87}$
2-1-3	70.36	4.49	8.37	17.13	100.35	$Pb_{14.56}As_{2.57}Sb_{2.95}S_{22.92}$
2-1-9	70.19	5.04	8.80	16.91	100.94	$Pb_{14.48}As_{2.88}Sb_{3.09}S_{22.55}$
2-1-13	69.71	4.63	8.32	16.91	98.73	$Pb_{14.94}As_{2.74}Sb_{3.09}S_{22.28}$

**Таблица 9.** Химический состав галенита, ассоциирующего с индийсодержащим сфалеритом**Table 9.** Chemical composition of galena associated with indium-containing sphalerite

Измеренный индивид	Элемент и его содержание, мас. %				Сумма
	Pb	Fe	Ag	S	
4-1	86.83	0.41	Н.о.	13.20	100.45
4-2	85.96	0.69	Н.о.	12.86	99.51
4-3	86.17	1.82	0.73	13.13	101.86
4-12	81.40	3.83	2.27	12.58	100.07
7-4	87.81	Н.о.	Н.о.	12.30	100.11
1-2-8	84.64	1.19	Н.о.	12.82	98.66

## ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено содержание индия в главных минеральных ассоциациях руд оловополиметаллических и полиметаллических свинцово-цинковых месторождений (см. табл. 2) Восточного Забайкалья. Установлено, что оно вариабельно как в минеральных ассоциациях, так и в самих месторождениях. Средние содержания индия в изученных минеральных ассоциациях руд составляют, г/т: в оловополиметаллических – 284.25 (Шерловогорское), 195.5 (Хапчерангинское), среднее – 234.97 при  $\sigma = 238.4$ ; в свинцово-цинковых полиметаллических по нарастанию содержания – 71.68 (Михайловское), 87.93 (Акатуевское), 149.43 (Воздвиженское), 225.4 (Благодатское), 287.43 (Нойон-Тологойское, среднее – 186.42 при  $\sigma = 155.1$ . Наибольшие средние содержания индия установлены в оловополиметаллических месторождениях. Среднее содержание по всем 32 пробам всех изученных месторождений составило 200.12 г/т при  $\sigma = 183.75$ .

Основным носителем индия является сфалерит, содержащий до 0.53 мас. % в его индивидах в оловополиметаллических месторождениях, но максимально высокие его содержания до 2.06% установлены в индивидах свинцово-цинкового полиметаллического Благодатского месторождения. Вхождение индия в структуру сфалерита имеет тенденцию к обратной связи с особенностями содержания в нем железа и, соответственно, с соотношением цинка и железа, но его наибольшие содержания установлены в маложелезистом сфалерите Благодатского месторождения. Сравнительный анализ взаимоотношений индивидов сфалерита, включающих значимые количества индия, показал, что они относятся к его ранним генерациям главной сфалеритовой минеральной ассоциации, развивающейся по арсенипирит-пиритовой. Исследования подтвердили и уточнили известные данные, полученные в результате разведки полиметаллических и оловополиметаллических месторождений Забайкалья.

Ранее с помощью термодинамического моделирования (Гаськов, Гущина 2020) установлено, что

более высокие содержания индия в оловополиметаллических рудах относительно свинцово-цинковых полиметаллических связаны с их формированием из кислых высокохлоридных растворов. Результаты исследований показали, что среди рассматриваемых месторождений Приаргунской рудной зоны наибольшими средними концентрациями индия характеризуются руды Нойон-Тологойского месторождения VMS-типа (287 г/т In), а также оловополиметаллические Шерловогорского (Сопка Большая) (284 г/т In) и Хапчерангинского (195 г/т In) месторождений.

## ВЫВОДЫ

1. Основным носителем индия в рудах изученных месторождений Забайкалья является сфалерит (до 2.06%), и только в оловополиметаллических месторождениях часть индия связана и с касситеритом (до 0.06%), деревянистая разность которого содержит до 0.26%. При этом все измеренные индивиды сфалерита с индием отличаются дефицитом серы.

2. Индий связан в основном со сфалеритом ранних минеральных ассоциаций. В оловополиметаллических месторождениях Забайкалья индиеносным является высокожелезистый сфалерит, а в свинцово-цинковых полиметаллических – маложелезистый.

3. Выявлена тенденция к обратной связи между содержаниями железа и индия, замещающих цинк, четче проявляющаяся при относительно низких содержаниях железа и высоких – индия.

4. Содержания индия уменьшаются от ранних центральных частей кристаллов сфалерита к поздним краевым. Изучение влияния примесей индия на особенности тонкой структуры сфалерита представляется важным для понимания способа вхождения в него.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Минина О.Р., Спирина А.В., Дамдинова Л.Б. (2023) Классификация про-

- цессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS-SEDEX-MV-тип – пример гигантского Озерного месторождения в Забайкалье, Россия. *Геология руд. месторождений*, **65**(3), 201-236. <https://doi.org/10.31857/S001677702303005X>
- Гаськов И.В., Гущина Л.В. (2020). Физико-химические условия формирования повышенных содержаний индия в рудах оловорудных и полиметаллических месторождений Сибири и Дальнего Востока по данным термодинамического моделирования. *Геохимия*, **65**(3), 258-276.
- Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р. (2005) Факторы концентрирования элементов-примесей в рудах колчеданных месторождений юга Сибири. *Геология и геофизика*, **46**(3), 303-317.
- Гаськов И.В., Павлов Г.А., Владимиров А.Г., Гвоздев В.И. (2014) Индий и другие элементы-примеси в рудах колчеданно-полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, (3), 67-71.
- Гаськов И.В., Владимиров А.Г., Ханчук А.И., Павлов Г.А., Гвоздев В.И. (2017) Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока России. *Геология руд. месторождений*, **59**(1), 67-74.
- Добровольская М.Г., Шадлун Т.Н. (1974) Минеральные ассоциации и условия формирования свинцово-цинковых руд. М.: Наука, 194 с.
- Иванов В.В. (1996) Экологическая геохимия элементов. Кн. 3. Редкие р-элементы. М.: Недра, 353 с.
- Иващенко В.И. (2021) Особенности распределения индия в сфалеритах из скарнов Питкярантского рудного района (Южная Карелия, Россия). *Зан. РМО*, **150**(3), 50-66. <https://doi.org/10.31857/S0869605521030047>
- Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Блинов И.А. (2019) Теканфильдит из руд Лунного Au-U месторождения (Алданский район, Республика Якутия). *Минералогия*, **5**(2), 49-56. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-2-49-56>
- Онтюев Д.О. (1974) Стадийность минералообразования и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 244 с.
- Онтюев Д.О., Тронева И.В., Цепин А.И. (1971) Первая находка теллуристого канфильдита. *Докл. АН СССР*, **201**(3), 693-696.
- Павлова Г.Г., Владимиров А.Г., Гвоздев В.И., Коростелев П.Г., Семеняк Б.И., Гоневчук В.Г., Тишин П.А. (2016) Индиеносность оловосульфидной минерализации в оловорудных месторождениях Дальнего Востока России. *Докл. АН*, **471**(1), 71-76.
- Санин Б.П., Зорина Л.Д. (1980) Формации свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья. М.: Наука, 195 с.
- Семинский Ж.В. (2018) Рудные пояса Байкало-Забайкальского региона. Ч. 2. *Изв. Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*, **41**(2), 9-28.
- Смирнов С.С. (1961) Полиметаллические месторождения и металлогения Восточного Забайкалья. М.: АН СССР, 508 с.
- Чан Туан Ань, Гаськов И.В., Чан Чонг Хоа, Неволько П.А., Фам Тхи Зунг, Фам Нгок Кан. (2012) Минералогическо-геохимические особенности и условия образования полиметаллических месторождений структуры Логам Северо-Восточного Вьетнама. *Геология и геофизика*, **53**(7), 817-833.
- Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А., Кривокобыльский А.С. (1973) Важнейшие геолого-структурные особенности полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья. *Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков. Зап. Заб. филиала Геогр. о-ва СССР*, вып. 93, 12-41.
- Юргенсон Г.А. (2006) Минеральное сырье Забайкалья. Ч. 1, кн. 1. Черные и цветные металлы. Чита: Поиск, 2006. 256 с.
- Юргенсон Г.А. (2008) Минеральное сырье Забайкалья. Ч. 1, кн. 2. Редкие элементы. Чита: Поиск, 240 с.

## REFERENCES

- Chan Tuan Anh, Gaskov I.V., Chan Chong Hoa, Nevolko P.A., Pham Thi Zung, Pham Ngoc Kan. (2012) Mineralogical-geochemical features and conditions for the formation of polymetallic deposits in the Logam structure of Northeast Vietnam. *Geol. Geofiz.*, **53**(7), 817-833. (In Russ.)
- Chumachenko N.M., Poletaev V.V., Svirsky M.A., Krivokobylsky A.S. (1973) The main geological-structural features of the lead-zinc deposits of Priargun'e. *Rudnyye mestorozhdeniya Zabaikal'ya i metody ikh poiskov. Zap. Zab. filiala Geogr. o-va SSSR*, vyp. 93, 12-41. (In Russ.)
- Dobrovolskaya M.G., Shadlun T.N. (1974) Mineral Associations and Conditions for the Formation of Lead-Zinc Ores. Moscow, Nauka Publ., 194 p. (In Russ.)
- Gaskov I.V., Gushchina L.V. (2020) Physico-chemical conditions for the formation of elevated indium concentrations in tin and polymetallic ore deposits of Siberia and the Far East based on thermodynamic modeling data. *Geokhimiya*, **65**(3), 258-276. (In Russ.)
- Gaskov I.V., Distanov E.G., Kovalev K.R. (2005) Factors of concentration of trace elements in ores of pyrite deposits in southern Siberia. *Geol. Geofiz.*, **46**(3), 303-317. (In Russ.)
- Gaskov I.V., Pavlov G.A., Vladimirov A.G., Gvozdyev V.I. (2014) Indium and other impurity elements in the ores of chalcopyrite-polymetallic and tin-sulfide deposits of Siberia and the Far East. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, (3), 67-71. (In Russ.)
- Gaskov I.V., Vladimirov A.G., Khanchuk A.I., Pavlov G.A., Gvozdyev V.I. (2017) Features of indium distribution in ores of some polymetallic and tin-sulphide deposits of Siberia and the Far East of Russia. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **59**(1), 67-74. (In Russ.)
- Ivanov V.V. (1996) Ecological Geochemistry of Elements. Vol. 3. Rare Earth Elements. Moscow, Nedra Publ., 53 p. (In Russ.)
- Ivashchenko V.I. (2021) Features of indium distribution in sphalerites from the skarns of the Pitkyaranta ore district (South Karelia, Russia). *Zap. RMO*, **150**(3), 50-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605521030047>
- Novoselov K.A., Belogub E.V., Blinov I.A. (2019) Te-canfieldite from the Lunnoe Au-U deposit (Aldan region, Republic of Yakutiya). *Mineralogiya*, **5**(2), 49-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-2-49-56>
- Ontoev D.O. (1974) Stages of mineral formation and zo-

- ning of deposits in Transbaikalia. Moscow, Nauka Publ., 244 p. (In Russ.)
- Ontoev D.O., Troneva I.V., Tsepin A.I. (1971) The first find of telluric canfieldite. *Dokl. AN SSSR*, **201**(3), 693-696. (In Russ.)
- Pavlov G.G., Vladimirov A.G., Gvozdev V.I., Korosteleva P.G., Semenyak B.I., Gonevchuk V.G., Tishin P.A. (2016) Indigenosity of tin-sulfide mineralization in tin ore deposits of the Far East of Russia. *Dokl. AN*, **471**(1), 71-76. (In Russ.)
- Sanin B.P., Zorina L.D. (1980) Formations of lead-zinc deposits in Eastern Transbaikalia. Moscow, Nauka Publ., 195 p. (In Russ.)
- Seminsky Zh.V. (2018) Ore belts of the Baikal-Transbaikal region. Pt 2. *Izv. Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle RAEN. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*, **41**(2), 9-28. (In Russ.)
- Smirnov S.S. (1961) Polymetallic deposits and metallogeny of Eastern Transbaikalia. Moscow, AN USSR, 508 p. (In Russ.)
- Vikentyev I.V., Damdinov B.B., Minina O.R., Spirina A.V., Damdinova L.B. (2023) Classification of polymetallic ore formation processes and the transitional VMS-SEDEX-MV type as exemplified by the giant Ozeroe deposit in Zabaikalsky Krai, Russia. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **65**(3), 201-236. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S001677702303005X>
- Yurgenson G.A. (2006) Mineral raw materials of Transbaikal. Pt 1, book 1. Black and non-ferrous metals. Chita. Poisk Publ., 256 p. (In Russ.)
- Yurgenson G.A. Mineral raw materials of Transbaikal. Pt 1, book 2. Rare elements. Chita, Poisk Publ., 2008. 240 p. (In Russ.)