

УДК 553.451+533.452

Дорошенко Екатерина Михайловна
младший научный сотрудник,
преподаватель,
Тихоокеанский государственный
университет,
685035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136
e-mail: 012232@togudv.ru

Рассказова Анна Вадимовна
старший преподаватель, доцент,
Тихоокеанский государственный
университет
e-mail: 011573@togudv.ru

Драпей Анатолий Витальевич*
младший научный сотрудник, лаборант,
Тихоокеанский государственный
университет
e-mail: 2021100489@togudv.ru

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ОЛОВЯННЫХ КОНЦЕНТРАТАХ**

Аннотация:

В связи с обостренной геополитической обстановкой в Российской Федерации олово является стратегическим металлом для промышленности. Особенно ценится чистое олово без вредных примесей. Оловосодержащие кварцево-сульфидные руды Фестивального и Перевального месторождений являются важным сырьевым источником для горнодобывающей промышленности Дальнего Востока и Российской Федерации в целом. Для полиметаллических руд, где олово представлено преимущественно касситеритом, существует проблема высокого содержания мышьяка, находящегося в основном в арсениопирите. Целью данной работы является обзор методов снижения мышьяка в оловянных концентратах для определения оптимального метода, обеспечивающего максимальное уменьшение его содержания в товарном концентрате. Для достижения поставленной цели был проведен обзор литературных источников по данной тематике, в результате чего в статье приведены основные методы доводки оловянных концентратов, действующие на данный момент, а также рассмотрены специальные методы доводки концентратов: различные виды обжига (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий); возгонки (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка); выщелачивания (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное). В данном исследовании перспективным решением для экологичного и эффективного разделения олова и мышьяка в высокомышьяковых концентратах является применение гидрометаллургического метода доводки.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.060

Doroshenko Ekaterina M.
Junior Researcher, lecturer,
Pacific National University
685035 Khabarovsk,
136 Tikhookeanskaya St.
e-mail: 012232@togudv.ru

Rasskazova Anna V.
Associate Professor, Senior lecturer,
Pacific National University
e-mail: 011573@togudv.ru

Drapey Anatoly V.
Junior Researcher, Laboratory assistant,
Pacific National University
e-mail: 2021100489@togudv.ru

METHODS OF REDUCING THE CONTENT OF HARMFUL IMPURITIES IN TIN CONCENTRATES

Abstract:

Due to the aggravated geopolitical situation in the Russian Federation, tin is a strategic metal for its industry. Pure tin without harmful impurities is especially valued. The recovery of pure tin from these ores is an urgent task that requires detailed studies on arsenic removal from these ores. In the concentrate of Solnechny mining and processing plant, where tin is represented mainly by cassiterite, there is a problem with the maximum allowable arsenic content in the marketable concentrate due to the content of arsenopyrite in the ore. The objective of this work is to review methods for reducing harmful arsenic in tin concentrates to determine the optimum method to maximize the reduction of arsenic in the saleable concentrate. To achieve this goal, a review of literature sources on the subject was conducted. On the basis of which this article presents the main methods of tin concentrate finishing currently in force, and also considers special methods of concentrate finishing: different types of roasting (oxidizing, redox, chlorinating); sublimation (fuming, chlorination at low and high temperatures, sulfide sublimation); leaching (acid, neutral, alkaline, bacterial) and sintering. In this study, the application of hydrometallurgical finishing method is a promising solution for environmentally friendly and efficient separation of tin and arsenic in high arsenic concentrates.

* Участие в исследовании в рамках проекта «Наставничество», Тихоокеанский государственный университет

** Исследование проводилось в ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «ТОГУ» при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках НИР № гос. рег. гос.з № FEME-2024-0006 Теоретическое и технологическое обоснование активационных воздействий в обогащательных и гидрометаллургических процессах переработки поликомпонентного минерального сырья.

Ключевые слова: гидрометаллургия, флотация, сепарация, олово, мышьяк, касситерит, арсенопирит.

Key words: hydrometallurgy, flotation, separation, tin, arsenic, cassiterite, arsenopyrite.

Введение

Оловосодержащие кварцево-сульфидные руды Фестивального и Перевального месторождений являются важным сырьевым источником для горнодобывающей промышленности. Несмотря на применение многоступенчатой комбинированной обогатительной схемы в связи со структурными и вещественными характеристиками исходной оловянной руды, сложно получить товарные продукты удовлетворительного качества. В связи с этим актуальна проблема снижения содержания вредных примесей в оловянных концентратах. Одной из нормируемых вредных примесей является мышьяк (табл. 1), ассоциированный с арсенопиритом. В случаях, когда применение действующей обогатительной схемы не позволяет достигнуть требуемых содержаний ценного компонента – олова и снизить до норматива концентрацию вредных примесей – мышьяка, требуется применение специальных методов доводки концентратов.

Актуальной задачей является получение оловянного товарного концентрата с наименьшим содержанием мышьяка. Данная задача требует проведения детальных исследований по доводке оловянных концентратов для снижения содержания мышьяка.

Целью данной работы является обзор методов снижения вредных примесей в оловянных концентратах. Для достижения поставленной цели был проведен обзор литературных источников.

Вредные примеси в оловянных рудах и методы их выделения

Обычно олово в природе представлено в двух основных минералах – касситерите и станнине. Так, в концентрате ГОК Солнечный, где олово представлено преимущественно касситеритом, существует проблема предельно высокого допустимого содержания мышьяка в товарном концентрате (~ 4,7 % As) при допустимом содержании мышьяка для такого концентрата в 5 % (см. табл. 1) [1].

Таблица 1

Нормируемые показатели химического состава оловянных концентратов

Марка концентрата	Название	Массовая доля, %		
		Sn, не менее	Примеси, не более	
			Pb	As
КО-1	концентрат оловянный	60	2	0,3
КО-1		45	2	0,3
КОЗ-1	концентрат оловянный зернистый	30	2	5
КОЗ-2		15	2	5
КОШ-1	концентрат оловянный шламовый	15	2	2
КОШ-2		8	2	1,5
КОШ-3		5	3	0,5
КОС-1	концентрат оловянно-свинцовый	15	5	2
КОС-2		8	5	1,5
КОС-3		5	–	0,5

На Солнечной обогатительной фабрике перерабатываются руды Фестивального и Перевального месторождений [2], характеризующиеся мелкой вкрапленностью ценного компонента (касситерита) и тонким взаимным прорастанием минералов и требующие применения комбинированных методов обогащения [3].

На фабрике применяется комбинированная гравитационно-флотационная многоступенчатая технология [4 – 5]. Гравитационное обогащение является основным процессом для переработки оловянных руд. Сульфидные минералы (преимущественно пирит, арсенопирит, халькопирит) выделяются во флотационном процессе в концентрат; оксидный минерал касситерит остается в камерном продукте и направляется на дальнейшие стадии обогащения. В отдельном цикле происходит разделение сульфидов методом селективной флотации с выделением халькопирита, продуктом данного цикла является медный концентрат.

К специальным методам доводки концентратов относятся обжиг (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий); возгонка (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка); выщелачивание (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное) и спекание.

По первому направлению – пирометаллургическому – перспективным является метод вакуумного восстановительного обжига с использованием антрацита (10 %) в качестве восстановителя для удаления мышьяка и извлечения олова из минеральных продуктов, характеризующихся высоким содержанием мышьяка (~8 %). Арсенат при вакуумном восстановительном обжиге переходит в As_2O_3 , который обладает лучшей летучестью, а касситерит (SnO_2) восстанавливается до SnO и Sn . При температуре обжига $750^\circ C$ и продолжительности 3 ч эффективность удаления мышьяка достигла 97 %, а степень восстановления олова составила 84,48 % [6].

При производстве олова основное количество (78 – 92 %) мышьяка концентрируется в газах обжиговых печей, в газах рафинирования черного олова порядка 5 – 13 %, фьюминговании шлаков и электроплавке съёмов рафинирования от 2-х до 8-ми % и в газах электроплавки концентрата — 1–2 %. Технологические газы очищают последовательно в многокаскадной схеме пылеулавливания. Высокотемпературный режим очистки газов при фьюминговании бедного оловянного сырья с повышенным содержанием мышьяка позволяет получать оловянные возгоны, пригодные для пирометаллургической переработки [7 – 9]. Для селективного и глубокого (92 – 96 %) извлечения мышьяка из фьюминговых возгонов оловопроизводства существует метод щелочного выщелачивания при концентрации $NaOH$ 100 – 150 г/дм³, Т:Ж=1:5–10, $80–100^\circ C$, продолжительности 1–2 ч и стехиометрического расхода Na_2S для связывания свинца и цинка в сульфиды [7].

При фьюминговании оловосодержащих шлаков олово удаляется в виде летучего сульфида (SnS). Касситерит (SnO_2) сначала превращается в Sn , а затем – в сульфид олова (SnS). Соответственно, применение фьюминга для оловосодержащих материалов требует введения сульфидизатора ($CaSO_4 \cdot FeS_2(FeS)$) [10 – 11].

Вторым направлением доводки концентратов является гидрометаллургическое, то есть выщелачивание вредных примесей с переводом их в растворимое состояние при сохранении основного ценного компонента – касситерита в исходной форме. Химическое выщелачивание основано на высокой химической стойкости касситерита, который практически не растворим даже в концентрированных горячих растворах сильных кислот, сильных оснований, окислителей и восстановителей. Примеси, не обладающие такой устойчивостью, под действием растворителей переходят в раствор.

Выщелачивание применяют в случаях невозможности отделения вредных примесей способами обогащения. Некоторые минералы-примеси находятся в концентратах в виде весьма прочных сростков с касситеритом, причем взаимное прорастание минералов бывает настолько тонким, что измельчение нежелательно, так как оно привело

бы к значительному образованию шламов, которые затрудняют их сгущение, фильтрацию и вызывают повышенные потери олова.

Кислотное выщелачивание мышьяка из арсенопирита может осуществляться раствором азотной кислоты с нитратом калия [12 – 14]. Причем нитрат калия играет роль дополнительного окислителя, необходимого для перевода сульфидов в растворимое состояние. В работах Н.Н. Мурача показано, что наилучшим растворителем примесей касситерита является соляная кислота. Разбавленная 1:4, она выщелачивает, например, мышьяк на 97 %. Даже более разбавленная соляная кислота при повышении температуры до 60 – 135°C улучшает растворение мышьяка.

В связи с упорностью сульфидных минералов к выщелачиванию при обогащении оловянных руд процесс проводят в условиях повышенной температуры или давления. Так называемое автоклавное выщелачивание характеризуется более высокой скоростью и эффективностью. Роль окислителя играет кислород, дополнительно поступающий в автоклав.

Помимо кислотного, для удаления мышьяка применяют щелочное выщелачивание. Данный процесс также эффективнее протекает в автоклаве с дополнительным вводом кислорода [15].

Ранее для вскрытия сульфидных минералов применялись технологии обжига. Перед выщелачиванием сульфидных концентратов их обжигали, чтобы при высокой температуре и доступе атмосферного кислорода окислить сульфидные минералы, переводя их в легкорастворимую окисленную форму [16]. Данный метод сопряжен с выделением большого количества сернистых газов, являющихся ядовитыми. При обжиге арсенопирита происходит также перевод мышьяка в токсичные газообразные формы. Обжиговые пыли являются еще одним фактором, требующим тщательного улавливания и способным нанести ущерб окружающей среде. В связи с вышеперечисленными причинами, обжиговые технологии все больше замещаются технологиями автоклавного окисления, отличающимися сниженным отрицательным влиянием на окружающую среду. Переработка обжиговых пылей технологически проще по сравнению с исходными концентратами, так как вредные примеси находятся в данных продуктах в форме окислов, а не в сульфидах [17 – 21].

Третьим направлением снижения массовой доли мышьяка за счет разложения и удаления арсенопирита является биовыщелачивание. Тионовые (автотрофные) бактерии широко применяются, в частности, для удаления мышьяка из промпродуктов и концентратов. Для интенсификации процесса выщелачивания сульфидных минералов в сернокислотных растворах широко применяются микроорганизмы. Благодаря бактериальному выщелачиванию возможно извлекать не только полезные компоненты, но и вредные примеси (мышьяк) [22].

Существует большое разнообразие методов доводки оловянных концентратов, среди которых можно выделить пиро-, гидро- и биометаллургическое.

Пирометаллургическое направление имеет очевидные негативные экологические аспекты применения данного типа технологий. Технологии возгонки сульфидных соединений олова в литературе упоминаются в качестве методов доводки концентратов. В то же время указано, что фьюмингом целесообразно обрабатывать продукты с содержанием олова от 2 до 5 %, что явно ниже содержания олова в концентратах. Граничные содержания мышьяка для переработки концентратов должны соответствовать ГОСТ Р 59138-2020, что снова возвращает нас к проблеме снижения мышьяка до пирометаллургического передела.

Бактериальное выщелачивание требует поддержания температуры пульпы. При низких температурах бактерии, окисляющие сульфиды, погибают. При взрывном росте колонии бактерий и активном окислении сульфидов выделяется большое количество тепла, также способное уничтожить колонию бактерий. Таким образом, необходимо

тщательно следить за температурным режимом окисляемой минеральной массы для поддержания процесса биоокисления, требующего также значительного времени.

Выводы

Был проведен обзор литературных источников по методам снижения содержания вредных примесей в концентратах, в результате чего приведены основные методы доводки оловянных концентратов. Также рассмотрены специальные методы доводки концентратов:

- различные виды обжига (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий);
- возгонки (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка);
- выщелачивания (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное).

В данном исследовании авторы видят оптимальный метод для экологичного и эффективного разделения олова и мышьяка в высокомышьяковых концентратах – применение гидрометаллургического метода доводки.

Список литературы

1. ГОСТ Р59138. Концентрат оловянный. Технические условия, 2020, 13 с. URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/752/75274.pdf?ysclid=mbuxqp3j4u351570115> (дата обращения: 6.06.2025).
2. ПАО «Русолово». URL: <https://rus-olovo.ru/company/ork/about/> (дата обращения 20.04.2025).
3. Дорошенко Е.М., Рассказова А.В., 2024. Перспективные направления повышения качества комплексных оловянных концентратов. *Сборник конференции «Плаксинские чтения – 2024», Апатиты*, С. 79-82 doi:10.37614/978-5-91137-523-2.
4. Liao X., Chen Y., Chen J., 2022. Application of macromolecular organic polymer S-7261A in arsenic removal by flotation of refractory mixed copper ore. *Minerals Engineering*, Vol. 182, Article 107560.
5. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., 2019. Разработка метода селективной флотации сульфидов сурьмы и мышьяка при обогащении комплексных золото-содержащих руд. *Цветные металлы*, № 4, С. 6-12. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.01.
6. Zhen Yang, Tongda Deng, Huan Luo, Xianjun Lei, Baoqiang Xu, Wenlong Jiang, Bin Yang, 2024. Removal of arsenic and recovery of tin from arsenic-containing multi-metallic materials by vacuum reduction roasting. *Vacuum*, Vol. 226, Article 113332.
7. Лебедев Б.Н., Авдюков В.И., Владимирова В.П., 1974. *Комбинированные и специальные методы обогащения и переработки полезных ископаемых*. Учеб. пособие для студентов специальности "Обогащение полезных ископаемых". Алма-Ата, 204 с.
8. Копылов Н.И., 2012. Проблема мышьякосодержащих отвалов металлургии тяжелых цветных металлов и их минимизации. *Химия*, № 2, С. 31-35
9. Болатбаев К.Н., Набойченко С.С., Садыков С.Б., 2004. *Флотационнометаллургическая переработка труднообогатимых руд*. Петропавловск: СКГУ, 401 с.
10. Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang, 2022. Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, Article 102545. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102545>.
11. Zibin Zuo et al., 2024. Separation of arsenic and antimony: A comprehensive theoretical and experimental study. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 31. pp. 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.069>.
12. Патент SU 1314692 Российская Федерация, МПК С22В 30/04. *Способ выщелачивания мышьяка из пирит-арсениопиритных золотосодержащих концентратов* / Р.И. Новоселов, Е.В. Макотченко, Л.К. Чучалин, Л.Ф. Атеева, А.В. Костров, Г.И. Новоселова – заявл 05.06.1995, опубл. 10.11.1998 г.

13. Дорошенко Е.М., Ким Е.Д., Рассказова А.В., Ри Э.Х., 2023. Исследование фазового состава промежуточного продукта обогащения с последующим моделированием составов солей калия и натрия для разложения арсенопирита. *Вопросы материаловедения*, Т. 114, № 2, С. 113-124.
14. Дорошенко Е.М., Рассказова А.В., Ким Е.Д., Паньшин И.О., 2023. Комплексное исследование воздействия нитратов калия и натрия на арсенопирит в промежуточном продукте обогащения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-2, С. 40-52.
15. Пат. 2081924 Российская Федерация, МПК С22В 11/00. *Способ удаления мышьяка из концентратов благородных металлов* / М.А. Спиртус, В.В. Коблов, А.Г. Ситнов, Э.М. Тимошенко, В.И. Корсунский, А.А. Цваров – заявл. 23.08.1995, опубл. 20.06.1997.
16. Гурман М.А., Щербак Л.И., Рассказова А.В., 2015. Извлечение золота и мышьяка из продуктов обжига упорных пирит-арсенопиритовых концентратов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 145-150.
17. Gu K., Liu W., Han J. et al., 2019. Arsenic and antimony extraction from high arsenic smelter ash with alkaline pressure oxidative leaching followed by Na₂S leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 222, p. 53-59.
18. Gu K., Li W., Han J. et al., 2019. Arsenic removal from lead-zinc smelter ash by NaOH-H₂O₂ leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 209, p. 128-135.
19. Li G., Jirong L., Yaguang D. et al., 2020. Microwave-enhanced selective leaching of arsenic from copper smelting flue dusts. *J Hazard Mater*, Vol. 386, Article 121964.
20. Cheng R., Zhang H., Ni H., 2019. Arsenic removal from arsenopyrite-bearing iron ore and arsenic recovery from dust ash by roasting method. *Processes*, № 7, Vol 754, 12 p.
21. Tan C., Li L., Zhong D. et al., 2018. Separation of arsenic and antimony from dust with high content of arsenic by a selective sulfidation roasting process using sulfur. *Trans Nonferrous Metals Soc. China*, № 28, p. 27-35.
22. Польшкин С.И., Лаптев С.Ф., 1974. *Обогащение оловянных руд и россытей*. Москва: Недра, 480 с.

References

1. GOST R59138. Kонтсентрат оловянный. Tekhnicheskie usloviya, 2020, 13 p. [Tin concentrate. Technical specifications, 2020, 13 p.] URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/752/75274.pdf?ysclid=mbyxqp3j4u351570115> (data obrashcheniya: 6.06.2025).
2. PAO "Rusolovo" [PJSC Rusolovo]. URL: <https://rus-olovo.ru/company/ork/about/> (data obrashche-niya 20.04.2025).
3. Doroshenko E.M., Rasskazova A.V., 2024. Perspektivnye napravleniya povysheniya kachestva kompleksnykh olovяnykh kontsentratov [Promising areas for improving the quality of complex tin concentrates]. Sbornik konferentsii "Plaksinskie chteniya – 2024", Apatity, P. 79-82 doi: 10.37614/978-5-91137-523-2.
4. Liao X., Chen Y., Chen J., 2022. Application of macromolecular organic polymer S-7261A in arsenic removal by flotation of refractory mixed copper ore. *Minerals Engineering*, Vol. 182, Article 107560.
5. Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B., 2019. Razrabotka metoda selektivnoi flotatsii sulfidov sur'my i mysh'yaka pri obogashchenii kompleksnykh zoloto-soderzhashchikh rud [Developing a method for selective flotation of antimony and arsenic sulfides in the processing of complex gold-bearing ores]. *Tsvetnye metally*, № 4, P. 6-12. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.01.
6. Zhen Yang, Tongda Deng, Huan Luo, Xianjun Lei, Baoqiang Xu, Wenlong Jiang, Bin Yang, 2024. Removal of arsenic and recovery of tin from arsenic-containing multi-metallic materials by vacuum reduction roasting. *Vacuum*, Vol. 226, Article 113332.

7. Lebedev B.N., Avdyukov V.I., Vladimirov V.P., 1974. Kombinirovannye i spetsial'nye metody obogashcheniya i pererabotki poleznykh iskopaemykh [Combined and special methods of enrichment and processing of useful minerals]. Ucheb. posobie dlya studentov spetsial'nosti "Obogashchenie poleznykh iskopaemykh". Alma-Ata, 204 p.
8. Kopylov N.I., 2012. Problema mysh'yakosoderzhashchikh otvalov metallurgii tyazhelykh tsvetnykh metallov i ikh minimizatsii [On the metallurgy problem of arsenic-containing landfills of heavy non-ferrous metals and their minimization]. Khimiya, № 2, P. 31-35
9. Bolatbaev K.H., Naboichenko C.C., Sadykov S.B., 2004. Flotatsionnometal-lurgicheskaya pererabotka trudnoobogatimyykh rud [Flotation and onometallurgical processing of hard-to-enrich ores]. Petropavlovsk: SKGU, 401 p.
10. Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang, 2022. Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, Article 102545. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102545>.
11. Zibin Zuo et al., 2024. Separation of arsenic and antimony: A comprehensive theoretical and experimental study. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 31. pp. 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.069>.
12. Patent SU 1314692 Rossiiskaya Federatsiya, MPK S22V 30/04. Sposob vyshchelachivaniya mysh'yaka iz pirit-arsenopiritnykh zolotosoderzhashchikh kontsentratorov [Patent SU 1314692 Russian Federation, МПК C22B 30/04. A method for leaching arsenic from pyrite-arsenopyrite gold-bearing concentrates] / R.I. Novoselov, M.E. Vakotchenko, L.K. Chuchalin, L.F. Ateeva, A.V. Kostrov, G.I. No-voselova– заявл 05.06.1995, opubl. 10.11.1998 g.
13. Doroshenko E.M., Kim E.D., Rasskazova A.V., Ri E.Kh., 2023. Issledovanie fazovogo sostava promezhutochnogo produkta obogashcheniya s posleduyushchim modelirovaniem sostavov soli kaliya i natriya dlya razlozheniya arsenopirita [Investigation of the phase composition of the intermediate enrichment product with the following modeling of the compositions of potassium and sodium salts for the decomposition of arsenopyrite]. *Voprosy materialovedeniya*, Vol. 114, № 2, P. 113-124.
14. Doroshenko E.M., Rasskazova A.V., Kim E.D., Pan'shin I.O., 2023. Kompleksnoe issledovanie vozdeistviya nitratov kaliya i natriya na arsenopirit v promezhutochnom produkte obogashcheniya [A comprehensive study of the effects of potassium and sodium nitrates on arsenopyrite in an intermediate enrichment product]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12-2, P. 40-52.
15. Pat. 2081924 Rossiiskaya Federatsiya, MPK S22V 11/00. Sposob udaleniya mysh'yaka iz kontsentratorov blagorodnykh metallov [Pat. 2081924 Russian Federation, МПК C22B 11/00. A method for removing arsenic from concentrates of precious metals] / M.A. Spirtus, V.V. Koblov, A.G. Sitnov, E.M. Timoshenko, V.I. Korsunskii, A.A. Tsvarov – заявл. 23.08.1995, opubl. 20.06.1997.
16. Gurman M.A., Shcherbak L.I., Rasskazova A.V., 2015. Izvlechenie zolota i mysh'yaka iz produktov obzhiga upornykh pirit-arsenopiritovykh kontsentratorov [Extraction of gold and arsenic from firing products of resistant pyrite-arsenopyrite concentrates]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 145-150.
17. Gu K., Liu W., Han J. et al., 2019. Arsenic and antimony extraction from high arsenic smelter ash with alkaline pressure oxidative leaching followed by Na₂S leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 222, p. 53-59.

18. Gu K., Li W., Han J. et al., 2019. Arsenic removal from lead-zinc smelter ash by NaOH-H₂O₂ leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 209, p. 128–135.
19. Li G., Jirong L., Yaguang D. et al., 2020. Microwave-enhanced selective leaching of arsenic from copper smelting flue dusts. *J Hazard Mater*, Vol. 386, Article 121964.
20. Cheng R., Zhang H., Ni H., 2019. Arsenic removal from arsenopyrite-bearing iron ore and arsenic recovery from dust ash by roasting method. *Processes*, № 7, Vol 754, 12 p.
21. Tan C., Li L., Zhong D. et al., 2018. Separation of arsenic and antimony from dust with high content of arsenic by a selective sulfidation roasting process using sulfur. *Trans Nonferrous Metals Soc. China*, № 28, p. 27–35.
22. Pol'kin S.I., Laptev S.F., 1974. Obogashchenie olovyannykh rud i rossypei [Enrichment of tin ores and placers]. Moscow: Nedra, 480 p.