



ПОЛИМЕТАЛЛ

Производственные и методические аспекты геологоразведочных работ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

ДЕКАБРЬ 2023

#14

Тема номера:

Идеи и территории



Верховская Яна Ивановна, кандидат технических наук, VerhovskayaYI@alrosa.ru, научный руководитель — главный специалист

Саенко Павел Игоревич, SaenkoPI@alrosa.ru, заведующий комплексным отделом сепараторов

Маслов Виктор Николаевич, кандидат физико-математических наук, MaslovVN@alrosa.ru, Научный руководитель — главный специалист

Каштанов Илья Егорович, KashtanoviE@alrosa.ru, Инженер

АО «ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР «БУРЕВЕСТНИК»

Оценка разделения серебросодержащей руды месторождения Обоха рентгено-абсорбционным методом

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования серебросодержащей руды месторождения Обоха для технической оценки обогатимости методом рентгено-абсорбционной сепарации на минеральном сепараторе РГС-6А, производства ИЦ «Буревестник». Установлено, что выборка, отобранная для изучения обогатимости серебросодержащих руд месторождения Обоха, является особо контрастной по содержанию Ag. Разработан признак разделения рентгено-абсорбционным методом, который основан на ослаблении потока рентгеновского излучения аргентотетраэдритом, галенитом, церусситом, с которыми связано серебро.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Рентгено-абсорбционный метод, обогащение, сепарация, минеральное сырье, серебряные руды, рентгено-радиометрический метод, рентгено-дифракционный анализ, рентгено-флуоресцентный анализ, рентгено-фазовый анализ.

Введение

Российская Федерация по запасам серебра занимает второе место в мире, а по рудничному производству — четвертое, и входит в пятерку крупнейших продуцентов серебра, обеспечивая около 6% его мирового производства. Основу сырьевой базы серебра составляют как руды собственных серебряных месторождений, так и в составе комплексных серебросодержащих руд, главными полезными ископаемыми которых являются золото или цветные металлы (медь, свинец, цинк, никель и др.) [1].

По данным Роснедра [2] на осень 2023 года имеется 9329 лицензии на геологическое изучение недр, включающее разведку и добычу, поиск и оценку месторождений благородных металлов в Российской Федерации (рис. 1а), в т. ч. 49 целевых лицензий по разведке и добыче золота и серебра (рис. 1б). Нарастание минерально-сырьевой базы и интенсификация геологоразведки, в том числе в Якутии, позволило в 2022 году открыть еще 130 месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе золотосеребряных месторождений [3].

Несмотря на то, что по данным Росстата [4] в 2023 году отмечается общий спад объема горнодобывающей промышленности (в августе 2023 на 1,2%), наблюдается тенденция существенного увеличения объемов переработки различных видов руд за счет введения технологического оборудования для рентгено-абсорбционной сепарации, которое позволяет уменьшить объемы добычи руды и существенно увеличить извлечение полезного продукта при переработке даже при невысоком содержании драгоценных металлов в исходной руде. Примером может служить деятельность компании Silver Bear Resources, которая нара-

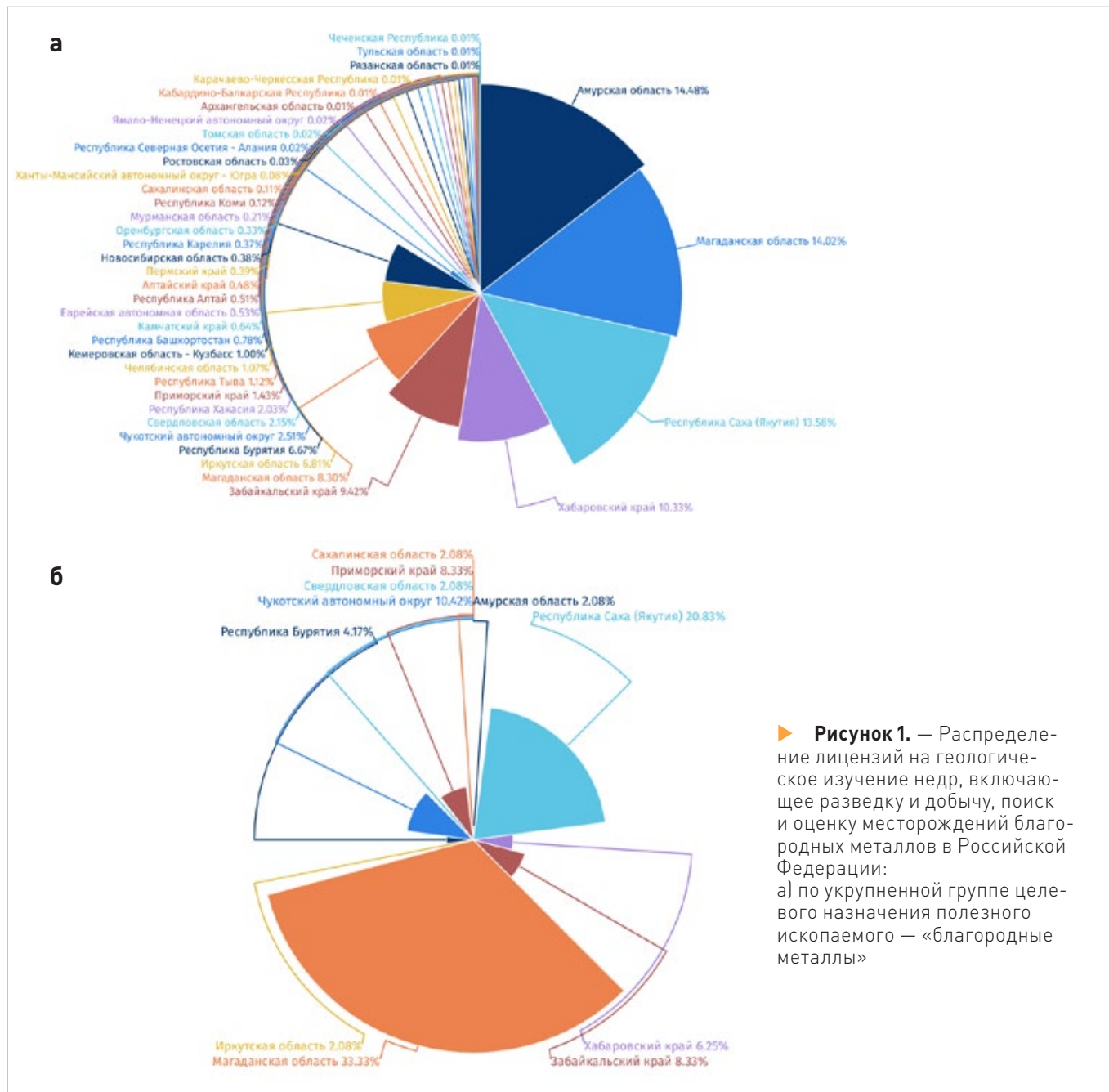
стила добычу серебра в 2021 году на 22% в Якутии за счет увеличения объемов переработки руды на 9% при полном вводе технологического оборудования для рентгено-абсорбционной сепарации [5]. Silver Bear Resources Plc через свою дочернюю компанию АО «Прогноз» в 2021 году владел лицензиями на разработку ряда месторождений в рамках Мангазейского проекта в Кобяйском районе Якутии: Вертикальное, Нижний Эндыбал, Северный и Южный Мангазейский и другие, рудопроявления которых характеризуются галенитовыми жилами и рудными зонами [6].

Таким образом, для оценки возможности извлечения полезного компонента серебросодержащей руды на этапе предварительного обогащения на месторождении, проведено исследование методом рентгено-абсорбционной сепарации, которые позволят значительно сократить логистические издержки при перевозке руды.

2. Материалы и методы

2.1. Краткая характеристика рудопроявления месторождения Обоха

Рудопроявление Обоха [7], относящееся к перспективной Томпо-Делининской сереброносной зоне, расположено в 18 км к северу от пос. Тополинный в Нижнеимнеканском рудном узле (бассейн руч. Обоха, левый приток р. Имнекан). В 30 км восточнее расположены богатые серебряные проявления Хачакчанское, Ночное, Холоднинское и др. В геологическом строении рудного узла принимают участие отложения, представленные чередованием аргиллитов, алевролитов и песчаников, смятых в линейную складку — Тальскую антиклиналь [8].



► **Рисунок 1.** — Распределение лицензий на геологическое изучение недр, включающее разведку и добычу, поиск и оценку месторождений благородных металлов в Российской Федерации:
а) по укрупненной группе целевого назначения полезного ископаемого — «благородные металлы»

Основные рудо локализирующие структуры имеют северо-восточную ориентировку и субвертикальное падение, представлены минерализованными зонами дробления, брекчирования и смятия. Всего известно около двадцати минерализованных зон, несколько из них вскрыты единичными канавами. Зоны мощностью 5–28 м трассируются по простиранию высыпками и развалами кварц-карбонатного материала на 1,5–2 км. Протяженность наиболее детально изученной зоны «Ирника» составляет 1,5 км. Минерализованные зоны сложены кварц-карбонатными прожилками с серебро-сульфосольной, реже галенитовой минерализацией с гнездами блёклой руды и пи-раргирита. Из вторичных минералов отмечаются малахит, азурит, церуссит и др. Общее содержание рудных минералов в прожилках до 60%. Сереброносность блёклой руды меняется от 5,31% до 11,54% в существенно галенитовых рудах и от 21,14 до 23,92% — в пираргиритовых [9]. Обобщенные данные основного минерального состава месторождения Обоха представлены в таблице 1.

2.2. Краткая характеристика исследуемой серебро-содержащей руды

Предметом исследования являлась выборка серебросодержащей руды в количестве 100 образцов класса крупности -50+20 мм, полученного после дробления и грохочения исходного материала технологической пробы Тех.2021-9, состоящей из двух частей:

1. Первая часть отобрана из рудной зоны Ирника, участок Восток. Материал отобран из канавы К-219, интервал 11,0–15,5 м. Средневзвешенное содержание серебра по бороздовым пробам в этом интервале составляет 21 629 г/т (по данным опробования 2020 года). Высокое содержание серебра в интервале обусловлено наличием прожилков и линз мощностью до 5 см кварц-пираргиритовых и галенит-блеклорудно-пираргиритовых агрегатов. Проба отбиралась равномерно по всему интервалу. Ожидаемое содержание серебра 2000–3000 г/т.

2. Вторая часть отобрана из рудной зоны Александровская, участок Запад. Материал отобран из траншеи ТР-1,

► Таблица 1. Основной минеральный состав месторождения Обоха [10]

Минерал	Химическая формула	Содержание серебра, %	Плотность, г/см ³
Аргентит (акантит)	Ag ₂ S	87,1	7,2-7,4
Миаргирит	AgSbS ₂	36,72	5,1-5,3
Пираргирит	Ag ₃ SbS ₃	59,76	5,77-5,86
Стефанит	Ag ₅ SbS ₄	68,3	6,24-6,32
Прустит	Ag ₃ AsS ₃	65,4-67,6	5,6
Полибазит	[Ag, Cu] ₁₆ Sb ₂ S ₁₁	62,1-74,9	6,27-6,33
Штроемерит	CuAgS	53,0	6,15-6,3
Блеклые руды	[Cu ₁₊ , Ag] ₁₀ [Zn, Fe ²⁺ , Cu ²⁺ , (Cu ₁₊₊ +Fe ³⁺)/2, Hg, Cd, Pb, Mn] ₂ [As, Sb] ₄ S ₁₃	до 23,92	5,05
Церуссит	(Pb,Ag)CO ₃	изоморфная примесь	6,56
Галенит	(Pb,Ag)S	изоморфная примесь	7,68
Кварц	SiO ₂	-	2,6- 2,65
Лимонит	FeOOH·(Fe ₂ O ₃ ·nH ₂ O)	-	3,3-3,9
Азурит	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	-	3,76
Малахит	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	-	4,3
Марматит, сфалерит	(Zn,Fe)S	-	3,9- 4,1
Карбонат (преимущественно сидерит)	(Fe,Mg)CO ₃	-	3,96
Мусковит	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	-	2,76 — 3,10

между линиями 7-9. Средневзвешенное содержание серебра по бороздовым пробам в этом интервале составляет 275 г/т (по данным опробования 2020 года). Среднее содержание серебра ожидается на уровне 800-1000 г/т, так как при отборе в пробу попало значительное количество галенит-блеклорудного прожилка.

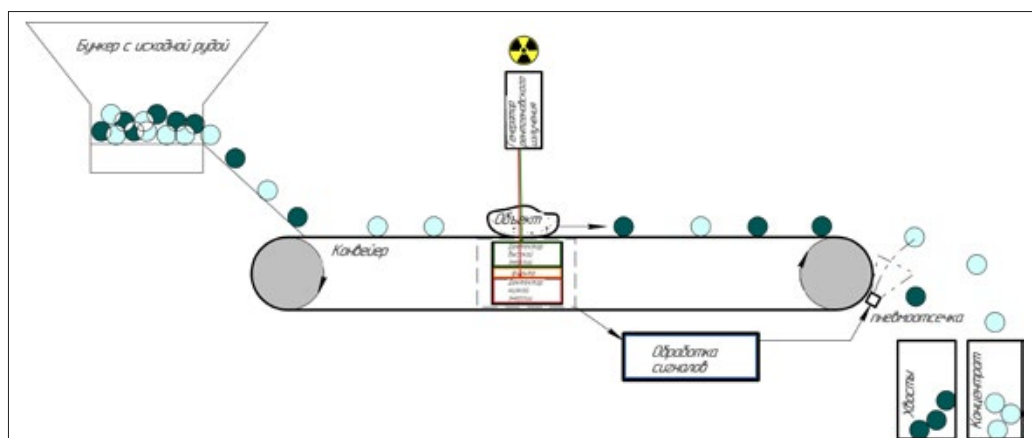
Материал пробы: кварцевые песчаники, массивные, мелко-среднезернистые, серые, с кварц-карбонатным прожилкованием. Жильные минералы представлены в основном мусковитом и кварцем. Рудные минералы — галенит, блеклые руды (аргентотетраэдрит), пираргирит, церуссит, аргентит (акантит).

2.3. Краткая характеристика методов исследования серебрясодержащей руды

На первом этапе исследования серебрясодержащей руды месторождения Обоха для каждого куска руды выполнен макроскопический анализ образцов для оценки минерального состава породы. Проведена оценка физических свойств — вес, плотность, цветовых характеристик. Далее выполнен

рентгено-абсорбционный анализ на аппаратном комплексе Полус-В (рис. 2), производства ИЦ «Буревестник», включающий двух-энергетическую систему регистрации, для оценки размеров рентгеноплотных включений, их распределения и интенсивности поглощения рентгеновского излучения на рентгеновских изображениях с помощью программных пакетов X-View2, ImageJ_64. Также проведен сопоставительный анализ полученных результатов с теоретическими расчетами, полученными в программе ХОР 2.3. Далее проведен анализ с помощью разработанного алгоритма MD на программном обеспечении ИЦ «Буревестник» для обработки данных цифрового изображения образца руды.

Метод рентгеновской абсорбции, в англоязычной литературе известный как метод рентгеновской трансмиссии X-Ray Transmission (XRT- метод), не требует особой подготовки сырья в виде операций промывки и очистки поверхности кусков от грязи, пыли и шламовых плёнок. Рентгено-абсорбционный метод является проникающим, и позволяет распознавать в куске породы скрытую минерализацию (рис. 2).



► Рисунок 2. Общий принцип работы рентгено-абсорбционного сепаратора

В общем виде, принцип работы рентгено-абсорбционного метода можно представить следующим образом: чем выше атомный номер элементов, входящих в состав минералов и горных пород, тем меньшее количество рентгеновских лучей пройдет сквозь данный материал. Величина ослабления интенсивности рентгеновского излучения материалом зависит от атомного номера вещества объекта, толщины куска и энергии квантов рентгеновского излучения.

Принцип регистрации и оценки при рентгено-абсорбционном анализе состоит в том, что регистрируется рентгеновское излучение, прошедшее через куски минералов и горных пород на сцинтилляционном детекторе. Детектор преобразует энергию рентгеновского излучения, прошедшее сквозь куски руды, в импульсы тока, которые усиливаются и записываются регистрационной системой. Полученные результаты оцифровываются, переводятся в графический вид в виде растровых графических изображений (TIFF) в 256 градациях серого (RGB) с глубиной цвета 16 бит и обрабатываются программным обеспечением автоматизированной системы управления по специальному алгоритму, разработанному в ИЦ «Буревестник». Далее они сравниваются со значениями заданного порога разделения, после чего проводится анализ и расчет отношения площади полезного компонента к общей площади куска руды на рентгеновском изображении. В настоящем исследовании искомыми компонентами приняты аргентит (акантит), пираргирит, миаргирит, стефанит, прустит, полибазит и блеклые руды, а также галенит и церуссит, т.к. минералы свинца содержат изоморфные примеси серебра.

На втором этапе исследования, с целью выяснения особенностей изоморфных замещений в минералах и полуколичественного определения минерального состава, проведен анализ проб методом рентгено-дифракционного анализа на дифрактометре ДРОН-8 производства ИЦ «Буревестник». Результаты рентгенофазового анализа получены в виде соответствующих дифрактограмм, анализ которых выполнялся на программном обеспечении Crystallography and diffraction analysis, разработанном ИЦ «Буревестник». Далее проведен рентгено-флуоресцентный анализ образцов серебросодержащей руды с пробоподготовкой на аппаратном комплексе энергодисперсионного спектрометр-анализатора БРА-135 зав.№1, производства ИЦ Буревестник, на трех режимах работы для определения легких, средних и тяжелых химических элементов для уточнения химического состава.

На третьем этапе исследования проведен химический анализ для количественного определения основных химических элементов в пробах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной после мультикислотного разложения, а также для определения количественного содержания серебра в пробах, в которых по итогам АЭС выявлено аномальное содержание серебра, проведен пробный анализ с гравиметрическим окончанием.

► **Таблица 2.** Степень различия минералов основного компонента по отношению к минералам вмещающей породы при двухэнергетической системе регистрации прошедшего рентгеновского излучения

		Энергии	Минералы основного компонента					
			Аргентит (акантит)	Миаргирит	Полибазит	Пираргирит	Блеклые руды	Галенит
Минералы вмещающих пород	Марматит, Сфалерит	на низкой энергии	55%	37%	24%	24%	23%	57%
		на высокой энергии	38%	24%	15%	15%	14%	40%
	Сидерит	на низкой энергии	57%	40%	27%	27%	26%	59%
		на высокой энергии	40%	26%	17%	17%	16%	41%
	Лимонит, Азурит, Малахит	на низкой энергии	59%	43%	31%	31%	29%	61%
		на высокой энергии	41%	28%	19%	19%	18%	43%
	Кварц	на низкой энергии	72%	61%	53%	53%	52%	73%
		на высокой энергии	52%	41%	34%	34%	34%	54%

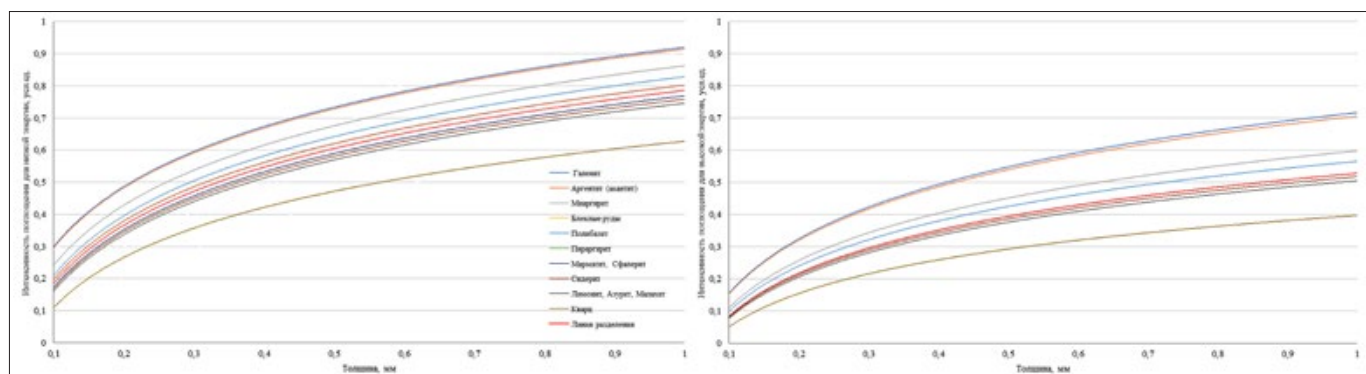
3. Результаты и обсуждения

На первом этапе проведен теоретический расчет интенсивности поглощения рентгеновского излучения для каждого минерала из таблицы 2 при двухэнергетическом детектировании, а также для получения сравнительной характеристики контрастности [11] полезных компонентов по отношению к вмещающим породам (рис. 3), которое рассчитывается как отношение интенсивностей поглощения рентгеновского излучения полезного продукта к вмещающей породе.

Результаты расчета показали разделение минералов серебросодержащих руд на две группы:


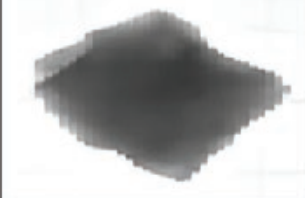

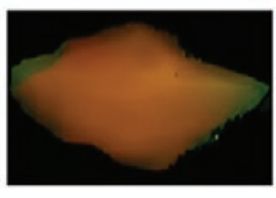
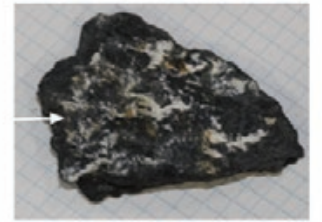

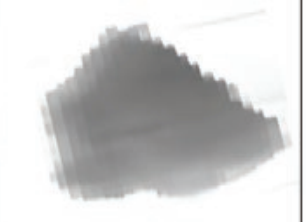
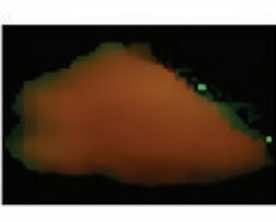



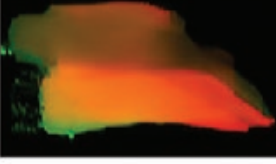



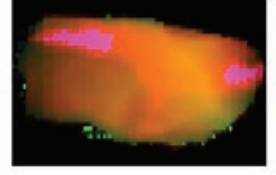
► Первая группа, включающая основные полезные компоненты: аргентит (акантит), полибазит, пираргирит, а также галенит, церуссит и блеклые руды.

► Вторая группа, включающая вмещающие породы: кварц, мусковит, марматит, сфалерит, сидерит, лимонит, азурит, малахит.



► **Рисунок 3.** Теоретические расчеты интенсивности поглощения рентгеновского излучения минералами серебросодержащей руды

► **Таблица 3.** Фото и рентгенограммы представительных образцов выборки серебросодержащей руды месторождения «Обоха»

№ обр	Фото образцов	Рентгенографическое изображение		Результат обработки
		на канале низкой энергии	на канале высокой энергии	
1				
2				
9				
23				

Таким образом, получена теоретическая оценка признака разделения по степени различия минералов основного компонента — первой группы — по отношению к минералам вмещающей породы — второй группы — при двухэнергетической системе регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через куски серебросодержащей руды. Результаты, представленные в таблице 2, показали, что при двухэнергетической системе регистрации минимальным значением контрастности на низкой и высокой энергии, 24% и 15% соответственно, выявлено у полибазита и пираргирита по отношению к марматиту и сфалериту.

С целью разработки признака разделения на первом этапе работы, а именно качественного и количественного разделения серебросодержащей руды по соотношению площадей полезного продукта и вмещающей породы, были отобраны представительные куски руды, на поверхности которых присутствуют различные минеральные разности, которые анализировались аппаратурой признака разделения. Отобраны образцы с наибольшей (образцы №9 и №23 с сульфидными минералами на поверхности куска) и наименьшей поглощающей способностью (образцы №1 и №2, представленные с типичной вмещающей породой). С применением этих образцов по методике и алгоритму, разработанному в ИЦ «Буревестник», разрабатывались признаки разделения для алгоритма MD, который позволяет идентифицировать включения сложных сульфидов (сульфосоли) минералов во вмещающей породе. Далее получены рентгенографические изобра-

жения представительных образцов серебросодержащей руды с различным содержанием рентгеноплотных частиц (табл. 3): № 1– 1,22%, № 2– 0,82%, № 3– 40,90%, № 23– 44,22%.

Для оценки полуколичественного определения минерального состава образцов проведен анализ методом рентгено-дифракционного анализа. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Полученные результаты полуколичественного рентгено-дифракционного анализа подтверждают, что в образцах № 9 и №23 присутствуют свыше 5 масс.% включений рудной минерализации, включающей в себя минералы, отнесенные к первой группе (галенит, церуссит, блеклые руды), имеющих высокую рентгеноплотность, а в образцах № 1 и № 2 — менее 1 масс.%. При этом минеральные включения второй группы (кварц, мусковит, лимонит, карботаты), с низкой рентгеноплотностью, преобладают в бо льшем количестве в образцах № 1 и №2, что естественно, так как вмещающие породы в основном представлены именно ими. Таким образом подтвержден признак — рудная минерализация свыше 5 масс.% —, который является благоприятным фактором для надежного их выделения АСУ сепаратора.

С целью качественного определения в серебросодержащей руде тяжелых химических элементов с атомной массой свыше 50, которые оказывают значительное влияние при рентгено-абсорбционной сепарации, проведен рентгено-флуоресцентный анализ, результаты которого представлены на рисунке 4.

► **Таблица 4.** Результаты рентгено-дифракционного анализа образцов серебросодержащей руды месторождения «Обоха»

	Минеральный состав		Содержание, масс. %	Содержание аморфной фазы, %
	Название	Формула		
23	Кварц	SiO ₂	40	8
	Тетраэдрит	(Cu,Ag,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	29	
	Гетит	(Fe,Sn)OOH	23	
	Галенит	Pb(S,Se)	1.5	
	Мусковит	KAl ₂ [Si ₃ Al]O ₁₀ (OH) ₂	6.5	
9	Кварц	SiO ₂	42	15
	Церуссит	PbCO ₃	6.5	
	Тетраэдрит	(Cu,Ag,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	1.5	
	Гетит	(Fe,Sn)OOH	14	
	Галенит	Pb(S,Se)	1.5	
	Мусковит	KAl ₂ [Si ₃ Al]O ₁₀ (OH) ₂	33.5	
2	Кварц	SiO ₂	55	13
	Анкерит	Ca(Fe,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	8.5	
	Тетраэдрит	(Cu,Ag,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	следы	
	Пирит	FeS ₂	0.5	
	Мусковит	KAl ₂ [Si ₃ Al]O ₁₀ (OH) ₂	35.5	
1	Кварц	SiO ₂	63	13
	Тетраэдрит	(Cu,Ag,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	0.2	
	Гетит	(Fe,Sn)OOH	2.5	
	Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2.3	
	Мусковит	KAl ₂ [Si ₃ Al]O ₁₀ (OH) ₂	32	

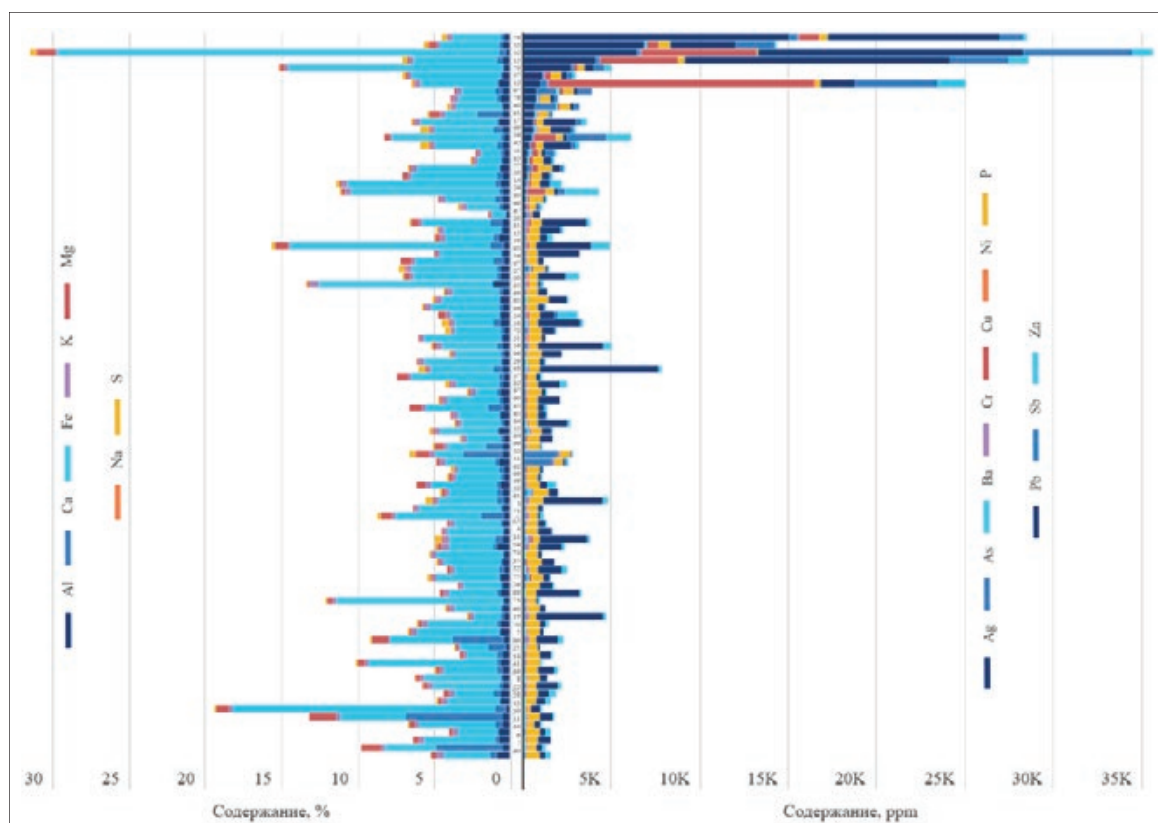
По результатам рентгено-флуоресцентного анализа выделены такие химические элементы как алюминий, кремний, сера, калий, кальций, железо, медь, цинк, свинец, серебро, олово, сурьма, при этом в образцах №1 и №9 выявлена большая доля тяжелых химических элементов.

Таким образом, в образце №1 по результатам рентгено-флуоресцентного анализа выявлены высокие значения серебра, который по данным рентгено-дифракционного анализа входит в состав блеклой руды (аргентотетраэдрит) с масс.% до 0,2, при этом по результатам рентгено-абсорбционного анализа общая совокупность рентгеноплотных минеральных включений составила до 1,2 % от общей площади в проекции, включающих тетраэдрит и гетит.

Образец № 2 является типичным представителем вмещающей породы с общей долей рентгеноплотных включений до 0,85% от общего объема, которые представлены тетраэдритом и пиритом. В образце № 9 по результатам рентгено-флуоресцентного анализа выявлено наибольшее количество тяжелых химических элементов — свинцом, сурьмой, медью и серебром, которые по результатам рентгено-дифракционного анализа представлены церусситом, блеклой рудой, галенитом и гетитом с общим масс.% до 23,5, по результатам рентгено-абсорбционного анализа площадь проекции рентгеноплотных минеральных включений составила до 40,9 %.

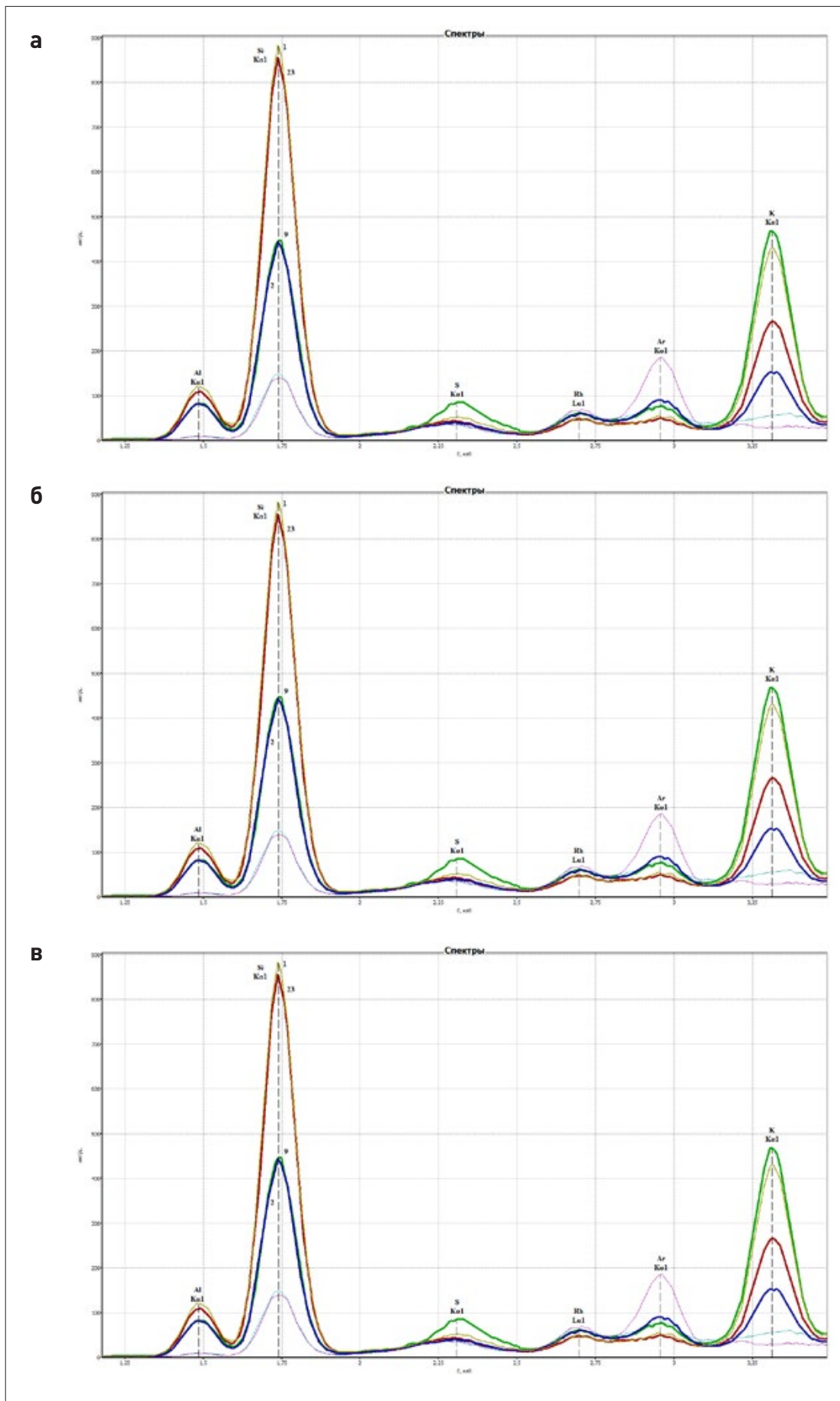
По результатам рентгено-флуоресцентного анализа образец №23 содержит такие тяжелые химические элементы как железо, сурьма, свинец, серебро, входящих в состав рентгеноплотных минералов (тетраэдрит, гетит и галенит) с общей площадью проекции до 44,22% по данным рентгено-абсорбционного анализа.

Для количественного анализа основных химических элементов проведены измерения 94 образцов серебросодержащей руды методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, по результатам которой выявилось 24,4 % образцов с высоким содержанием серебра (более 100 ppm). Результаты представлены на рис. 5.



► **Рисунок 5.**

Результаты количественного состава химических элементов в пробах серебросодержащей руды, полученных методом АЭС с индуктивно связанной плазмой



► **Рисунок 4.** РФА- спектры серебряносодержащей руды месторождения «Обоха»: а — для легкой области, б — для средней области, в — для тяжелой области

Далее проведен анализ корреляционных связей серебра с прочими компонентами остальных кусков выборки, что также свидетельствует о связи серебра со свинцом, который представлен галенитом ($R=0,72$), и сурьмой, представленной тетраэдритом ($R=0,65$).

Для образцов, у которых по результатам АЭС выявлено наименьшее и наибольшее содержание серебра, проведен анализ показателя контрастности ($K'_{\text{п/л}}$) как отношение интенсивностей поглощения рентгеновского излучения полезным продуктом к интенсивности поглощения вмещающей породы. Результаты расчета в программном обеспечении ImageJ представлены на рисунке 7.

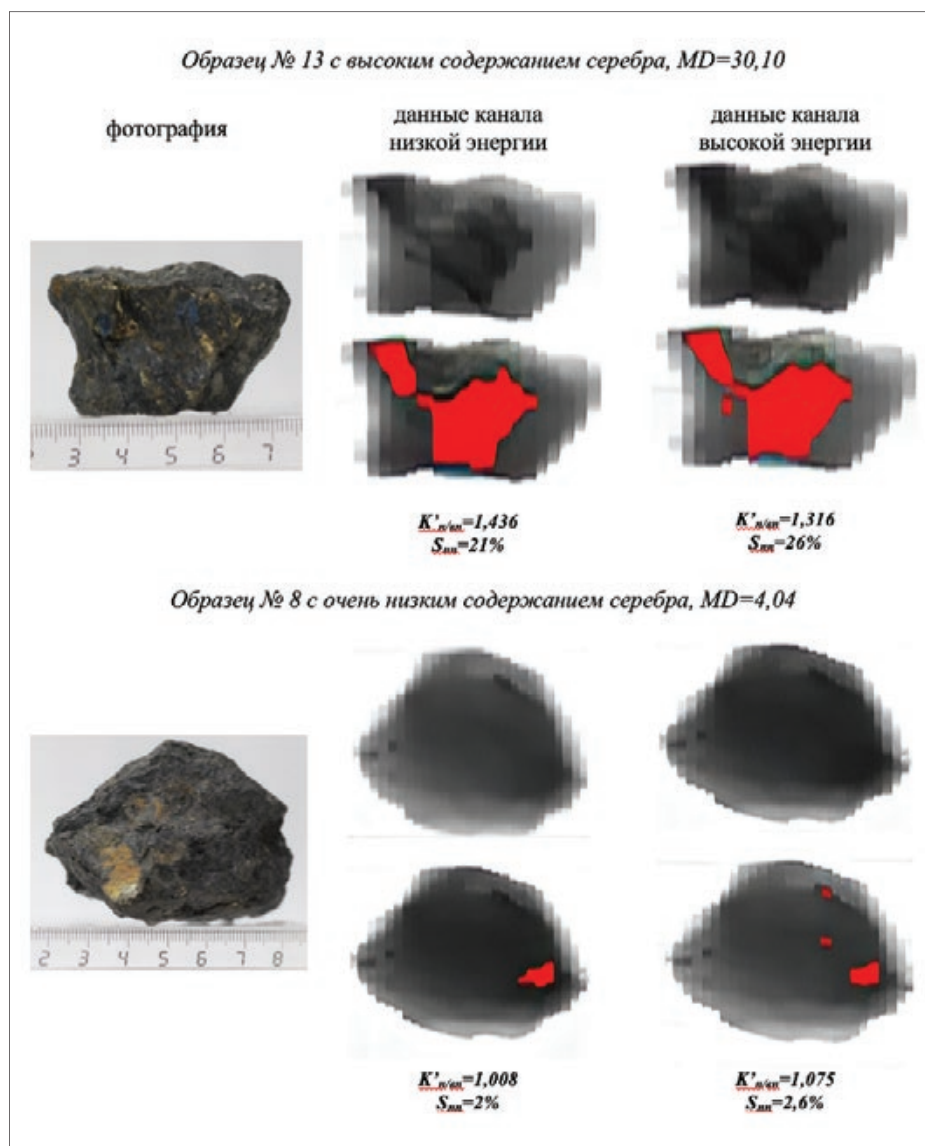
Проведено изучение обогатимости серебросодержащих руд методом рентгено-абсорбционной сепарации и эффективности разработанного признака разделения, которое определяется как максимум средневзвешенного отклонения содержания серебра во фракциях [10], полученных путем последовательной группировки кусков, расположенных в порядке возрастания признака разделения, от среднего содержания ценного компонента в руде, а эффективность признака разделения рассчитывается как отношение показателя признака разделения к показателю контрастности.

Фракционирование выборки образцов по параметру признака разделения MD показало потенциальную возможность получения 52,1 % отвальных хвостов, содержащих

66,3 г/т серебра при потерях с ними 9,1 % Ag. При этом концентрат содержит 721 г/т серебра. Значение параметра признака разделения, при котором происходит разделение на концентрат и хвосты, составило 1,91. Значение показателя признака разделения составило 1,44, значение эффективности признака разделения, рассчитанное как отношение показателя признака разделения к показателю контрастности, составило 0,88. Отмечается, что некоторая часть серебра теряется во фракциях с низким граничным значением MD, что связано, по-видимому, с попаданием в них кусков с тонкими включениями галенита и тетраэдрита, неидентифицируемыми системой детектирования сепаратора. Содержание серы и железа также растут с возрастанием MD, что объясняется присутствием серы в минералах-индикаторах серебра.

Для оценки эффективности признака MD было принято решение рассчитать выход и количество кусков, ошибочно попавших в концентрат и хвосты. В качестве порогового значения содержания серебра было выбрано пороговое значение содержания, рассчитанное как 3.2 — 525 г/т Ag.

Анализ эффективности разделения выборки показал, что при разделении с использованием признака MD доля ложных кусков в хвостах составила 5,77%, при этом количественно выход истинных хвостов при использовании признака MD составляет 59,04%. Это также свидетельствует о высокой эффективности признака разделения MD.



► **Рисунок 7.** Образцы с высоким и с очень низким содержанием серебра

4. Заключение

Объектом исследования являлась выборка в количестве 100 образцов, отобранных от технологической пробы Тех.2021-9. Выборка отбиралась от класса крупности -50+20 мм, полученного после дробления и грохочения исходного материала пробы Тех.2021-9.

Фракционирование выборки по содержанию серебра показало потенциальную возможность получения 91 % отвальных хвостов, содержащих 40,7 г/т Ag при потерях с ними 9,7 % Ag. При этом концентрат содержит 3791,53 г/т Ag, он обогащен в 10 раз по сравнению с исходной выборкой. Выборка резко контрастна по содержанию Ag, значение показателя контрастности составило 1,64.

С целью разработки признака разделения были отобраны образцы с наибольшей и наименьшей рентген-абсорбционной способностью. С применением этих образцов по методике и алгоритму, разработанному в ИЦ «Буревестник», разрабатывался признак разделения для идентификации включений минералов сложных сульфидов (сульфосоли) и вмещающих пород. Дополнительно проведенными РФА- и РД-измерениями установлено, что образцы с наибольшей поглощательной способностью имеют в своем составе железо, медь, сурьму и свинец, входящих в состав галенита и тетраэдрита, которые являются минералами-индикаторами серебра. Это подтверждается анализом корреляционных связей серебра со свинцом, который представлен галенитом ($R=0,72$), и сурьмой, представленной аргенто-тетраэдритом ($R=0,65$).

Фракционирование выборки образцов показало потенциальную возможность получения 52,1 % отвальных хвостов, содержащих 66,3 г/т серебра при потерях с ними 9,1 % Ag. При этом концентрат содержит 721 г/т серебра. Значение параметра признака разделения, при котором происходит разделение на концентрат и хвосты, составило 1,91. Значение показателя признака разделения составило 1,44, значение эффективности признака разделения, рассчитанное как отношение показателя признака разделения к показателю контрастности, составило 0,88.

Количественный анализ эффективности разделения выборки показал, что при разделении доля концентратных кусков в хвостах составила 5,77 %, что также свидетельствует о высокой эффективности признака разделения, которым является рентгено-абсорбционный метод.

Таким образом, с учетом полученных результатов исследования серебросодержащей руды месторождения Обоха, рентгено-абсорбционный метод сепарации, реализованный на минеральном сепараторе РГС-6А производительностью до 160 т/ч с возможностью загрузки кусков руды от 10 до 100 мм, производства ИЦ «Буревестник», позволяет существенно увеличить показатели извлечения полезного компонента на этапе предварительного обогащения исходной руды за счет включения его в цепочку технологического процесса).

5. Список литературы

1. Роснедра, Минприроды России Серебро [В Интернете] // Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. — 2022 г. — 01 06 2023 г. — <https://gd2021.data-geo.ru/pmd/ag/>.
2. Роснедра Государственный реестр участков недр, предоставленных в пользование, и лицензий на пользование недрами [В Интернете] // Государственный реестр участков недр, предоставленных в пользование, и лицензий на пользование недрами. — 02 10 2023 г. — 02 10 2023 г. — <https://rfgf.ru/ReestrLic/>.
3. Минприроды России Разведка и добыча: Александр Козлов обсудил с Айсенем Николаевым развитие отрасли недропользования в Якутии [В Интернете]. — 19 04 2023 г. — 01 06 2023 г. — https://mnr.gov.ru/press/news/razvedka_i_dobycha_aleksandr_kozlov_obsudil_s_aysenom_nikolaevym_razvitie_otrasli_nedropolzovaniya_v/?sphrase_id=641490.
4. Take-profit.org РОСТ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РОССИИ [В Интернете] // Биржевой портал № 1. — 2023 г. — 21 09 2023 г. — <https://take-profit.org/statistics/mining-production/russia/>.
5. Silver Bear Resources Финансовые отчеты [В Интернете] // Silver Bear Resources. — 2023 г. — 21 09 2023 г. — <https://silverbearresources.com/investors/financial-reports/>.
6. ГУП Сахагеоинформ Silver Bear Resources нарастил добычу серебра на 22% в Якутии [В Интернете] // Геологический информационный фонд Якутии. — ГУП Сахагеоинформ, 12 04 2021 г. — 21 09 2023 г. — <http://ginfors.ru/geonews/russianews/505-silverbear-resources-narastil-dobychu-serebra-na-22-v-yakutii.html>.
7. Роснедра Карточка объекта № 98-20-2282. Проект работ по геологическому изучению недр [В Интернете] // Государственный реестр работ по геологическому изучению недр. — 2023 г. — 15 05 2023 г. — <https://rfgf.ru/ReestrLicPage/348624>.
8. **Костин А. В. и Денисов Г. В.** Крупные благороднометалльные рудно-магматические системы Западного Верхоянья [Журнал]. — [б.м.]: Отечественная геология, 2007 г. — 5. — стр. 17-25.
9. **Костин А. В. [и др.]** Проявление Обоха — новый сереборудный объект мирового класса Восточной Якутии [Журнал]. — [б.м.]: Отечественная геология, 2012 г. — 5. — стр. 21-27.
10. ФГУ ГКЗ Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений [Книга]. — Москва: [б.н.], 2007.
11. Изучение гранулометрического состава и контрастности полезных ископаемых для оценки возможности их обогащения с помощью радиометрических методов. Методические рекомендации. М., НСОМТИ Мингео СССР, 1978