

*А. К. Салчак<sup>1,2</sup>, В. И. Ростовец<sup>1\*</sup>*

## **Совершенствование рудоподготовки и обогащения полиметаллических руд на основе комбинации рентгенорадиометрической сепарации и флотации**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Обогатительная фабрика ООО «Лунсин», г. Кызыл, Республика Тыва,  
Российская Федерация

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Аннотация.** В связи с необходимостью развития минерально-сырьевой базы России в переработку все в большей степени вовлекаются бедные, труднообогатимые и упорные руды, в том числе и полиметаллические. Из-за сложного их минерального состава и несовершенства добычных и обогатительных технологий на предприятиях уровень потерь ценных компонентов достигает 20 и более %. Совершенствование технологических процессов переработки природного и техногенного минерального сырья является актуальной задачей. Цель исследований: обоснование применения комбинированной технологии переработки полиметаллической руды, обеспечивающей повышение технологических показателей при одновременном снижении себестоимости получения товарной продукции и улучшении экологической обстановки на предприятии. При выполнении работы использованы минералогический, флотационный, ситовый, рентгенорадиометрический, химический и другие методы исследований. Установлено, что в оптимальном режиме рентгенорадиометрическое разделение руды позволяет выделить из нее 24.16% крупнокусковых хвостов, содержащих минимальное количество ценных компонентов, и 75.84% концентрата с максимально возможным содержанием цинка 11.62% при его извлечении 97.83%. Это на 22.52% больше, чем извлечение цинка в хвосты медно-свинцовой флотации по существующей технологии. Показано, что использование комбинации рентгенорадиометрической сепарации и флотации повышает технологические показатели по переработке руды с одновременным снижением себестоимости товарной продукции из-за снижения нагрузки на основное технологическое оборудование и сокращением сбросов тонкоизмельченного материала в хвостохранилище обогатительной фабрики за счет предварительного удаления из руды 24.16% пустой породы в виде крупных кусков.

**Ключевые слова:** полиметаллические руды, совершенствование переработки, предварительное обогащение, комбинирование технологических процессов рентгенорадиометрической сепарации и флотации, снижение себестоимости товарной продукции, улучшение экологической обстановки на предприятии

*А. К. Salchak<sup>1,2</sup>, V. I. Rostovtsev<sup>1\*</sup>*

## **Improvement of ore preparation and enrichment of polymetallic ores based on a combination of X-ray radiometric separation and flotation**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup>Lunsin" LLC Enrichment plant, Kyzyl, Republic of Tyva,  
Russian Federation

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Abstract.** Due to the need to develop the mineral resource base of Russia, poor, hard-to-enrich and stubborn ores, including polymetallic ores, are increasingly involved in processing. Due to their complex mineral composition and imperfections of mining and processing technologies at enterprises, the loss rate of valuable components reaches 20% or more. Improving the technological processes of processing natural and man-made mineral raw materials is an urgent task. The purpose of the research is to substantiate the use of a combined technology for processing polymetallic ore, which provides an increase in technological indicators while reducing the cost of obtaining marketable products and improving the environmental situation at the enterprise. Mineralogical, flotation, sieve, X-ray radiometric, chemical and other research methods were used in the performance of the work. It has been experimentally established that in the optimal mode, X-ray radiometric separation of ore makes it possible to isolate from it 24.16% of coarse tailings containing the minimum amount of valuable components and 75.84% of concentrate with the maximum possible zinc content of 11.62% when it is extracted 97.83%. This is 22.53% more than the extraction of zinc into the tailings of copper-lead flotation using the existing technology. It is shown that the use of a combination of X-ray radiometric separation and flotation increases the technological indicators for ore processing with a simultaneous reduction in the cost of commercial products due to a reduction in the load on the main technological equipment and a reduction in discharges of finely ground material into the tailings of the processing plant due to the preliminary removal of 24.16% of the waste rock from the ore in the form of large pieces.

**Keywords:** polymetallic ores, refining improvement, pre-enrichment, combination of technological processes of X-ray radiometric separation and flotation, reducing the cost of commercial products, improving the environmental situation at the enterprise

### *Введение*

В настоящее время для горнорудной промышленности большинства стран характерны общие закономерности. Богатые месторождения практически отработаны, а перерабатывать традиционными методами бедные и забалансовые руды экономически невыгодно. Следует отметить что все меньше остается легкообогащаемых руд и все чаще приходится вовлекать в переработку труднообогащаемые и упорные руды. В связи с этим из-за экономических и технологических преимуществ предварительное обогащение должно стать и уже является неотъемлемой частью общей технологии добычи и переработки полезных ископаемых и разных техногенных образований [1].

Одним из эффективных методов, позволяющих получать качественные концентраты из такого минерального сырья, является флотация. При этом важным фактором, определяющим эффективность флотационного процесса, является размер свободных зерен минеральных частиц. Например, расширение диапазона крупности частиц во флотационной пульпе до 0.1 – 0.3 мм может дать экономию 30 – 50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоемком переделе обогащения – процессе измельчения [2].

В [3] указывается, что для процессов селективной дезинтеграции в ряде стран с целью создания дефектов на границе срастания минералов разрабатываются энергетические методы воздействия на минеральное сырье (СВЧ, мощные наносекундные импульсы и т.д.). Среди указанных перспективным является воздействие потоком ускоренных электронов на минеральное сырье [4-5]. Радиационные технологии определены мировым сообществом как потенциально про-

рывные в различных областях промышленного производства. В настоящее время радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. Достоинством воздействия ускоренными электронами является наличие отечественного стандартного оборудования для реализации процессов обработки минерального сырья с сохранением или незначительным изменением технологических схем и оборудования обогатительных фабрик [6].

Другим направлением поиска и развития эффективных обогатительных технологий является предварительное обогащение [7-8], в котором могут решаться различные задачи, из них наиболее важной и часто решаемой является задача предварительной концентрации полезных минералов в выделенном продукте. Это обеспечивает целый ряд преимуществ из-за вывода из последующего технологического процесса большей части крупных бедных хвостов. К ним относится снижение затрат на транспортировку, дробление, измельчение и обогащение, уменьшение платежей на эксплуатацию хвостохранилищ, снижение экологической нагрузки предприятий и, в конечном итоге, повышение эффективности горно-обогатительного производства. В последнее время среди используемых методов предварительного обогащения приобретают особое значение информационные методы обогащения [9-12]: радиометрические, рентгенорадиометрические, оптические, рентгенолюминесцентные, фотометрические и др. Наиболее универсальным и востребованным является рентгенорадиометрический метод [13-14].

Рентгенорадиометрическая сепарация – это современная низкочатратная, экологически чистая и наиболее эффективная технология предварительного обогащения руд, которая позволяет повысить качество практически любых руд за счет выделения пустой породы с использованием энергетического воздействия рентгеновским излучением.

Метод основан на облучении кусков руды мягким рентгеновским излучением, которое вызывает от кусков ответное характеристическое излучение элементов. Измерение значения излучения и разделение кусков осуществляется в специальных машинах (сепараторах), позволяющих сортировать минеральное сырье с крупностью кусков от 10 до 300 мм. Рентгеновское излучение проникает внутрь кусков на глубину до 1–2 мм, и поэтому рентгенорадиометрическая сепарация меньше подвержена влиянию загрязненности и зашламованности материала. Поэтому в большинстве случаев не требуется отмывка руды перед сепарацией, что особенно важно для успешной работы в холодных и сухих регионах, таких, например, как Республика Тыва. Этот метод имеет ряд преимуществ перед другими информационными методами. Он имеет относительно высокую чувствительность, что позволяет осуществлять разделение при малых содержаниях компонентов. Данный метод позволяет определять содержания нескольких элементов одновременно и поэтому дает возможность использовать наиболее выгодные алгоритмы сепарации многокомпонентных руд с решением различных технологических задач.

Рентгенорадиометрическая сепарация может быть использована для получения концентратов или для предварительной концентрации медных и медно-цинковых руд [15], свинцово-цинковых руд [16], золотосодержащих руд [17], алмазных [18], марганцевых, хромовых, сидеритовых руд [19], урановых руд [20], кварца [21], полевых шпатов [22], бокситов [23], угля [24] и других видов минерального сырья.

При подземной добыче руд с низким содержанием полезных компонентов часто применяют системы разработки с обрушением, обеспечивающие высокую концентрацию и производительность горных работ, а также низкие затраты на подготовительно-нарезные и очистные работы по сравнению с другими технологиями. Их недостатком является относительно высокий уровень потерь полезных компонентов и разубоживания руды, что отрицательно влияет на ее дальнейшую переработку. В связи с вышеуказанным актуальным и своевременным является проведение исследований по совершенствованию процессов рудоподготовки и обогащения полиметаллических руд с использованием физических и физико-химических воздействий. Цели и задачи исследований настоящей работы заключаются в обосновании применения физических и физико-химических воздействий, обеспечивающих не только снижение себестоимости получения конечной товарной продукции за счет предварительного удаления пустой породы из руды и повышения технологических и технико-экономических показателей флотационного процесса обогащения руды, но и снижение негативного влияния обогатительных предприятий на окружающую среду.

### ***Методы и материалы***

Объектом исследований являлась полиметаллическая руда одного из месторождений Республики Тыва со следующим содержанием основных полезных компонентов в %: свинца – 1.0, цинка – 9.65, меди – 0.70. Для извлечения ценных компонентов из руды предусмотрена технологическая схема обогащения, включающая дробление руды, измельчение и флотационное обогащение; сгущение, фильтрацию и упаковку полученных концентратов, а также сгущение хвостов флотации (отходов переработки). При переработке руды на обогатительной фабрике (ОФ) в качестве товарной продукции получают медный, свинцовый и цинковый концентраты.

Существующей технологией флотации предусматривается коллективная медно-свинцовая флотация, из хвостов которой извлекается цинковый концентрат. Медно-свинцовый концентрат подвергается флотационному разделению на медный и свинцовый концентраты. В табл. 1 приведены результаты медно-свинцовой (Cu-Pb) флотации.

Анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что существующая технология рудоподготовки и обогащения характеризуется низкой эффективностью, так как извлечение цинка (Zn) в концентрат медно-свинцовой флотации составляет 24.69%, а потери свинца (Pb) и меди (Cu) с хвостами Cu-Pb флотации соответственно равны 14.26 и 21.53%. Учитывая, что цинковый (Zn) концентрат получается из хвостов Cu-Pb флотации, то извлечение цинка в концентрат составит порядка 75.0%.

Таблица 1

**Баланс продуктов обогащения в операции основной Cu-Pb флотации  
существующей технологической схемы переработки руды**

Продукт	Выход, % от операции	Содержание, %			Извлечение, %		
		Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
К-т основной Cu-Pb флотации	24.03	8.547	8.820	2.327	24.69	85.74	78.47
Хвосты основной Cu-Pb флотации	75.97	8.245	0.464	0.202	75.31	14.26	21.53
Питание осн. Cu-Pb флотации	100.00	8.318	2.472	0.712	100.00	100.00	100.00

Низкие показатели по извлечению металлов в концентраты несмотря на достаточно тонкое измельчение, достигающее 90-95% класса -44 мкм, связано с минералогическими особенностями руды, характеризующимися ее трудной обогатимостью и упорностью.

Главными рудными минералами полиметаллических руд являются сфалерит, галенит, халькопирит, и пирит; второстепенными – теннантит, реже тетраэдрит и эпизодически золото (электрум) и минералы серебра – карвеллеит ( $Ag_4TeS$ ), акантит ( $Ag_2S$ ) [25]. Из нерудных минералов преобладают карбонаты (кальцит, анкерит, доломит, сидерит), а также кварц, серицит, альбит и барит. При содержании в рудах барита более 30% они относятся к барит-полиметаллическому типу, в составе которых наряду с отмеченными минералами более широко развиты самородные золото, серебро, а также более редкие сульфиды и теллуриды – пирсеит  $Ag_{15}Cu_2As_2S_{11}$ , раклиджит  $PbBi_2Te_4$ , теллуrowисмутит  $Bi_2Te_3$  [26]. Главные минералы этих типов руд – галенит и сфалерит образуют тесные сростания и имеют преимущественно тонкозернистое строение аллотриоморфнозернистой структуры с размером зерен в десятые доли миллиметра, редко до 1 мм. Сфалерит слагает небольшие, иногда сдвойникованные зерна обычно без эмульсионных включений халькопирита, свойственных сфалериту медно-цинковых руд. Второстепенные минералы, такие как теннантит и тетраэдрит, больше развиты в барит-полиметаллических рудах в виде ксеноморфных выделений совместно с галенитом и баритом нередко в ассоциации с самородным золотом, образующем часто небольшие каплевидные выделения электрума (до 0,1 мм) в теннантите.

### ***Результаты и их обсуждение***

Для изучения распределения содержания элементов в исследуемой руде было проведено испытание на возможность удаления пустых пород из исходной текущей руды. Средняя проба руды сканировалась с помощью сепаратора X для получения изображения руды и ее деления на пять продуктов (табл. 2) путем установки различных коэффициентов отбрасывания от низкого до высокого с помощью интеллектуального алгоритма распознавания.

Таблица 2

Результаты рентгенорадиометрического разделения текущей  
пробы полиметаллической руды

Продукт	Выход		Содержание, %			Извлечение, %		
	кг	%	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
1	16.95	11.3	0.09	0.03	0.01	0.11	0.22	0.20
2	10.5	7.0	0.41	0.06	0.05	0.32	0.28	0.62
3	8.7	5.8	2.67	0.09	0.28	1.72	0.35	2.88
4	7.95	5.3	12.19	0.59	0.53	7.17	2.09	4.98
5	105.9	70.6	11.58	2.06	0.73	90.68	97.06	91.32
Итого	150.0	100.0	9.02	1.50	0.56	100.00	100.00	100.00

Анализ данных табл. 2 показывает, что с увеличением выхода выделяемого (отбрасываемого) из руды продукта содержание в нем цветных металлов (Zn, Pb, Cu) возрастает. Так если в продукте 1 содержание цинка, свинца и меди составляет в %: 0.09, 0.03 и 0.01, то в продукте 4 – 12.19, 0.59 и 0.53 % соответственно. В табл. 3 представлен гранулометрический состав исследованной текущей пробы полиметаллической руды.

Таблица 3

Статистика частиц в исследованной пробе руды

Крупность частиц, мм	Кол-во частиц, шт.	Выход, %	Вес, кг	Весовая доля, %	Коэффициент удаления породы в хвосты, %
-10	784	14.95	0.76	0.51	32
10 ÷ 20	1470	28.03	6.27	4.18	15
20 ÷ 30	1370	26.13	21.42	14.28	7
30 ÷ 40	676	12.89	22.71	15.14	8
40 ÷ 50	434	8.28	27.60	18.40	9
50 ÷ 60	259	4.94	26.75	17.83	10
60 ÷ 75	177	3.38	27.33	18.22	8
75 ÷ 90	61	1.15	13.30	8.87	5
90 ÷ 120	13	0.25	3.86	2.57	10
+120	0	0	0	0	0
Итого	5244	100.00	150.00	100.00	100

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что распределение частиц по размерам большей части сортированной сырой руды находится в диапазоне +10 – 90 мм, что близко к распределению частиц по размерам в производственном процессе.

В табл. 4 приведены результаты опытов по определению условий оптимальной рентгенорадиометрической сепарации пробы исследуемой полиметаллической руды.

Анализ данных табл. 4 показывает, что наиболее эффективным является режим, при котором выход хвостов составляет 24,16%.

Определение оптимального режима рентгенорадиометрической сепарации  
текущей пробы полиметаллической руды

Продукт	Выход %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
Концентрат	70.53	11.58	2.06	0.73	90.65	97.05	91.61
Хвосты	29.47	2.86	0.15	0.16	9.35	2.95	8.39
Итого	100.00	9.01	1.49	0.56	100.00	100.00	100.00
Концентрат	75.84	11.62	1.96	0.72	97.83	99.19	96.58
Хвосты	24.16	0.81	0.05	0.08	2.17	0.81	3.42
Итого	100.00	9.01	1.50	0.56	100.00	100.00	100.00
Концентрат	81.66	10.98	1.82	0.68	99.82	99.51	99.34
Хвосты	18.34	0.09	0.04	0.02	0.18	0.49	0.66
Итого	100.00	8.98	1.49	0.56	100.00	100.00	100.00
Концентрат	88.70	10.15	1.68	0.63	99.89	99.77	99.80
Хвосты	11.30	0.09	0.03	0.01	0.11	0.23	0.20
Итого	100.00	9.01	1.49	0.56	100.00	100.00	100.00

### Заключение

Выполнены исследования по совершенствованию рудоподготовки и обогащения на примере полиметаллической руды одного из месторождений Республики Тыва.

Исследованная руда характеризуется как труднообогатимая и упорная, и при ее флотации часть минералов цинка, свинца и меди теряется с хвостами обогащения. С целью повышения технологических показателей и сокращения уровня потерь выполнены эксперименты по предварительному обогащению руды с использованием рентгенорадиометрической сепарации. Установлено, что при найденном оптимальном режиме выход крупнокускового материала в хвосты сепарации составляет 24.16%. Выход концентрата 75.84% с содержанием цинка 11.62% при извлечении 97.83%. Это на 22.52% больше, чем извлечение цинка в хвосты медно-свинцовой флотации, из которых по существующей технологии получают товарный цинковый концентрат. По данным исследований рекомендуемая для сепарации крупность руды +12-80 мм.

Таким образом, как показывают результаты выполненных исследований использование рентгенорадиометрической сепарации при обогащении труднообогатимой полиметаллической руды позволит не только повысить технологические показатели по переработке руды, но и одновременно снизить себестоимость товарной продукции из-за снижения нагрузки на основное технологическое оборудование и сократить объем сбросов тонкого материала в хвостохранилище обогатительной фабрики за счет предварительного удаления из руды 24.16% пустой породы в виде крупных кусков.

## *Благодарности*

*«Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121051900145-1)»*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скопов С.В. Обогащение минерального сырья и техногенных отходов на ЗАО НПК «ТЕХНОГЕН» – Материалы III Международной научно-технической конференции «Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов», г. Екатеринбург – 2007. – С. 22-32.
2. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. С. 125–135.
3. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава / Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 3–4.
4. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А. Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Горный журнал. – 2020. – № 5. С. 39-46.
5. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. С. 107–128.
6. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН / Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 672-685.
7. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Елизаров Д.Б., Овчинникова Т.Ю. Связь показателей рентгенорадиометрической сепарации с крупностью сортируемых классов / Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 77-84.
8. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.
9. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б. Кластер информационных методов обогащения полезных ископаемых // ГИАБ. 2017. Спец. вып. № 23. С. 483–492.
10. Knapp H., Neubert K., Wotruba H. Simulation of sensor-based on drill core analysis // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 21–30.
11. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 106–115.
12. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. P. 159–168.
13. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Коренев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
14. Пестов В. В. Методика формирования сепарационного параметра для рентгенофлуоресцентной сепарации руд и техногенных материалов // Горный журнал. 2012. № 2. С. 145–150.
15. Цыпин Е. Ф., Тююшева Н. М., Комлев С. Г., Аржанников Г. И., Беляков В. А., Карбовская А. В. Рентгенорадиометрическая сепарация медно-цинковых руд // Цветные металлы. 1992. № 12. С. 58–61.

16. Санакулов К. С., Руднев С. В., Канцель А. В. О возможности отработки месторождения «Учкулач» с использованием технологии рентгенорадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1(44). С. 17–20.
17. Санакулов К. С., Руднев С. В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). С. 3–7.
18. Рахмеев Р. Н., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О., Чикин А. Ю. Результаты испытаний рентгенорадиометрического сепаратора для обогащения алмазосодержащих концентратов // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 80–88.
19. Цыпин Е. Ф., Шемякин В. С., Скопов С. В., Федоров Ю. О., Пестов В. В., Ентальцев Е. В. Обогащение минерального и техногенного сырья с использованием рентгенорадиометрической сепарации // Сталь. 2009. № 6. С. 75–78.
20. Колесаев В. Б., Корсаков А. К., Святецкий В. С., Литвиненко В. Г., Култышев В. И., Решетников А. А. Подземная разработка урановых месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный журнал. 2008. № 8. С. 33–36.
21. Шемякин В. С., Скопов С. В., Маньковский Р. В., Красильников П. А., Мамонов Р. С. Предварительное обогащение кварцевого сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 8. С. 74–79.
22. Зверев В. В., Литвинцев Э. Г., Рябкин В. К., Гусев С. С., Кузнецова О. В., Глушко Т. В., Ратнер В. Б., Рябкина З. П. Радиометрическая сепарация как основной процесс в технологической схеме обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 3–6.
23. Шемякин В. С., Макаров Н. М., Чепчугов С. А. Возможности обогащения бокситов СУБРа // Горный журнал. 2004. № 3. С. 35–38.
24. Алушкин И. В., Щипчин В. Б., Корнеев И. Г. Рентгенорадиометрическая сепарация от TOMRA Sorting для предварительного обогащения угля // Уголь. 2014. № 5. С. 100–103.
25. Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н. Минералогия и условия образования медно-цинковых и медных руд Кызыл-Таштыгского колчеданно-полиметаллического месторождения (Восточная Тува) // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. С. 414–422.
26. Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. М.: Наука. 2006. 426 с.

© А. К. Салчак, В. И. Ростовцев, 2023