

Особенности присутствия благородных металлов в клинкере цинкового производства

© 2022 г. В.Г. Лобанов, О.Б. Колмачихина, С.Э. Полыгалов, Р.Э. Хабибулина, Л.В. Соколов

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила в редакцию 30.11.2021 г., доработана 03.02.2021 г., подписана в печать 07.02.2021 г.

Аннотация: Рассмотрены особенности нахождения форм золота в техногенном сырье — лежалом клинкере цинкового производства Беловского цинкового завода (г. Белово, Кемеровской обл.). Беловский завод работал в период с 1930 по 2003 г. на цинковых концентратах Салаирского ГОКа. После остановки предприятия отвалы клинкера были складированы на промплощадке завода и неоднократно подвергались промывке кислотными растворами для выделения меди. Подобная форма хранения и выщелачивания привела к трансформации форм благородных металлов, находящихся в клинкере, что в настоящее время затрудняет извлечение золота. Содержание золота в клинкере находится на уровне 2–3 г/т, что делает извлечение золота рентабельным. Наличие в клинкере углерода затрудняет использование известных методов как аналитического обнаружения золота, так и его извлечения. Предложен метод для определения форм нахождения и содержания золота с учетом того, что оно может присутствовать в виде свободного мелкого золота, а также тонковкрапленного в железо и его оксиды, в сульфидные фазы, кварцево-силикатную часть клинкера и углестую фазу. Показано, что в зависимости от условий хранения и предыдущей кислотной обработки меняются формы нахождения золота в клинкере, что влияет на выбор технологической схемы переработки материала. Доля золота, доступного для выщелачивания, составляет не менее 40 %. Повышенная ассоциативность золота с угольной (флотоактивной) фазой и сорбционная активность угля вносят существенные помехи в исследования свойств форм золота в клинкере, что требует предварительного удаления углерода.

Ключевые слова: клинкер цинкового производства, отвал, выщелачивание, золото, анализ, минеральные формы.

Лобанов В.Г. — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ) УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: lobanov-vl@yandex.ru.

Колмачихина О.Б. — канд. техн. наук, доцент кафедры МЦМ, УрФУ. E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru.

Полыгалов С.Э. — ассистент кафедры МЦМ, УрФУ. E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru.

Хабибулина Р.Э. — аспирант кафедры МЦМ, УрФУ. E-mail: khabibulina.ucheba@mail.ru.

Соколов Л.В. — студент кафедры МЦМ, УрФУ. E-mail: levsha45@yandex.ru.

Для цитирования: Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Полыгалов С.Э., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В. Особенности присутствия благородных металлов в клинкере цинкового производства. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. No. 5. С. 19–25. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-19-25.

Features of the presence of precious metals in the zinc production clinker

V.G. Lobanov, O.B. Kolmachikhina, S.E. Polygalov, R.E. Khabibulina, L.V. Sokolov

Ural Federal University (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Received 30.11.2021, revised 03.02.2021, accepted for publication 07.02.2021

Abstract: The paper considers the features of gold deportments in technogenic raw materials — aged clinker of zinc production at the Belovsky zinc plant (Belovo, Kemerovo Region). The Belovsky plant operated from 1930 to 2003 using zinc concentrates from the Salaisky ore mining and processing plant. After the plant shutdown, clinker dumps were stored at the plant's mill site and were repeatedly washed with acidic solutions to isolate copper. This form of storage and leaching led to the transformation of precious metal deportments in clinker, which currently makes it difficult to extract gold. The gold content in clinker is at the level of 2–3 g/t, which makes gold recovery profitable. The presence of carbon in clinker complicates the use of known methods of both analytical detection of gold and its recovery. A method is proposed for determining the deportment and content of gold taking into account the fact that gold may be present in the form of free fine gold, as well as gold finely disseminated in iron and its oxides, in sulfide phases, in the quartz-silicate part of clinker and in the carbonaceous phase. It was

shown that gold deportments in clinker change depending on the storage conditions and preceding acid treatment, and this affects the choice of the material processing flow chart. The share of gold available for leaching is at least 40 %. The increased associativity of gold with the coal (flotation-active) phase and the sorption activity of coal significantly interfere with the study into the properties of gold deportments in clinker, which requires preliminary carbon removal.

Keywords: aged clinker of zinc production, dump, leaching, gold, analysis, mineral deportments.

Lobanov V.G. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of non-ferrous metals (MNFМ), Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: lobanov-vl@yandex.ru.

Kolmachikhina O.B. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of MNFM, UrFU. E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru.

Polygalov S.E. — assistant lecturer, Department of MNFM, UrFU. E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru.

Khabibulina R.E. — graduate student, Department of MNFM, UrFU. E-mail: khabibulina.uchebo@mail.ru.

Sokolov L.V. — student, Department of MNFM, UrFU. E-mail: levsha45@yandex.ru.

For citation: Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B., Polygalov S.E., Khabibulina R.E., Sokolov L.V. Features of the presence of precious metals in the zinc production clinker. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 5. P. 19–25 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-19-25.

Введение

Клинкер — сложный продукт вельцевания цинковых кеков, который содержит цинк, медь, благородные металлы и значительное количество Fe_2O_3 (порядка 24—30 %). Кроме того, в клинкере остается углерод, добавляемый при вельцевании в качестве восстанавливающего агента, а также SiO_2 , Al_2O_3 и другие соединения. Наличие железа затрудняет переработку клинкера как пирометаллургическими, так и гидрометаллургическими методами. В настоящее время основной способ переработки клинкера — плавка с медной сульфидной шихтой. В этом случае медь и благородные металлы переходят в штейновую фазу, а выделение благородных металлов в отдельный продукт (шлам) происходит только на завершающей стадии производства меди — электролитическом рафинировании. Получение же чистых металлов требует отдельной технологической цепочки переработки шламов. Прочие способы переработки клинкера, в том числе с применением методов физического обогащения (магнитная сепарация, обогащение в тяжелых суспензиях и др.) прошли только лабораторные и полупромышленные испытания [1]. В настоящее время в России клинкер текущего производства Челябинского цинкового завода перерабатывают на медеплавильных предприятиях УГМК и РМК и имеются отвалы клинкера остановленных заводов — Беловского цинкового (г. Белово, Кемеровская обл.) и «Электроцинк» (г. Владикавказ).

Беловский цинковый завод (БЦЗ) был пущен в эксплуатацию в 1930 г., когда пирометаллургиче-

ская и гидрометаллургическая технологии получения цинка имели одинаковое значение в мировом производстве этого металла. Выбор пирометаллургической технологии для БЦЗ был обусловлен отсутствием в 1930-х годах в Кузбассе необходимого количества электроэнергии для электроэкстракции цинка, а также небольшим объемом планируемого производства. Основной операцией пирометаллургической технологии была дистилляция цинка. Первоначально дистилляцию вели в муфелях, укладываемых в дистилляционную печь. Такой способ получения цинка требовал большого расхода восстановителя (кокса): 2—3 т на 1 т перерабатываемого концентрата (или 5—6 т на 1 т цинка).

Сырьевой базой нового завода стало Салаирское цинковое месторождение (рудник № 2), на котором в конце 1932 г. ввели в эксплуатацию свинцово-цинковую обогатительную фабрику. Салаирский ГОК вел добычу и переработку полиметаллических руд с выпуском баритового, свинцового и цинкового концентратов. Цинковый концентрат с содержанием цинка 45 % и выше отправляли на Беловский цинковый завод, который с конца 1935 г. работал исключительно на концентратах Салаира. В цинковых концентратах содержались золото и серебро.

В период 1930—1935 гг. были построены 4 дистилляционные печи, и годовой выпуск цинка достиг 12 тыс. т. В 1941—1943 гг. производство БЦЗ было реконструировано, усовершенствован процесс дистилляции цинка, в 1950 г. была пущена

в работу вельц-печь для переработки раймовки. Электролитический способ производства цинка был внедрен на заводе в 1965 г.

В конце 1990-х годов Салаирский горно-обогатительный комбинат был остановлен, в марте 1998 г. БЦЗ прекратил выпуск цинка и серной кислоты, а в 2003 г. его работа была полностью прекращена [2—4].

В период работы предприятия годовой объемом складированного клинкера составлял порядка 24 тыс. т/год, и на начало 1990-х годов в отвалах БЦЗ было накоплено около 630 тыс. т клинкера. Попытки его переработки предпринимались в 1970—80 гг., когда практически весь клинкер текущего производства отправляли в г. Карабаш (Челябинская обл.) на плавку в шахтных печах совместно с медьсодержащей шихтой. Отгрузка клинкера прекратилась в 1990-х годах, когда было принято решение о перепрофилировании Карабашского медьзавода на плавку вторичного сырья. Лежалый клинкер в переработку не вовлекали. По данным опробования, проводимого в конце 1980-х годов, в отвалах БЦЗ клинкер был богаче, чем текущий, отправляемый на переработку. Отвалы клинкера и раймовки после ликвидации предприятия остались на промплощадке БЦЗ [5].

Цель настоящей работы — изучить особенности присутствия благородных металлов в лежалом клинкере БЦЗ, что необходимо для выбора наиболее рациональной схемы его переработки.

Характеристика исходного материала

Изначально клинкер БЦЗ представлял собой мелкозернистый материал: 80—90 % частиц составляла фракция —10 мм. При хранении в отвалах основная фаза клинкера — оксид железа (II) — окисляется, что обычно сопровождается перекристаллизацией и укрупнением. По ряду причин клинкер БЦЗ в процессе окисления в отвале дезинтегрировался. Ценные составляющие распределялись по классам крупности клинкера неравномерно: чем крупнее кусок, тем больше в нем железа, цинка и кремнезема, а содержание меди практически не менялось. Углерод в основном концентрировался в средних и мелких фракциях (до 65 % во фракции —7 мм). Основная часть углерода находилась в клинкере в виде свободных зерен, преобладающая крупность которых со-

ставляла менее 2 мм. Формы нахождения золота в клинкере не изучались [6, 7].

За последние годы неоднократно предпринимались попытки извлечь из отвалов клинкера медь, золото и серебро. Начиная с 2010 г. на промплощадке БЦЗ организовывали кучное выщелачивание меди, делались попытки извлечь благородные металлы. Целью было не только переработать отходы, но и провести рекультивацию местности [8].

Несмотря на все попытки, полностью извлечь благородные металлы из клинкера не удалось, но многочисленные промывки отвалов, перемещение куч привели к изменению химического и фазового составов материала [9], поэтому перед принятием решения о рекультивации необходимо провести дополнительное опробование материала с получением данных химического и фазового составов, а также изучение форм ассоциативности благородных металлов с основными компонентами клинкера.

Методика исследований

Для выполнения работы была отобрана и усреднена проба цинкового клинкера общей массой около 20 кг. Проба представляет собой верхний слой залежи клинкера, подвергнутой неоднократному воздействию кислых растворов с целью выщелачивания меди. В процессе пробоподготовки и выделения аналитических навесок использованы стандартные методические приемы: дробление в щековой и валковой дробилках и сокращение проб на делителе Джонса [10]. Пробу, отобранную для анализа, измельчали в лабораторной планетарной мельнице «Pulverisette 6» (Fritsch, Германия).

Рентгенофлюоресцентный анализ химического состава подготовленных проб клинкера проводили с помощью спектрометра EDX-7000 (Shimadzu, Япония). Благородные металлы ввиду малых концентраций таким методом не определяли.

Состав клинкера, по данным РФА, был следующим, %: Fe — 41,10, Si — 7,40, Zn — 2,80, Ca — 4,10, Cu — 1,25, S — 3,56, Pb — 0,20.

Содержание благородных металлов определяли методом пробирного анализа. Плавку проводили в двух параллелях, при плавке использовали шихту, применяемую при анализе высокожелезистых материалов. Результаты пробирного анализа показали содержание золота в пробе порядка 3,1 г/т, серебра — 195 г/т.

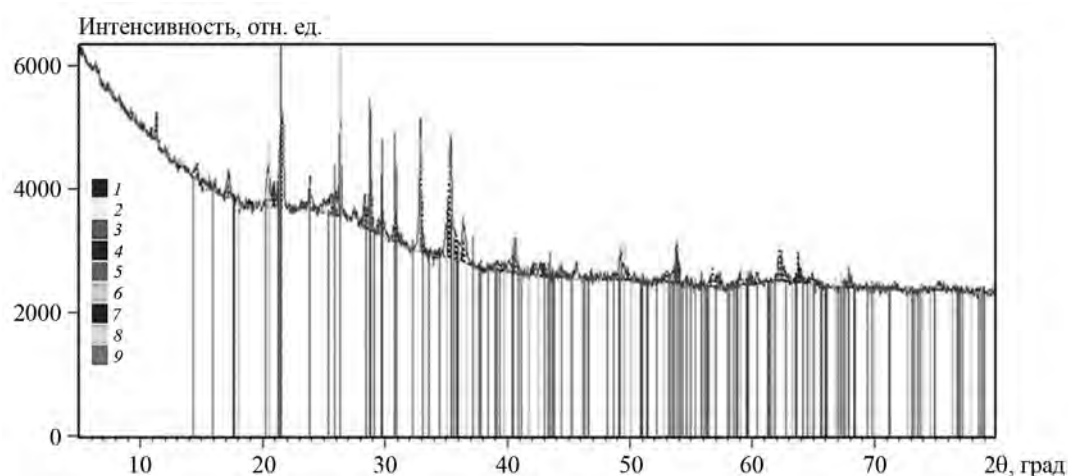


Рис. 1. Дифрактограмма пробы клинкера

1 — гипс (7,4 %); 2 — оксид магния (3,0 %); 3 — арканит (9,5 %); 4 — гетит (6,3 %); 5 — магнетит (9,1 %); 6 — гематит (20,5 %); 7 — кристобалит (19,4 %); 8 — кварц (11,2 %); 9 — коэсит (13,7 %)

Fig. 1. XRD pattern of clinker sample

1 — gypsum (7.4 %); 2 — magnesium oxide (3.0 %); 3 — arcanite (9.5 %); 4 — goethite (6.3 %); 5 — magnetite (9.1 %); 6 — hematite (20.5 %); 7 — cristobalite (19.4 %); 8 — quartz (11.2 %); 9 — coesite (13.7 %)

Фазовый анализ выполняли с использованием рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре «XPert PRO MPD» (PANalytical, Нидерланды), обработку дифрактограммы проводили с помощью программы «XPert HighScore Plus» (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

В соответствии с вышеприведенным, содержание основных соединений в клинкере составило, %: 7,4 CaSO_4 ; 3,0 MgO ; 9,5 K_2SO_4 ; 6,3 $\text{FeO}(\text{OH})$; 9,1 Fe_3O_4 ; 20,5 Fe_2O_3 ; 44,3 SiO_2 (в трех модификациях).

Полученные данные не дают представление о формах нахождения благородных металлов в исследуемом сырье, которые во многом определяются свойствами исходного сырья — цинковых концентратов. Наиболее вероятное состояние золота в природном минерале цинка (сфалерите ZnS) — тонкодисперсная вкрапленность. Прямое выщелачивание золота цианистыми растворами непосредственно из сфалерита и других сульфидных концентратов малоэффективно, извлечение в раствор редко превышает 25—30 % даже при весьма тонком помоле.

В технологических процессах переработки цинковых концентратов, например при обжиге, минеральные носители золота разрушаются и золото в большой степени вскрывается. На заклю-

чительном этапе технологии производства цинка — при вельцевании кеков выщелачивания — происходит образование новых фаз. В частности, появляются фазы металлического железа, магнетита, гетита. Кварц при вельцевании может быть оплавлен или образует метатит (файалит). Во всех этих условиях золото может быть вновь закапсулировано в зерна вторичных фаз или покрыто пленками «ржавчины». И в том и другом случае непосредственным цианированием такое золото не извлекается. Предпосылок ассоциирования золота с углистой фазой клинкера, по нашему мнению, не усматривается.

При выборе метода анализа клинкера на благородные металлы необходимо учесть, что при длительном хранении клинкера под действием природных факторов неизбежен процесс окисления металлического железа, но состояние золота и степень его доступности цианистому раствору при выщелачивании, скорее всего, не изменяются. В целом в клинкере можно предполагать наличие золота в следующих формах:

— свободное, преимущественно мелкое — такое золото возможно извлечь цианированием;

— тонковкрапленное в железо и его оксиды, а также покрытое пленками («ржавое» золото) — подобное золото может быть процианировано только после обработки материала в растворе соляной кислоты;

— тонковкрапленное в сульфидные фазы (не окисленный ранее сфалерит и вторичные сульфиды меди) — эта часть золота может быть процианирована после обработки материала в азотной кислоте;

— тонковкрапленное в кварцево-силикатную часть клинкера, а также в углистую фазу.

Наличие угля в клинкере (по данным анализа, содержание углерода составляет порядка 10–15 мас.%) не позволяет ожидать экспериментального подтверждения подобных прогнозов: на любом этапе цианирования золото, перешедшее в раствор, частично или полностью может сорбироваться углистой фазой [11–20], и последующий анализ раствора дает заниженный результат. Для исключения подобного уголь предварительно следует удалить из навески клинкера. Наиболее очевидный прием для этого — флотация углеродной составляющей. Флотация угля изучена достаточно хорошо и предлагалась в ряде работ [21–24].

Но наряду с углем, в пенный продукт может быть извлечено свободное мелкое золото — соответственно, последующее цианирование подготовленной пробы даст заниженный результат. Для нейтрализации сорбционных свойств углеродсодержащего сырья возможно проведение высокотемпературной обработки (обжига), в ходе которой уголь сгорит. Но в данном случае при прокалке железосодержащие фазы трансформируются, растрескиваются, и золото при последующем цианировании выщелачивается более полно, чем из исходного клинкера. С учетом вышесказанного, для оценки вещественного состава клинкера по формам нахождения золота и корректной оценки общего содержания золота в работе использовали схему стадийного анализа пробы клинкера (рис. 2). Анализу на содержание золота подвергали растворы, полученные после каждой операции цианирования, на пробирную плавку направляли оставшийся после всех стадий цианирования кек. Анализ растворов на содержание золота проводили на атомно-абсорбционном анализаторе марки «novAA 300» (Analytik Jena, Германия).

Для растворения свободного золота в клинкере первое цианирование проводили в бутылочном агитаторе в течение 3 суток со сменой раствора, а последующие стадии цианирования — также в бутылочном агитаторе, но 1 сутки. Расчеты стадийной степени извлечения золота выполняли на исходную массу навески 200 г, результаты веще-

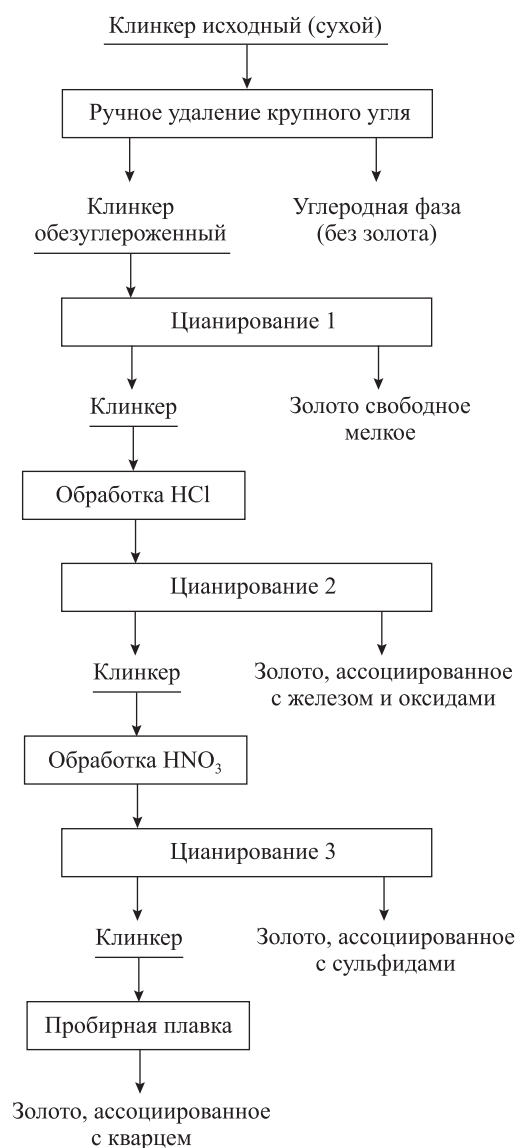


Рис. 2. Схема постадийного исследования вещественного состава пробы клинкера

Fig. 2. Diagram of stagewise clinker sample material composition study

ственного анализа исходного клинкера представлены в таблице.

Дополнительные исследования показали, что приведенные данные характеризуются определенной погрешностью, так как было установлено, что механической выборкой удалить полностью уголь невозможно — без тонкого помола значительная часть угля находится в сростках с соединениями железа и в силикатах. Если пробу измельчать, углистую составляющую можно полностью подготовить для извлечения флотацией, но вместе с углем

Содержание и распределение форм золота в клинкере

Content and distribution of gold departments in clinker

Форма золота	Содержание, г/т	Распределение, мас. %
Свободное мелкое	0,45	15
Ассоциированное с железом и оксидами	0,7	24
Ассоциированное с сульфидами	0,1	3
Ассоциированное с кварцем (невскрытое)	1,7	58
Суммарное	2,95	100

в пенный продукт извлекается мелкое свободное золото. При выщелачивании пробы, содержащей уголь, золото, перешедшее в раствор, сорбируется и в той или иной степени вновь переходит в твердую фазу. Это дает погрешность в оценке распределения золота. Тем не менее подобный вариант анализа позволяет получить предварительные сведения о формах нахождения золота в лежалом клинкере и дает возможность выбрать технологию его переработки с учетом указанных особенностей. В значительной степени приведенные выше рассуждения справедливы и для серебра.

Выводы

1. Химический состав изученной пробы клинкера характеризуется высоким содержанием железа (порядка 41 % Fe) и кремнезема (44,3 % SiO₂). Наличие этих двух компонентов определяет физико-механические свойства клинкера. Другой важной составляющей пробы являются летучие компоненты: углерод (его содержание достигает 15 %), сера и влага (влажность проб 9–10 %).

2. Основные цветные металлы в клинкере представлены медью (1,25 %), цинком (2,8 %), свинцом (0,2 %), мышьяком и сурьмой (0,1–0,2 % каждого) и молибденом (около 0,02 %).

3. Пробирный анализ показал повышенные концентрации в пробе золота — 3,2 г/т и серебра — 165 г/т.

4. Доля золота, доступного для выщелачивания, составляет не менее 40 %. Повышенная ассоциативность золота с угольной (флотоактивной) фазой требует дальнейшего исследования.

5. Сорбционная активность угля вносит существенные помехи в исследования свойств форм золота в клинкере, что требует дополнительного изучения.

Литература/References

1. Тошкодирова Р.Э., Абдурахмонов С. Переработка клинкера — техногенного отхода цинкового производства. *Universum: технические науки (электрон. научн. журн.)*. 2020. No. 11 (80). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10966> (дата обращения: 20.10.2021).
Toshkodirowa R., Abdurakhmonov S. Clinker processing — zinc industrial waste. *Universum: technicheskie nauki*. 2020. No. 11 (80). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10966> (accessed: 20.10.2021) (In Russ.).
2. Что писали об открытии Беловского цинкового завода? URL: <https://vestnik-belovo.ru/vopros/48138/chto-pisali-ob-otkrytii-belovskogo-tsinkovogo-zavoda/> (дата обращения: 15.10.2021).
What did you write about the opening of the Belovsky zinc plant? URL: <https://vestnik-belovo.ru/vopros/48138/chto-pisali-ob-otkrytii-belovskogo-tsinkovogo-zavoda/> (accessed: 15.10.2021) (In Russ.).
3. Гаскова О.Л., Бортникова С.Б., Кабанник В.Г., Новикова С.П. Особенности загрязнения почв в районе хранилища отходов пирометаллургического извлечения цинка на Беловском цинковом заводе. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. Т. 20. No. 4. С. 419–428.
Gas'kova O.L., Bortnikova S.B., Kabannik V.G., Novikova S.P. Features of soil pollution in the area of waste storage of pyrometallurgical zinc extraction at the Belovsky zinc plant. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2012. Vol. 20. No. 4. P. 419–428 (In Russ.).
4. Касимов А.М., Леонова О.В., Иванов С.Я. Ценные металлы и техногенные отходы. *Цветная металлургия*. 2007. No. 7. С. 36–38.
Kasimov A.M., Leonova O.V., Ivanov S.Ya. Valuable metals and industrial waste II. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2007. No. 7. P. 36–38 (In Russ.).
5. Харитиди Г.С., Скопов Г.В., Колмачихин В.Н. Малоотходная технология переработки клинкера цинковых заводов на уральских медеплавильных предприятиях. *Цветные металлы*. 1991. No. 4. С. 5–7.
Haritidi G.S., Skopov G.V., Kolmachikhin V.N. Low-waste technology of clinker processing of zinc plants at the Ural copper-smelting enterprises. *Tsvetnye metally*. 1991. No. 4. P. 5–7 (In Russ.).

6. Копкова Е.К., Тюремнов А.В., Громов П.Б., Щелокова Е.А. Вельц-клинкер цинкового производства и направления его переработки: Обзор. М.: Наука, Деп. в ВИНТИ. 2014. No. 51.
Kopkova E.K., Tyuremnov A.V., Gromov P.B., Shchelokova E.A. Welz-clinker of zinc production and directions of its processing: Overview. Moscow: Nauka, Deposited at VINITI. 2014. No. 51 (In Russ.).
7. Тарасов А.А., Зак М.С. Извлечение ценных компонентов из клинкера цинкового производства. *Цветная металлургия*. 1990. No. 6. С. 46—48.
Tarasov A.A., Zak M.S. Extraction of valuable components from the clinker of zinc production. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1990. No. 6. P. 46—48 (In Russ.).
8. Беловский цинковый завод пристраивает отходы. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/1169627> (дата обращения: 21.10.2021).
Belovsky zinc plant builds up waste. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/1169627> (accessed: 21.10.2021) (In Russ.).
9. Богдаш А.А. Перераспределение тяжелых металлов в зоне влияния Беловского цинкового завода (г. Белово, Кемеровская область). *Гео-Сибирь*. 2006. Т. 3. No. 1. С. 192—197.
Bogdash A.A. Redistribution of heavy metals in the zone of influence of the Belovo zinc plant (Belovo, Kemerovo region). *Geo-Sibir*. 2006. Vol. 3. No. 1. P. 192—197 (In Russ.).
10. Барышников И.Ф. Пробоотбирание и анализ благородных металлов. М.: Металлургия, 1967.
Baryshnikov I.F. Sampling and analysis of precious metals. Moscow: Metallurgiya, 1967.
11. Syed S. Recovery of gold from secondary sources: A review. *Hydrometallurgy*. 2012. No. 115. P. 30—51.
12. Lam K.F., Fong C.M., Yeung K.L. Separation of precious metals using selective mesoporous adsorbents. *Gold Bull.* 2007. No. 40. P. 192—198.
13. Tauetsile P., Oraby E., Eksteen J. Activated carbon adsorption of gold from cyanide-starved glycine solutions containing copper. Part 2: Kinetics. *Sep. Purif. Technol.* 2019. No. 211. P. 290—297.
14. Panda Rekha, Dinkar Om Shankar, Jha Manis Kumar, Pathak Devendra Deo. Novel approach for selective recovery of gold, copper, and iron as marketable product from industrial effluent. *Gold Bulletin*. 2020. DOI: 10.1007/s13404—020—00269-y.
15. Carolin C.F., Kumar P.S., Saravanan A., Joshiba G.J., Naushad M. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: a review. *J. Env. Chem. Eng.* 2017. No. 5. P. 2782—2799.
16. Ihsanullah Abbas A., Al-Amer A.M., Laoui T., Al-Marri M.J. Heavy metal removal from aqueous solution by advanced carbon nanotubes: critical review of adsorption applications. *Sep. Purif. Technol.* 2016. No. 157. P. 141—161.
17. Liu P., Liu G.F., Chen D.L., Cheng S.Y., Tang N. Adsorption properties of Ag (I), Au (III), Pd (II) and Pt (IV) ions on commercial 717 anion-exchange resin. *Trans Nonferr. Met. Soc. China*. 2009. No. 19 (6). P. 1509—1513.
18. Goswami Sunil, Pant Harish Jagat, Ambade Rajwardhan Nandram, Paul Bhasakar, Varshney Lalit, Dash Ashutosh. Study of adsorption characteristics of Au (III) onto coal particles and their application as radiotracer in a coal gasifier. *Appl. Radiat. Isot.* 2017. No. 122. P. 127—135. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.12.059.
19. Morcalia M.H., Zeytuncu B., Ozlem E., Aktas S. Studies of gold adsorption from chloride media. *Miner. Res.* 2015. No. 18 (3). P. 660—667.
20. Yonghui Song, Siming Lei, Jun Zhou, Yuhong Tian. Removal of heavy metals and cyanide from gold mine wastewater by adsorption and electric adsorption. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2015. Vol. 91 (9). P. 2539—2544. DOI: 10.1002/jctb.4859.
21. Рыбалко Б.Т., Пилецкий В.М., Уздебаев Л.К. Гравитационно-флотационный способ переработки клинкера цинкового производства. *Цветные металлы*. 2000. No. 4. С. 63—64.
Rybalko B.T., Piletskiy V.M., Uzdebaev L.K. Gravitational-flotation method of clinker processing of zinc production. *Tsvetnye metally*. 2000. No. 4. P. 63—64 (In Russ.).
22. Десятов А.М., Малинский Р.А., Щербаклова Г.В. Разработка технологии извлечения коксика из клинкера Челябинского электроцинкового завода. *Цветная металлургия*. 2008. No. 11. С. 7—9.
Decaytov A.M., Malinsky R.A., Shcherbakova G.V. Development of a technology for extracting coke from clinker of the Chebyabinsk Electro zinc. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2008. No. 11. P. 7—9 (In Russ.).
23. Moses L.B., Petersen F.W. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. *Miner. Eng.* 2000. No. 13 (3). P. 260—264. DOI: 10.1016/s0892-6875(00)00005-4.
24. Sen Sezai, Ipekoglu Uner, Cilingir Yasar. Flotation of fine gold particles by the assistance of coal-oil agglomerates. *Sep. Sci. Technol.* 2010. No. 45 (5). P. 610—618. DOI: 10.1080/01496390903566655.