

Обзорная статья

УДК 669.23

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>

Закономерности распределения благородных металлов между шлаковой и штейновой фазами при плавке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов

Дмитрий Михайлович Богатырев^{1✉}, Георгий Валентинович Петров²,
Леонид Борисович Цымбулов³

^{1,2}Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Россия

¹dmitri.bogatyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2297-6608>

²petroffg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

³lbcym@mail.ru

Резюме. Цель – проанализировать и структурировать информацию о распределении благородных металлов при пирометаллургической переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, приведенную в отечественных и зарубежных научных источниках. Анализ данных по влиянию парциального давления кислорода в системе, и, как следствие, состава получаемых штейнов, температуры ведения процесса и состава шлаковой фазы на распределение металлов платиновой группы, золота и серебра между продуктами плавки проводился на основе обзора отечественной и зарубежной научной литературы. Проведено исследование широкого спектра информации о распределении изучаемых металлов между штейном и шлаком при переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов. Установлено, что систематическое изучение вопроса о распределении благородных металлов между продуктами плавки с применением современных методов анализа находится все еще на ранних стадиях. В опубликованных научных работах имеется весьма противоречивая информация о поведении золота, серебра и металлов платиновой группы при пирометаллургической переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, что связано с различиями в методиках постановки экспериментов, подготовки и анализа проб для анализа, и, как следствие, дальнейшей интерпретации полученных результатов. Кроме того, в научной литературе не встречается данных о влиянии на распределение золота, серебра и металлов платиновой группы между продуктами плавки таких технологических параметров процесса, как содержание магнетита в шлаковой фазе, соотношение между медью и никелем в исходной шихте и получаемых штейнах. Также отмечается отсутствие в научных источниках данных о распределении благородных металлов при ведении процесса пирометаллургического обеднения шлаков окислительной плавки медно-никелевого производства. Принято решение о поиске оптимальных технологических параметров процесса окислительной плавки сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, а также пирометаллургического обеднения шлаков, гарантирующих наиболее высокие показатели извлечения благородных металлов в целевой продукт.

Ключевые слова: металлы платиновой группы, золото, серебро, коэффициент распределения, медно-никелевые штейны, печь Ванюкова

Для цитирования: Богатырев Д. М., Петров Г. В., Цымбулов Л. Б. Закономерности распределения благородных металлов между шлаковой и штейновой фазами при плавке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 128–141. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>.

Distribution of noble metals between slag and matte phases during smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates

Dmitrii M. Bogatyrev^{1✉}, Georgii V. Petrov², Leonid B. Tsymbulov³

^{1,2} Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

³ Open Joint Stock Company GiproNickel Institute, Saint Petersburg, Russia

¹ dmitri.bogatyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2297-6608>

² petroffg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

³ lbcy@mail.ru

Abstract. In this work, we analyse and structure the information on the distribution of noble metals during pyrometallurgical processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates, available in domestic and foreign scientific sources. The data on the influence of oxygen partial pressure in the system and, consequently, the matte composition, process temperature, and the phase composition of slag on the distribution of platinum group metals, gold, and silver between the smelting products were analysed. Broad-ranging information on the distribution of the examined metals between matte and slag in the processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates was studied. It was established that the distribution of noble metals between the products of smelting using modern analytical methods is still in its early stages. Contradictory information on the behaviour of gold, silver, and platinum group metals during the pyrometallurgical processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates is presented in literature due to the variations in the experimental procedures, preparation, and analysis of test samples, and, as a result, further interpretation of the obtained results. Furthermore, no data on the influence of such technological parameters as magnetite content in the slag phase, the relationship between copper and nickel in the initial furnace charge and obtained mattes on the distribution of gold, silver, and platinum group metals between the products of smelting are available. In addition, no information on the distribution of noble metals during the pyrometallurgical slags depletion obtained in oxidative smelting of copper-nickel production has been published. Thus, it was decided to perform further research on establishing optimal technological conditions for oxidising smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates, as well as pyrometallurgical depletion of slags, allowing for the highest extraction rates of noble metals into the target product.

Key words: platinum group metals, gold, silver, distribution coefficient, copper-nickel mattes, Vanyukov furnace

For citation: Bogatyrev D. M., Petrov G. V., Tsymbulov L. B. Distribution of noble metals between slag and matte phases during smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):128-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Россия является одним из мировых лидеров в области производства благородных металлов, в том числе металлов платиновой группы. При этом отмечается, что основным источником данных металлов являются сульфидные медно-никелевые руды, перерабатываемые пиromеталлургическими методами. Накопленные исследовательские данные позволяют в настоящее время достаточно корректно оценить поведение цветных металлов при пиromеталлургической переработке. В то же время сведения о поведении благородных металлов носят обрывочный характер.

Коэффициент распределения дает важную информацию о потерях металлов со шлаками. В научных источниках коэффици-

ент распределения какого-либо металла между штейном и шлаком обычно определяется как отношение массового содержания металла в штейне к содержанию металла в шлаке. Однако в зарубежных источниках, как правило, принято вычислять коэффициент распределения как отношение содержания металла в шлаке к содержанию металла в штейне. Для лучшей наглядности приводимых данных коэффициент распределения металла в данной работе будет определяться по первому варианту:

$L_{\text{шт./шл.}} = [\text{масс. \% в штейне}] / [\text{масс. \% в шлаке}]$.

Имеются многочисленные литературные источники [1–18] по проблеме потерь базовых металлов (Cu, Ni, в меньшей степени Co) со шлаками при плавке и конвертировании.

Последняя по времени «волна» таких исследований в 1980–1990 гг. была вызвана распространением интенсивных методов плавки, таких как взвешенная плавка, плавка в жидкой ванне. В то же время опубликованных работ по распределению благородных металлов (Au, Ag, металлы платиновой группы) гораздо меньше, а значение их, несмотря на «малые» содержания, велико. В производстве меди, например, благородные металлы играют заметную роль. Известно, что медные руды являются важным источником золота и серебра. В частности, в 2015 г. в структуре производства первичного серебра лишь 30% пришлось на собственно серебряные рудники, а 22% серебра было получено в качестве побочного продукта переработки медных руд (34% – от переработки свинцово-цинковых руд и 4,8% – прочих руд⁴ [1]).

Стоит отметить, что в настоящее время изучение распределения металлов платиновой группы при пирометаллургической переработке медно-никелевых руд приобретает крайне важное значение в связи с их возросшей стоимостью на мировом рынке. В данной статье приводятся данные только современных научных исследований, так как в ряде случаев в более ранних работах приводятся разрозненные сведения, полученные с недостаточно точными средствами анализа.

Анализ научных исследований. Прежде всего, структурируем все известные исследования на 3 группы. В первой группе работ изучалось влияние парциального давления кислорода и сортности штейна на распределение благородных металлов. Во второй группе приводятся данные о влиянии температуры ведения процесса на распределение золота, серебра и металлов платиновой группы между продуктами плавки. Третья группа исследований посвящена изучению состава шлаковой фазы на поведение благородных металлов в пирометаллургических процессах. Остановимся на каждой группе подробнее.

Распределению золота и металлов платиновой группы (Pt, Pd, Rh, Ru) посвящена ста-

тья японских исследователей З. Хенео [2]. Опыты выполнялись в тиглях из MgO при 1573 К, $p_{\text{SO}_2} = 10^4$ Па ($p_{\text{O}_2} = 6,3 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-3}$, $p_{\text{S}_2} = 5 - 10^3$ Па) и сортности штейна 40–70% масс. Cu, масса образца – около 12 г, время выдержки – 24 ч. Результаты в статье практически не обсуждаются. Отмечено лишь, что в интервале содержаний меди в штейне от 40% до 65% коэффициенты распределения не претерпевают заметных изменений, но при дальнейшем повышении содержания меди начинается рост $L^{\text{шл/шт}}$, то есть потери металлов платиновой группы со шлаками увеличиваются при росте парциального давления кислорода в системе. Авторы на основе полученных значений $L^{\text{шл/шт}}$ полагают, что драгоценные металлы растворены преимущественно в штейне. $L^{\text{шл/шт}}$ для Ru – около 10^{-2} , для Au, Pt и Pd – 10^{-3} , для Rh – 10^{-4} .

Большой вклад в изучение распределения металлов платиновой группы между шлаком и штейном при пирометаллургической переработке сульфидных концентратов внесли финские ученые университета Aalto [3–11]. Так, в работе [3] по равновесному распределению драгоценных металлов (Au, Pd, Pt, Rh) между медным штейном (Cu-Fe-S-O) и железосиликатным шлаком при 1250–1350°C в условиях контроля за парциальными давлениями кислорода и серы и фиксированном давлении SO_2 выявлены следующие значения коэффициентов распределения: Au – 1500, Pd – 3000, Pt – 5000, Rh – 7000–8000. Полученные в данной работе значения содержания драгоценных металлов в железосиликатном шлаке укладываются в интервал от 1 до 20 ppm (1 ppm = 10^{-4} % масс.) и имеют тенденцию к снижению с увеличением сортности штейна. Коэффициенты распределения при сортности штейна 65% Cu таковы: Au – 1500, Pd – 3000, Pt – 6000, Rh – 10000 (Ag – 100–200 в интервале сортностей штейна 50–70% Cu). В целом, по мнению авторов данной статьи, равновесное распределение штейн/шлак преимущественно определяется свойствами сульфидного штейна, несмотря

⁴World Silver Survey 2021 // The Silver Institute. 2021. URL: <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2021/04/World-Silver-Survey-2021.pdf>

на то что «примесные» элементы растворяются в шлаке, очевидно, в виде окисленных частиц. Результаты работы [3] показывают, что растворимость драгоценных металлов в шлаке «пренебрежимо мала». Это позволяет заключить, что при взвешенной плавке медных концентратов доминирующим механизмом потерь драгоценных металлов является захват частиц штейна, т.е. скорее механические, а не химические потери. Коэффициенты распределения для платины, приведенные в работе [3], выше, чем отмеченные в исследовании [2], но хорошо согласуются с коэффициентами распределения, указанным в статье [13], в которой внимание уделялось растворимости чистой платины в $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2$ шлаке, т.е. рассматривается равновесие шлак/платина. Методика и условия

проведения опытов в [3] аналогичны [2]. Авторы установили, что растворимость платины в шлаке увеличивается по мере роста парциального давления кислорода.

Целью работы [3] являлось изучение поведения распределения драгоценных металлов между медным штейном и железосиликатным шлаком в условиях взвешенной плавки ($1250\text{--}1350^\circ\text{C}$, $p_{\text{SO}_2} = 10^4$ Па, содержание Cu в штейне 55–75% масс.). На рис. 1 приведены экспериментально полученные в [3] коэффициенты распределения для палладия, наряду с данными работы [2], а также расчетные коэффициенты распределения на основе предела детектирования (10 ppm). На рис. 1 аналогичные линии показывают минимальные надежные коэффициенты распределения драгоценных металлов.

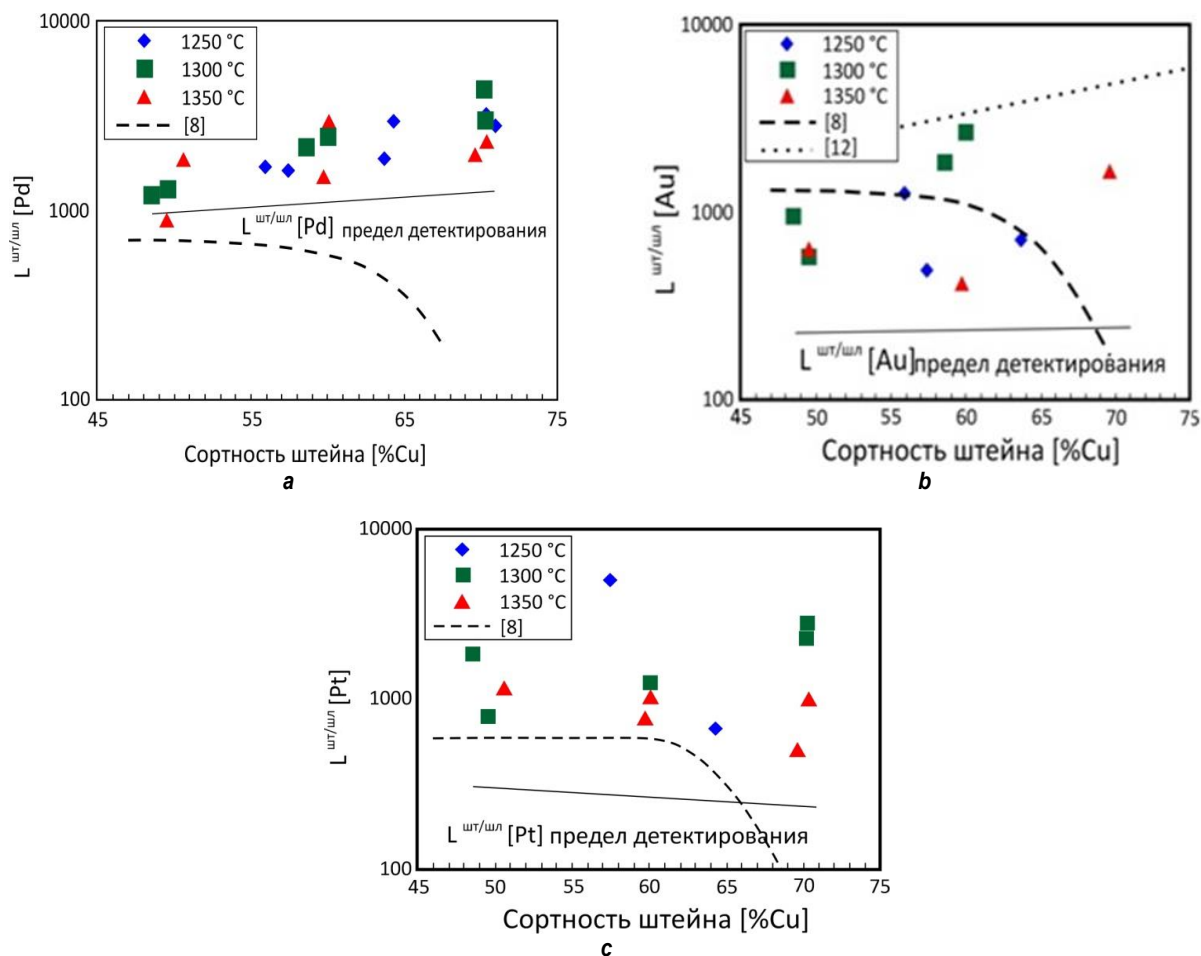


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения палладия (а), золота (b) и платины (с) между медным штейном и железосиликатным шлаком от доли меди в штейне при парциальном давлении диоксида серы 10^4 Па и температурах 1523 К, 1573 К и 1623 К [3]
Fig. 1. Dependence of distribution coefficients of palladium (a), gold (b) and platinum (c) between the copper matte and iron silicate slag on copper proportion in the matte at partial pressure of 10^4 Pa of sulphur dioxide and temperatures of 1523 K, 1573 K and 1623 K [3]

Очевидно, что данные работы [2] отличаются от результатов [3], и в значительной степени – для богатых медью штейнов (65% Cu). Разброс данных большой, особенно для платины и золота, где картина зависимости от доли меди в штейне довольно противоречива. Однако авторы [3] считают, что в среднем концентрация платины, видимо, постоянна при изменении содержания меди в штейне вплоть до 60% масс, после чего она начинает снижаться. Такое поведение платины указывает на следующее обстоятельство: с ростом содержания меди и парциального давления кислорода платина во все большей степени «уходит из штейна». Что касается прочих драгоценных металлов (рис. 1 а), то у концентрации палладия имеется тенденция к повышению с увеличением доли меди в штейне, в то время как концентрация золота остается примерно постоянной.

Работ, посвященных распределению драгоценных металлов между шлаком и никелевым (или медно-никелевым) штейном, чрезвычайно мало, тем более – работ последнего времени с применением современных методов анализа. Можно отметить работу, опубликованную в ноябре 2017 г. группой финских исследователей, под названием «Распределение драгоценных металлов при плавке непосредственно на никелевый (низкомедистый) файнштейн» [4]. В данном литературном источнике изучено распределение базовых металлов (Cu, Fe, Ni, Co) и драгоценных (Ag, Au, Pd, Pt) между низкожелезистыми штейнами (до 15% масс.) с соотношением никеля к меди в штейне, равном 4, и железосиликатным шлаком (насыщенным SiO_2) при температуре 1350–1450°C в контролируемой газовой атмосфере с фиксированными значениями p_{S_2} и p_{O_2} .

Значение коэффициента распределения золота (≈ 10000) в работе [4] на порядок выше значения (≈ 1000), приведенного в работе [3]. Коэффициент распределения платины $L^{\text{шт/шл}}$ также выше, чем у золота, и составляет примерно 100000. У палладия зависимость коэффициента распределения от содержания железа в штейне выражена гораздо слабее, чем у золота и платины. Коэффициент рас-

пределения палладия по порядку величины аналогичен коэффициенту распределения золота. Авторы статьи [4] на основе собственных экспериментальных данных по распределению металлов между штейном и шлаком и имеющихся литературных данных по состоянию дел на 2018 г. делают вывод, что «заниженные» коэффициенты распределения, приведенные в некоторых работах, в которых используются традиционные способы пробоотбора с последующим химическим анализом, являются результатом недостаточно эффективного механического разделения штейна от шлака. Однако, по нашему мнению, такой подход позволяет оценить совокупные потери металлов платиновой группы со шлаками, так как позволяет определить и механические, и химические потери, что, учитывая преимущественные потери металлов платиновой группы (МПГ) с корольками штейна, более актуально для промышленных систем.

Перейдем к рассмотрению известных данных о влиянии температурного режима плавки на распределение металлов платиновой группы между шлаком и штейном. Согласно результатам исследований, проведенным финскими учеными [3, 5], температура не оказывает существенного влияния на коэффициенты распределения металлов платиновой группы. Отмечается, что температурная зависимость коэффициентов распределения обычно слабо выражена, но в целом низкая температура благоприятствует переходу благородных металлов в штейн. На рис. 2 приведены две линии тренда – для 1250 и 1350°C, показывающих влияние температуры на $\log_{10} L^{\text{шт/шл}}$ для родия. В прочих случаях температурная зависимость слишком слабая, чтобы оказывать какое-либо заметное влияние.

Авторы работы [14] исследовали процесс растворимости рутения в различных шлаковых системах. В работе варьировали парциальное давление в диапазоне от 10^2 до $2,1 \cdot 10^4$ Па и температуру процесса от 1155 до 1600°C (рис. 3). Было установлено, что растворимость рутения в шлаке растет с увеличением парциального давления кислорода и

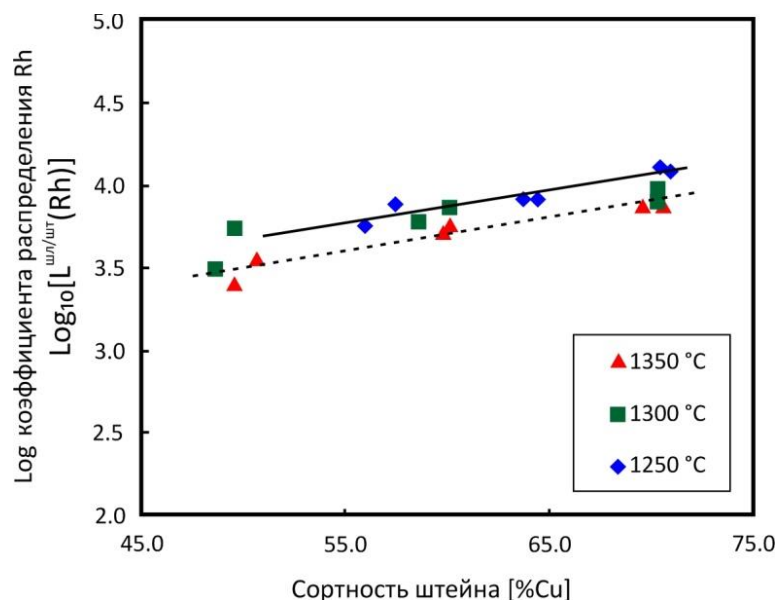


Рис. 2. Логарифм коэффициента распределения родия между железосиликатным шлаком и медным штейном при 1250–1350 °C как функция от содержания меди в штейне [11]

Fig. 2. Logarithm of the coefficient of rhodium distribution between iron silicate slag and copper matte at 1250–1350 °C as a function of the copper content in the matte [11]

при уменьшении температуры. На основании данной закономерности авторы делают вывод о том, что реакция растворения рутения в шлаке, которая может быть представлена в виде формулы: $\text{Ru} + \frac{3}{4}\text{O}_2(\text{г}) + \frac{1}{2}\text{O}^{2-}(\text{шл.}) = \text{RuO}^{2-}(\text{шл.})$, имеет экзотермический характер. Таким образом, опираясь на полученные результаты в работе [14], можно утверждать,

что, наряду с механическими, рутению свойственны химические потери со шлаками, в связи с чем можно предположить, что при обеднении шлака окислительной плавки твердым или газообразным восстановителем, рутений должен достаточно полно переходить из шлака в металлическую фазу.

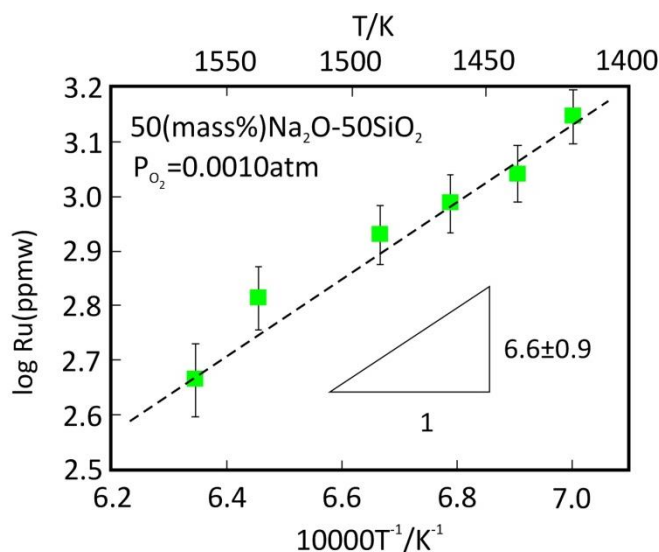


Рис. 3. Зависимость растворимости рутения от температуры в шлаковой системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ при фиксированном парциальном давлении кислорода [14] (на рис. $p_{\text{O}_2} = 10^2$ Па)

Fig. 3. Dependence of ruthenium solubility on the temperature in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ slag system under the fixed oxygen partial pressure [14] (in the figure $p_{\text{O}_2} = 10^2$ Pa)

Также в работе [14] были смоделированы условия процесса конвертирования меди. Исследования проводили при фиксированной температуре 1200°C , парциальном давлении кислорода $1,52\text{ Па}$. Состав шлака был следующим: 25% SiO_2 , 70% Fe_3O_4 , 5% ZnO . При данных условиях было установлено содержание рутения в шлаке, которое составило 47 ppm, и рассчитан коэффициент распределения рутения между конвертерным шлаком и черновой медью, который равен $6,7 \cdot 10^{-4}$.

Перейдем к рассмотрению третьей группы факторов, влияющих на распределение благородных металлов между шлаком и штейном, – составу шлаковой фазы. Влияние состава шлака изучалось в ряде работ финских и японских ученых [4, 14–18]. В большинстве работ было установлено, что с повышением содержания основного оксида растворимость МПГ в шлаке растет. В частности, в исследовании [15] определялась растворимость родия в зависимости от парциального давления кислорода в диапазоне от 10 до 10^5 Па , температуры в интервале от 1200 до 1600°C и состава шлака. Было установлено (рис. 4), что при увеличении концентрации CaO в шлаке с 50 до 56% масс. содержание родия в шлаке увеличивается приблизительно на 20%.

С другой стороны, в работе [17], в которой исследовалась растворимость платины в

шлаковой системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-(\text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CuO})$, авторы указывают на резкое снижение растворимости платины с увеличением концентрации MgO в шлаке. Также авторы отмечают, что растворимость платины резко снижается с увеличением содержания Fe_2O_3 и Al_2O_3 , которые ведут себя как типичные кислые оксиды в шлаках. По мнению авторов [17], несмотря на то, что MgO является основным оксидом, его основность ниже, чем у Na_2O , в связи с этим он ведет себя как разбавитель основности шлака, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента активности оксида платины при увеличении содержания оксида магния.

В работе ученых финского университета Аалто [4], приведенной выше, помимо влияния парциального давления кислорода в газовой фазе, также изучалось влияние содержания MgO в шлаковой фазе на распределение золота, платины и палладия между шлаком и штейном. Было установлено, что влияние MgO на переход палладия, платины и золота в шлак имеет одинаковый характер. Так, коэффициенты распределения, вычисляемые в данном случае как отношение содержания металла в штейне к содержанию металла в шлаке, по существу, увеличиваются более чем вдвое при добавках основного оксида. По результатам анализа шлаков содержание MgO равнялось 0, 4 и 8,5% масс.

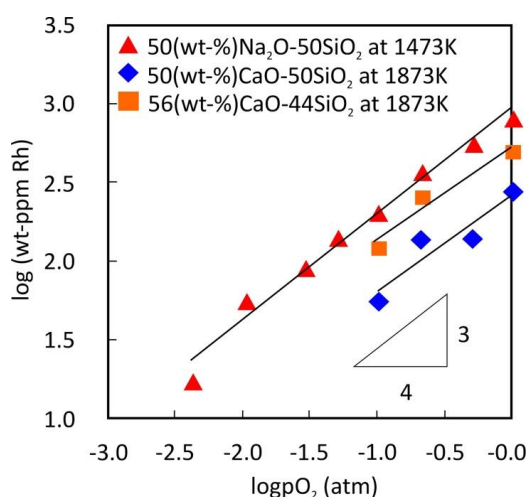


Рис. 4. Зависимость растворимости родия от парциального давления кислорода в шлаках различного состава и при различных температурах [15] (на рис. размерность от 10^2 Па ($-3,0\text{ атм}$) до 10^5 Па (0 атм))

Fig. 4. Dependence of rhodium solubility on oxygen partial pressure in the slags of various compositions and at various temperatures [15] (the figure demonstrates the numbers of dimension from 10^2 Pa (-3.0 atm) to 10^5 Pa (0 atm))

В свою очередь, влияние Al_2O_3 на распределение платины изучалось в работах японских исследователей [16]. Соотношение CaO/SiO_2 в шлаке являлось постоянным параметром и равнялось 1,07, содержание Al_2O_3 варьировалось от 3 до 35% масс. Авторами отмечается, что в данной шлаковой системе Al_2O_3 ведет себя как основной оксид из-за присутствия SiO_2 , который является кислым компонентом. В целом в рамках работы выявлено, что повышение концентрации Al_2O_3 в шлаке увеличивает содержание платины в шлаковом расплаве, рис. 5.

Из опубликованных отечественных статей по теме распределения благородных металлов между штейном и шлаком отмечаются работы, выполненные на базе АО «ИНЦВЕТМЕТ» [20, 21], ООО «Институт Гипроникель» [22–24], Санкт-Петербургского горного университета⁵ [25–29], литературный источник⁶. Так, в работах [20, 21] авторами изучались закономерности распределения металлов платиновой группы применительно к плавке сульфидных концентратов в печи Ванюкова, т.е. в условиях интенсивного перемешивания расплава. Авторами [20] отмечается снижение извлечения металлов платиновой группы в целевой продукт – штейн –

при увеличении содержания меди. Кроме того, авторы [20] указывают на пятикратное уменьшение потерь МПГ со шлаками с ростом массового соотношения в штейне $[\text{Ni}]:[\text{Cu}]$ с 0,5 до 5.

В работе [22] авторы изучали распределение МПГ и золота применительно к плавке сульфидного медно-никелевого концентрата. Методика заключалась в предварительном обжиге концентрата при температуре 900°C для получения штейнов различного состава, после чего огарок продували SO_2 для удаления Fe_2O_3 . Далее огарок нагревали до 1250°C (выше температуры плавления) и осуществляли выдержку расплава для разделения на шлаковую и штейновую фазы. В статье [22] отмечается, что оптимальным условием ведения процесса является получение штейнов с содержанием суммы цветных металлов на уровне 50–55%. При работе на более богатые штейны наблюдается повышение потерь МПГ и золота со шлаками. Кроме того, авторы указывают на существенное снижение извлечения МПГ в штейн при увеличении объема шлака. Так, при выходе штейна на уровне 2% извлечение Pt и Pd в штейн составило всего 50%.

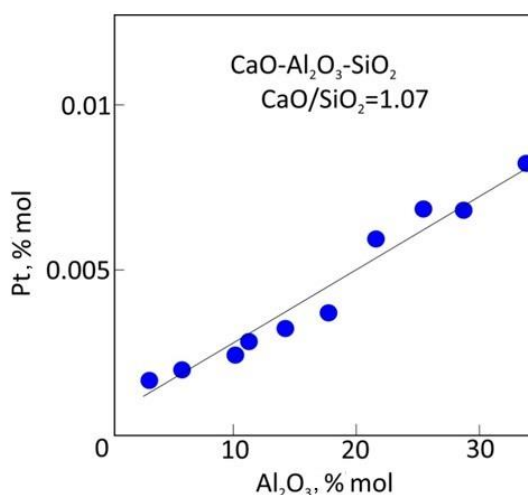


Рис. 5. Зависимость растворимости платины от содержания добавки оксида алюминия в шлак при 1500°C [16]
Fig. 5. Dependence of platinum solubility on the content of the aluminium oxide addition to the slag at 1500°C [16]

⁵Сизяков В. М., Бажин В. Ю., Бричкин В. Н., Петров Г. В. *Металлургия цветных металлов: учебник*. СПб.: Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2015. 392 с.

⁶Котляр Ю. А., Меретуков М. А., Стрижко Л. С. *Металлургия благородных металлов: учебник*. В 2-х кн. Кн. 2. М.: МИСИС; ИД «Руда и металлы», 2005. 392 с.

Авторы литературного источника⁵ описали поведение каждого из платиновых металлов в процессе руднотермической плавки сульфидного никелевого концентрата и медного концентрата, полученного из медно-никелевых руд, при плавке его в печи Ванюкова, конвертировании штейна и анодной плавке.

Установлено, что основное влияние на потери МПГ оказывает наличие или отсутствие восстановителя в шихте. Также отмечено, что потери платины, палладия, золота, рутения, осмия при нейтральной атмосфере в РТП с увеличением суммы металлов в штейне снижаются с 5,0 до 0,2%. Дальнейшее снижение наблюдается при восстановительной атмосфере в печи в присутствии 3% восстановителя. Потери платины в нейтральном режиме составляют 0,2–3,0%, в восстановительном – 0,2–1,0%; палладия 0,5–3,0 и 0,8%; рутения 0,5–5,0 и 0,5–1,5%, соответственно. Осмий в шлак переходит в одинаковой степени в нейтральном и восстановительном режимах плавки. Переход иридия в шлак выше, чем у остальных МПГ и составляет 1,5–10%. При переходе к окислительному режиму плавки резко возрастают (до 16%) потери рутения и осмия.

Авторы отмечают, что при плавке в печи Ванюкова образуется некоторое количество металлической меди, которая является коллектором МПГ, поэтому их потери со шлаками невелики. В таблице приведены коэффициенты распределения МПГ и их извлечение в системах Cu-Cu₂S и Cu-Cu₂O по данным⁵.

Данные, приведенные в источниках [30–

36], в которых рассматривалось распределение металлов платиновой группы между продуктами плавки, также подтверждают низкие потери данных металлов в растворимой форме в шлаковом расплаве. Также авторы работ [33–35] отмечают, что сульфидный расплав, представленный штейновой фазой, является хорошим коллектором металлов платиновой группы. При этом коллектирование в штейне металлов платиновой группы, в частности Pt, Pd, Ru, увеличивается по мере роста концентрации серы в штейновой фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор известных литературных данных показывает, что в мире проблеме распределения благородных металлов между продуктами плавки, как в медной, так и в никелевой промышленности, уделяют большое внимание [37, 38]. Достаточно много исследований по данной тематике опубликовано в последние годы, проведенных с применением современных методов анализа. Основные исследования посвящены распределению Au, Ag, Pt, Pd. Весьма отрывочные сведения касаются Rh, Ru, Ir, для которых круг публикаций резко ограничен.

2. Многие ученые считают, что коэффициенты распределения $L_{Me}^{штейн-шлак}$ имеют высокие значения (10^3 – 10^4) для Au, Pt, Pd. Причем для первых двух металлов даже несколько выше. Подавляющее большинство исследователей сходятся во мнении, что потери благородных металлов определяются, главным образом, наличием в шлаках механической взвеси сульфидно-металлических

Распределение металлов платиновой группы и их извлечение в медь в системах медь-сульфид меди и медь-оксид меди⁵

Distribution of platinum group metals and their extraction into copper in the copper-copper sulphide and copper-copper oxide systems⁵

Металлы	Cu-Cu ₂ S		Cu-Cu ₂ O	
	$K = \frac{[Cu][Me]}{(Cu_2S)(Me)}$	Извлечение, %	$K = \frac{[Cu][Me]}{(Cu_2O)(Me)}$	Извлечение, %
Платина	100	99,7	90–100	99,6
Палладий	140	98,0	80–100	96,4
Родий	–	99,0	–	98,0
Иридий	150–450	99,0	100–150	94,0
Рутений	60	93,0	1,2–1,5	30,0
Осмий	250–350	97,0	120–140	94,0

корольков, где и сосредоточена основная часть теряемых со шлаком благородных металлов. В то же время некоторые исследователи отмечают наличие небольшой растворимости Au, Pt, Pd в шлаках, однако даже современными методами анализа определить достоверно концентрации растворенных металлов, составляющих первые единицы ppm, не представляется возможным. В одной из работ отмечаются склонность к окислению Ru в процессе окислительной плавки и, как следствие, характерные для данного металла химические потери со шлаками.

3. Исследования, посвященные изучению влияния температуры процесса на распределения металлов платиновой группы между штейновой и шлаковой фазами, указывают на то, что температура процесса не оказывает значительного влияния на распределение платины, палладия и золота. В то же время, согласно некоторым данным в опубликованных источниках, увеличение температуры влечет за собой переход в шлак рутения ввиду протекания реакции окисления, которая носит экзотермический характер.

Список источников

1. Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P. Equilibria of gold and silver between molten copper and $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ slag in WEEE smelting at 1300°C // *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. 2016. P. 193–202. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_20.
2. Heneo Z., Hector M., Yamaguchi K., Ueda S. Distribution of precious metals (Au, Pt, Pd, Rh and Ru) between copper matte and iron-silicate slag at 1573 K // *Sohn International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials: Principles, Technologies and Industrial Practice* (San Diego, 27–31 August 2006). San Diego, 2006. Vol. 1. P. 723–729.
3. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015. Vol. 1. P. 216–228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
4. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H., Taskinen P. Precious metal distributions in direct nickel matte smelting with low-Cumattes // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018. Vol. 49. Iss. 1. P. 98–112. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1115-5>.
5. Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Taskinen P. Precious metal recoveries in secondary copper smelting with high-alumina slags // *Journal of material cycles and waste management*. 2020. Vol. 22. P. 642–655. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00955-w>.
6. Klemettinen L., Avarmaa K., Taskinen P. Slag chemistry of high-alumina iron silicate slags at 1300°C in WEEE smelting // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. Vol. 3. P. 772–781. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0141-5>.
7. Sukhomlinov D., Taskinen P. Distribution of Ni, Co, Ag, Au, Pt, Pd between copper metals and silica saturated iron silicate slag // *Thermodynamic investigation of complex inorganic material systems for improved renewable energy and metals production processes: Proceedings of the European Metallurgical Conference (EMC)*. 2017. Vol. 3. P. 1029–1038.
8. Roghani G., Takeda Y., Itagaki K. Phase equilibrium and minor element distribution between $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ -based slag and $\text{Cu}_2\text{S-FeS}$ matte at 1573 K under high partial pressures of SO_2 // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000. Vol. 31. No. 4. P. 705–712. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0109-9>.
9. Avarmaa K., Johto H., Taskinen P. Distribution of precious metals (Ag, Au, Pd, Pt, and Rh) between copper matte and iron silicate slag // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. P. 244–255. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0498-4>.
10. Avarmaa K., Klemettinen L., O'Brien H., Taskinen P. Urban mining of precious metals via oxidizing copper smelting // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 133. P. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.006>.
11. Sukhomlinov D., Klemettinen L., Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P., Jokilaakso A. Distribution of Ni, Co, precious and platinum group metals in copper making process // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019. Vol. 50. P. 1752–1765. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01576-2>.
12. Dinsdale A. SGTE Pure Element Database (UNARY) // *Scientific Group Thermodata Europe*. 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sgte.net/en/free-pure-substance-database> (12.10.2021).
13. Shishin D., Hidayat T., Chen J., Hayes P.C., Jak E. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the distributions of Ag and Au between slag, matte, and metal in the Cu-Fe-O-S-Si System // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019. Vol. 5. No. 2. P. 240–249. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00218-w>.
14. Yamaguchi K. Distribution of precious metals between matte and slag and precious metal solubility in slag // *Proceedings of Copper*. 2010. Vol. 3. P. 1287–1295.
15. Shuto H., Okabe T. H., Morita K. Ruthenium solubility and dissolution behavior in molten slag // *Materials transactions*. 2011. Vol. 52. P. 1899–1904.
16. Morita K., Wiraseranee C., Shuto H., Nakamura S., Iwasawa K., Okabe T. H., et al. Dissolution behaviour of platinum group metals into molten slags // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions*

- section C. 2014. Vol. 123. No. 1. P. 29–34. <https://doi.org/10.1179/0371955313Z.00000000070>.
17. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. Vol. 28. P. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0132-1>.
18. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Dissolution behavior of platinum in Na_2O – SiO_2 -based slags // *Material Transactions*. 2014. Vol. 55. No. 7. P. 1083–1090. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014042>.
19. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Effect of Al_2O_3 , MgO and CuO_x on the dissolution behavior of rhodium in the Na_2O – SiO_2 slags // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 131–138.
20. Токарь Л. Л., Ерцев В. И., Цесарский В. С., Денисов А. Ф., Шевцова Н. В. Изучение закономерностей поведения редких платиновых металлов в системе штейн-шлак применительно к плавке в расплаве // *Автогенные процессы в производстве тяжелых цветных металлов: сб. науч. тр. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации*, 1987. С. 86–91.
21. Орлов А. М., Токарь Л. Л., Бруэк В. Н., Быстров В. П., Цесарский В. С. Исследование поведения благородных металлов в процессе испытаний плавки в жидкой ванне сульфидного медно-никелевого сырья // *Автогенные процессы в производстве тяжелых цветных металлов: сб. науч. тр. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации*, 1987. С. 79–86.
22. Цемехман Л. Ш., Цымбулов Л. Б., Пахомов Р. А., Попов В. А. Поведение платиновых металлов при переработке сульфидного медно-никелевого сырья // *Цветные металлы*. 2016. № 11. С. 50–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.05>.
23. Рябко А. Г., Вайсбурд С. Е., Сорокин В. Г. Механизм образования платиносодержащих участков в составе металлической фазы штейна // *Труды Института Гипроникель*. 1979. № 52. С. 24–29.
24. Tsymbulov L. B., Knyazev M. V., Tsemekhman L. Sh. Oxide nickel ores smelting of ferronickel in two-zone Vaniukov furnace // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2011. Vol. 50. Iss. 2. P. 135–144. <https://doi.org/10.1179/000844311X12949291727772>.
25. Петров Г. В., Грейвер Т. Н., Лазаренков В. Г. Современное состояние и технологические перспективы производства платиновых металлов из хромитовых руд. СПб.: Изд-во «Недра», 2001. 200 с.
26. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // *Записки Горного института*. 2020. Т. 244. С. 462–473. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.9>.
27. Теляков А. Н., Рубис С. А., Горленков Д. В. Разработка эффективной технологии переработки промышленного сырья, содержащего благородные металлы // *Записки Горного института*. 2011. Vol. 192. С. 88–90.
28. Петров Г. В., Диаките М., Спыну А. Ю. Обзор спос
- собов вовлечения в переработку техногенных платиносодержащих отходов горно-металлургического комплекса // *Обогащение руд*. 2012. № 1. С. 25–28.
29. Gorlenkov D. V., Gorlenkova I. V., Beloglazov I. I., Timofeev V. Y. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydrometallurgical way // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 927. P. 190–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.190>.
30. Wan Xingbang, Kleemola L., Klemettinen L., O'Brien H. On the kinetic behavior of recycling precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) through copper smelting process // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021. Vol. 7. No. 3. P. 920–931. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00388-6>.
31. Nagamori M., Mackey P. Thermodynamics of copper matte converting: part I. Fundamentals of the Noranda process // *Metallurgical and materials transactions B*. 1978. Vol. 9. P. 255–265. <https://doi.org/10.1007/BF02653691>.
32. Shuva M. A. H., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Masood S. H., Reuter M. A. Thermodynamics of palladium (Pd) and tantalum (Ta) relevant to secondary copper smelting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017. Vol. 48. Iss. 1. P. 317–327. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0839-y>.
33. Fonseca R. O. C., Campbell I. H., O'Neill H. St. C., Allen C. M. Solubility of Pt in sulphide mattes: Implications for the genesis of PGE-rich horizons in layered intrusions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. No. 19. P. 5764–5777. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.038>.
34. Laurenz V., Fonseca R., Ballhaus C., Sylvester P. J. Solubility of palladium in picritic melts: 1. The effect of iron // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. Iss. 10. P. 2989–2998. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.015>.
35. Laurenz V., Fonseca R. O. C., Ballhaus C., Jochum K. P., Heuser A., Sylvester P. J. The solubility of palladium and ruthenium in picritic melts: 2. The effect of sulfur // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. Vol. 108. P. 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.01.013>.
36. Avarmaa K., Taskinen P., Klemettinen L. Ni–Fe–Co alloy – magnesia-iron-silicate slag equilibria and the behavior of minor elements Cu and P in nickel slag cleaning // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 719–730. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.112>.
37. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015. Vol. 1. P. 216–228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
38. Nansai K., Nakajima K., Kagakawa S., Kondo Y., Shigetomi Y., Suh Sangwon. Global mining risk footprint of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum in Japan // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49. No. 4. P. 2022–2031. <https://doi.org/10.1021/es504255r>.

References

1. Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P. Equilibria of gold and silver between molten copper and $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ slag in WEEE smelting at 1300°C. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. 2016:193-202. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_20.
2. Heneo Z., Hector M., Yamaguchi K., Ueda S. Distribution of precious metals (Au, Pt, Pd, Rh and Ru) between copper matte and iron-silicate slag at 1573 K. In: *Sohn International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials: Principles, Technologies and Industrial Practice*. 27–31 August 2006, San Diego. San Diego; 2006, vol. 1, p. 723–729.
3. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015;1:216-228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
4. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H., Taskinen P. Precious metal distributions in direct nickel matte smelting with low-Cu mattes. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;49(1):98-112. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1115-5>.
5. Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Taskinen P. Precious metal recoveries in secondary copper smelting with high-alumina slags. *Journal of material cycles and waste management*. 2020;22:642-655. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00955-w>.
6. Klemettinen L., Avarmaa K., Taskinen P. Slag chemistry of high-alumina iron silicate slags at 1300°C in WEEE smelting. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017;3:772-781. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0141-5>.
7. Sukhomlinov D., Taskinen P. Distribution of Ni, Co, Ag, Au, Pt, Pd between copper metals and silica saturated iron silicate slag. In: *Thermodynamic investigation of complex inorganic material systems for improved renewable energy and metals production processes: Proceedings of the European Metallurgical Conference (EMC)*. 2017;3:1029-1038.
8. Roghani G., Takeda Y., Itagaki K. Phase equilibrium and minor element distribution between $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ -based slag and $\text{Cu}_2\text{S-FeS}$ matte at 1573 K under high partial pressures of SO_2 . *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000;31(4):705-712. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0109-9>.
9. Avarmaa K., Johto H., Taskinen P. Distribution of precious metals (Ag, Au, Pd, Pt, and Rh) between copper matte and iron silicate slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47:244-255. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0498-4>.
10. Avarmaa K., Klemettinen L., O'Brien H., Taskinen P. Urban mining of precious metals via oxidizing copper smelting. *Minerals Engineering*. 2019;133:95-102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.006>.
11. Sukhomlinov D., Klemettinen L., Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P., Jokilaakso A. Distribution of Ni, Co, precious and platinum group metals in copper making process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:1752-1765. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01576-2>.
12. Dinsdale A. SGTE pure element database (UNARY). Scientific Group Thermodata Europe. 2009. Available from: <https://www.sgte.net/en/free-pure-substance-database> [Accessed 12th October 2021].
13. Shishin D., Hidayat T., Chen J., Hayes P. C., Jak E. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the distributions of Ag and Au between slag, matte, and metal in the Cu-Fe-O-S-Si System. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019;5(2):240-249. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00218-w>.
14. Yamaguchi K. Distribution of precious metals between matte and slag and precious metal solubility in slag. In: *Proceedings of Copper*. 2010;3:1287-1295.
15. Shuto H., Okabe T. H., Morita K. Ruthenium solubility and dissolution behavior in molten slag. *Materials transactions*. 2011;52:1899-1904.
16. Morita K., Wiraseranee C., Shuto H., Nakamura S., Iwasawa K., Okabe T. H., et al. Dissolution behaviour of platinum group metals into molten slags. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C*. 2014;123(1):29-34. <https://doi.org/10.1179/0371955313Z.00000000070>.
17. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010;28:103-108. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0132-1>.
18. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Dissolution behavior of platinum in $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$ -based slags. *Material Transactions*. 2014;55(7):1083-1090. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014042>.
19. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Effect of Al_2O_3 , MgO and CuO_x on the dissolution behavior of rhodium in the $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$ slags. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013;49(2):131-138.
20. Tokar' L. L., Ercev V. I., Cesarskij V. S., Denisov A. F., Shevcova N. V. Studying behaviour regularities of rare platinum metals in the matte-slag system as applied to smelting in the melt. In: *Avtogennyye processy v proizvodstve tyazhelykh cvetnykh metallov: sbornik trudov = Autogenous processes in the production of heavy non-ferrous metals: Collected scientific works*. Moscow: Central Research Institute of Economy and Information; 1987, p. 86-91. (In Russ.).
21. Orlov A. M., Tokar' L. L., Bruek V. N., Bystrov V. P., Cesarskij V. S. Studying behavior of noble metals under testing of melting in a liquid bath of sulphide copper-nickel raw materials. *Avtogennyye processy v proizvodstve tyazhelykh cvetnykh metallov: sbornik trudov = Autogenous processes in the production of heavy non-ferrous metals: Collected scientific works*. Moscow: Central Research Institute of Economy and Information; 1987, p. 79-86. (In Russ.).
22. Tsemekhman L. Sh., Tsybulov L. B., Pahomov R. A., Popov V. A. Behavior of platinum metals during sulfide copper-nickel raw materials

processing. *Tsvetnye metally*. 2016;11:50-56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.05>.

23. Ryabko A. G., Vaysburd S. E., Sorokin V. G. Formation mechanism of platinum-containing areas in the composition of matte metallic phase. *Proceedings of the Giprotnickel Institute*. 1979;52:24-29. (In Russ.).

24. Tsymbulov L. B., Knyazev M. V., Tsemekhman L. Sh. Oxide nickel ores smelting of ferronickel in two-zone Vanuikuv furnace. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2011;50(2):135-144. <https://doi.org/10.1179/000844311X12949291727772>.

25. Petrov G. V., Grejver T. N., Lazarenkov V. G. *Current state and technological prospects for the production of platinum metals from chromite ores*. Saint-Petersburg: Nedra; 2001, 200 p. (In Russ.).

26. Aleksandrova T. N., O'Konner S. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;244:462-473. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.9>.

27. Telyakov A. N., Rubis S. A., Gorlenkov D. V. Developing an effective technology for processing of industrial raw materials containing noble metals. *Zapiski Gornogoinstituta = Journal of Mining Institute*. 2011;192:88-90. (In Russ.).

28. Petrov G. V., Diakite M. L. L., Spynu A. Yu. The Mine-and-mill complex man-caused platinum-containing waste involvement into processing (review of methods). *Obo-gashchenie rud*. 2012;1:25-28. (In Russ.).

29. Gorlenkov D. V., Gorlenkova I. V., Beloglazov I. I., Timofeev V. Y. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydro-metallurgical way. *Materials Science Forum*. 2018;927:190-194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.190>.

30. Wan Xingbang, Kleemola L., Klemettinen L., O'Brien H. On the kinetic behavior of recycling precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) through copper smelting process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(3):920-931. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00388-6>.

31. Nagamori M., Mackey P. Thermodynamics of copper

matte converting: Part I. Fundamentals of the Noranda process. *Metallurgical and materials transactions B*. 1978;9:255-265. <https://doi.org/10.1007/BF02653691>.

32. Shuva M. A. H., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Masood S. H., Reuter M. A. Thermodynamics of palladium (Pd) and tantalum (Ta) relevant to secondary copper smelting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017;48(1):317-327. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0839-y>.

33. Fonseca R. O. C., Campbell I. H., O'Neill H. St. C., Allen C. M. Solubility of Pt in sulphide mattes: Implications for the genesis of PGE-rich horizons in layered intrusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009;73(19):5764-5777. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.038>.

34. Laurenz V., Fonseca R., Ballhaus C., Sylvester P. J. Solubility of palladium in picritic melts: 1. The effect of iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010;74(10):2989-2998. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.015>.

35. Laurenz V., Fonseca R. O. C., Ballhaus C., Jochum K. P., Heuser A., Sylvester P. J. The solubility of palladium and ruthenium in picritic melts: 2. The effect of sulfur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013;108:172-183. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.01.013>.

36. Avarmaa K., Taskinen P., Klemettinen L. Ni-Fe-Co alloy – magnesia-iron-silicate slag equilibria and the behavior of minor elements Cu and P in nickel slag cleaning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:719-730. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.112>.

37. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015;1:216-228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.

38. Nansai K., Nakajima K., Kagakawa S., Kondo Y., Shigetomi Y., Suh Sangwon. Global mining risk footprint of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum in Japan. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(4):2022-2031. <https://doi.org/10.1021/es504255r>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Богатырев Дмитрий Михайлович,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Петров Георгий Валентинович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii M. Bogatyrev,
Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Georgii V. Petrov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Metallurgy Department,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Цымбулов Леонид Борисович,
доктор технических наук, профессор,
директор департамента по исследованиям
и разработкам
ООО «Институт Гипроникель»,
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 11,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.12.2021; одобрена после рецензирования 08.02.2022; принята к публикации 18.02.2022.

Leonid B. Tsymbulov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Director of the Research and Development Department,
Gipronickel Institute LLC,
11 Grazhdansky pr., St. Petersburg 195220, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 08.02.2022; accepted for publication 18.02.2022.