

Научная статья
УДК 669.014.2:669.14
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.008

ПОЛУЧЕНИЕ СУЛЬФАТА НИКЕЛЯ ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ КОЛЬСКОЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

**Александр Георгиевич Касиков¹, Елена Анатольевна Белогурова², Дмитрий Павлович Тюкин³,
Сергей Владимирович Щербаков⁴, Дмитрий Евгеньевич Николаев⁵,
Александр Владимирович Шевцов⁶, Александр Павлович Тюкин⁷**

^{1, 2}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени
И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

³ООО «Арктик Палладий», Москва, Россия

^{4–6}Кольский металлургический завод, АО «Кольская ГМК», Мончегорск, Россия

⁷ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель», Мончегорск, Россия

¹cobaltag@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7694-0910>

²e.shchelokova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3374-6856>

^{3–7}sn@kolagmk.ru

Аннотация

В статье представлены результаты получения сульфата никеля из некондиционных продуктов АО «Кольская ГМК».

Ключевые слова:

никель, сульфат никеля, электрохимическое растворение, постоянный ток, переменный ток, кристаллизация, очистка

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук № FMEZ-2025-0059.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0059.

Для цитирования:

Получение сульфата никеля из некондиционных продуктов Кольской горно-металлургической компании /
А. Г. Касиков [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1.
С. 49–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.008.

Original article

PRODUCTION OF NICKEL SULFATE FROM SUBSTANDARD PRODUCTS OF KOLA MINING AND METALLURGY COMPANY

**Alexandr G. Kasikov¹, Elena A. Belogurova², Dmitriy P. Tyukin³, Sergey V. Shcherbakov⁴,
Dmitriy E. Nikolayev⁵, Alexandr V. Shevtsov⁶, Alexandr P. Tyukin⁷**

^{1, 2}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

³The Arctic Palladium Company, Moscow, Russia

^{4–6}Kola MMC, Monchegorsk, Russia

⁷ZF Norilsk Nickel MMC, Norilsk, Russia

¹cobaltag@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7694-0910>

²e.shchelokova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3374-6856>

^{3–7}sn@kolagmk.ru

Abstract

The article presents the results of producing nickel sulfate from substandard products of Kola Mining and Metallurgical Company.

Keywords:

nickel, nickel sulfate, electrochemical dissolution, constant current, alternating current, crystallization, purification

Acknowledgments:

The article was prepared with the support of the federal budget on the topic of the state assignment for Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No. FMEZ-2025-0059.

Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2025-0059.

For citation:

Production of nickel sulfate from substandard products of Kola Mining and Metallurgy Company / A. G. Kasikov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 49–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.008.

Введение

В настоящее время увеличение производства сульфата никеля является приоритетным направлением в металлургии никеля из-за высокого спроса на эту соль. Данная тенденция продиктована тем, что сульфат применяют в гальванотехнике при никелировании металлов, в производстве источников постоянного тока, для изготовления аккумуляторов, для производства твердых сплавов, в жировой и парфюмерной промышленности, для изготовления катализаторов [1]. Потребление сульфата никеля существенно увеличилось в процессе поступления на рынок электромобилей нового типа аккумуляторов — НМС-батареи 811 (никель-марганцевых-кобальтовых), имеющих более высокую плотность энергии при более низкой стоимости по сравнению с традиционными литий-ионными источниками [2]. Считается, что к 2030 г. производство сульфата никеля может удвоиться. В 2024 г. размер рынка сульфата никеля был оценен в 2,3 миллиарда долларов США, и, по прогнозам, он будет расти, достигнув в 2033 г. 4,5 миллиарда долларов США [3].

Для получения сульфата никеля широкое распространение получили методы осаждения из предварительно очищенных сульфатных растворов. Такой способ в настоящее время используется на ОАО «Уралэлектромедь» [4]. Процесс производства никеля сернокислого организован в две стадии: получение некондиционных кристаллов никеля сернокислого в черновом цикле; получение товарных кристаллов никеля сернокислого в чистовом цикле. В черновом цикле в процессе выпарки-кристаллизации на выпарном вакуум-кристаллизаторе получают некондиционные кристаллы никеля сернокислого, которые после разделения на центрифуге растворяют, раствор подвергают гидролитической очистке от примесей железа, меди и цинка. Однако данный способ не позволяет получать достаточно чистый сульфат, в котором нуждаются многие производства. Для получения чистого сульфата никеля нашел применение метод жидкостной экстракции, с использованием которого в Финляндии на заводе “Narjavalta” получают в год более 6 тыс. т чистого сульфата никеля [5; 6]. Также эту соль получали путем экстракционной конверсии никеля из сульфатно-хлоридных растворов в сульфатные и последующего получения сульфата никеля [7; 8]. Однако вовлечение в процесс производства сульфата никеля предварительно очищенных катодитов оказалось экономически невыгодным. В связи с этим были продолжены исследования, направленные на поиск более рентабельных путей получения сульфата никеля, а именно на использование в качестве сырья более дешевых промпродуктов Кольской ГМК. Так, снизить затраты на производство сульфата никеля, вероятно, возможно в случае использования более дешевого исходного раствора и при экстракции из него не основного компонента никеля, а примесных элементов. Однако в электролитах Кольской ГМК присутствует большое количество хлорид-ионов и ионов натрия, отделение которых от никеля затруднено. Источником сульфатных растворов, не содержащих значительных примесей ионов хлора, являются сульфатные медно-никелевые отсечные электролиты медного производства, однако после закрытия в Кольской ГМК медного производства этот источник стал недоступен. В никелевом производстве раствор, не содержащий макропримесей натрия и хлора, в настоящее время получается только при водном выщелачивании тонкой пыли от обжига никелевого концентрата в печах кипящего слоя (КС) [9]. Однако, кроме 52–86 г/л никеля, он содержит значительное количество железа, цветных металлов, селена, теллура и микропримеси благородных металлов (табл. 1), поэтому для получения высокочистой соли сульфата никеля их переработка также требует значительных затрат. Но главным ограничением для использования этого промежуточного продукта для получения солей заключается в его недостаточном количестве. Тем не менее переработка этих растворов представляется перспективной, поскольку в них содержатся теллур и благородные металлы.

Таблица 1

Содержание элементов в растворах проб водного выщелачивания
пылей КС, третьих полей электрофильтров

Элемент	1	2	3	Элемент	1	2	3
Ni, г/л	86,2	52,0	54,6	Te, мг/л	876,6	282,8	800,2
Fe, г/л	4,4	2,5	3,25	Ag, мг/л	0,06	0,04	0,058
Co, г/л	2,2	1,14	1,25	Ru, мг/л	2,87	0,51	1,10
Cu, мг/л	4,71	3,55	3,14	Rh, мг/л	0,15	0,029	0,077
Zn, мг/л	6,4	0,43	0,86	Pd, мг/л	0,0046	0,0032	0,013
Pb, мг/л	19,0	6,26	11,8	Ir, мг/л	0,55	0,57	1,19
Se, мг/л	60,3	18,3	165,8	Pt, мг/л	<0,0001	<0,0001	0,0183

Еще одним видом некондиционных никелевых продуктов являются металлические продукты в виде катодной обрезки, а также металл низкого качества, покрытый питтингом или дендритами. Реализация такого металла затруднена или сопряжена со сбытом по более низкой цене. Металлические отходы никелевого производства имеют, по сравнению с никелевыми катодами, большие преимущества, так как они не содержат примесей хлора и натрия. Однако растворение никеля в серной кислоте представляет собой сложную задачу. Использование перекиси водорода для ускорения процесса выщелачивания никелевой стружки часто оказывается малоэффективным. Одним из перспективных подходов является электрохимический метод, в котором электрический ток выступает в качестве своеобразного катализатора, стимулирующего химическую реакцию и обеспечивающего эффективное растворение никеля. Преимуществом интенсификации процесса растворения никеля с использованием электрического тока является возможность растворения в серной кислоте не только порошка никеля, но и никелевых пластин. Вместе с тем анодному растворению никеля препятствует пассивация его поверхности, которая наблюдается, например, в 1 н растворе сульфата никеля при $\text{pH} = 3$ уже при плотности тока $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$ [10]. Добавка 0,05-н раствора ионов хлора снимает пассивность, но при плотности тока $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ поверхность никеля вновь начинает пассивироваться. Частично или полностью решить пассивацию при растворении никеля возможно также при использовании для растворения переменного тока. В работе [11] отмечено, что при одинаковых плотностях тока при использовании переменного тока напряжение почти в два раза ниже, чем при использовании постоянного тока. В работе [12] показано, что при плотности тока $0,035 \text{ А/см}^2$ никелевый электрод растворяется в 1 н серной кислоте без пассивации. При этом в анодный период происходит растворение никеля, а в катодный — выделение водорода. Однако при более высокой плотности тока ($1,0 \text{ А/см}^2$) даже в 1 н серной кислоте начинает происходить пассивация никеля.

Таким образом, для эффективного электрохимического растворения никеля в серной кислоте необходимо тщательно контролировать параметры процесса, такие как плотность тока и состав электролита, чтобы избежать пассивации. В связи с этим данное исследование было направлено на изучение процесса растворения никелевых пластин и никелевой обрезки в серной кислоте с целью оптимизации условий эффективного растворения никеля.

Результаты

В лабораторных условиях для электрохимического растворения использовали Ni-катоде (марки Р-1 и Н-2) и обрезь никелевых катодов (рис. 1, 2), которую засыпали в анодные титановые корзины. В ходе экспериментов, где изучалось воздействие переменного тока, в качестве электродов (катада и анода) использовались никелевые пластины. При лабораторных испытаниях катод и анод помещали в электролитическую ячейку из полипропилена (размер $17,5 \times 13,0 \times 20,0 \text{ см}$). Расстояние между анодом и катодом составляло 1,0–1,5 см, циркуляцию электролита осуществляли со скоростью 10 л/ч с помощью перистальтического насоса. В качестве электролитического раствора использовалась серная кислота 150–350 г/л марки х. ч. В ходе эксперимента проводилось поддержание уровня жидкости путем добавления дистиллированной воды.



Рис. 1. Никелевая пластина, покрытая питтингом



Рис. 2. Обрезь никелевых катодов

Был проведен сравнительный анализ растворения никелевых пластин, выхода по току и удельного расхода электроэнергии под действием постоянного тока, постоянного тока в реверсивном режиме и переменного тока (рис. 3). Средняя температура процесса составляла $\sim 50^\circ\text{C}$.

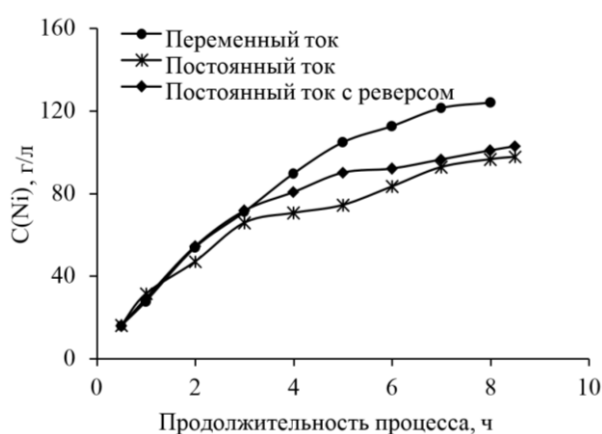


Рис. 3. Электрохимическое растворение никелевой пластины

Как видно из представленных на рис. 1 данных, электрохимическое растворение металлического никеля под действием переменного электрического тока позволяет увеличить скорость его растворения и снизить удельный расход электроэнергии. Интенсификация растворения реализуется за счет того, что в анодный полупериод тока происходит окисление никеля, а в катодный полупериод осуществляется удаление окисной пассивирующей пленки, протекающее одновременно с другим электрохимическим процессом — выделением водорода. Кроме того, переменный электрический ток приводит к уменьшению перенапряжения электродных реакций и значительно снижает диффузионные затруднения [13].

Установлено, что с ростом температуры скорость растворения металла возрастает, выход по току составил 86,2; 93,5 и 99,9 % для температур 40, 50 и 60°C соответственно. Удельный расход электроэнергии, кВт/ч·кг: 3,9; 5,1 и 6,1, для 40, 50 и 60°C соответственно. Оптимальной можно считать температуру $\sim 50^\circ\text{C}$, при которой достигается высокая скорость растворения никеля при относительно умеренном удельном расходе электроэнергии.

Исследования показали, что при растворении никеля в растворах серной кислоты с применением постоянного тока при достижении в электролите концентрации кислоты менее 100 г/л H_2SO_4 наблюдается значительное осаждение никеля на катоде и при достижении концентрации серной кислоты менее 50 г/л уже около 30 % никеля осаждалось на катоде, поэтому выход никеля в сульфатный раствор сильно снижался. Отмечено, что растворение металла в растворах серной кислоты 300–350 г/л осложняется пересыщением раствора по никелю, что приводит к образованию и выпадению в осадок солей сульфата никеля, что может вызвать проблемы в работе электролизной ванны, вплоть до короткого замыкания.

Таким образом, сделан вывод о том, что для достижения максимальной скорости растворения никеля и достижения выхода по току более 95 % рекомендуется использовать растворы серной кислоты 200–250 г/л, а для снижения остаточной концентрации серной кислоты до 10–20 г/л в конце процесса с целью предотвращения осаждения никеля на катоде необходимо проводить процесс электролиза с использованием переменного тока.

Полученные после электрохимического растворения металлических никелевых отходов растворы фильтровали. Далее растворы медленно охлаждали до комнатной температуры в открытом кристаллизаторе и выдерживали 4–6 ч. В ходе охлаждения создавалось пересыщение раствора, достаточное для образования и роста кристаллов как за счет понижения температуры, так и за счет увеличения концентрации раствора в процессе испарения растворителя (воды). В результате кристаллизации были получены монокристаллы сульфата никеля различной степени крупности. Согласно данным рентгенофазового анализа, полученные кристаллы представляют собой гексагидрат сульфата никеля.

Состав сульфата никеля, полученный при электрохимическом растворении металлических никелевых отходов, представлен в табл. 2. Из таблицы следует, что полученный сульфат соответствует по содержанию микропримесей, за исключением железа марки хч, поэтому для получения сульфата электродного качества раствор перед кристаллизацией подвергали сорбционной очистке с использованием смолы LSC790 [13].

Таблица 2

Состав сульфата никеля, полученного из раствора электрохимического растворения металлических никелевых отходов КГМК

Элемент	Содержание, мас. %	Элемент	Содержание, мас. %
Ni	22,1	V	0,002
Co	0,013	Zn	0,003
Fe	0,007	Ag	0,001
Se	0,008	Al	0,0003
B	0,001	Sb	0,0001
Mg	0,002	Cr	0,0001
Si	0,009	Mn	0,0001
Ti	0,002	Cu	0,0001

Однако реализовать комбинированный способ электрохимического растворения с использованием постоянного и переменного тока в Кольской ГМК не представлялось возможным из-за необходимости использования источников переменного тока, поэтому процесс проводили только с применением постоянного тока, что позволило, согласно разработанному способу [14], из некондиционного металла получать сульфат никеля. Процесс проводят при пониженной плотности тока, в результате чего на катоде выделяется в основном водород, а остаточная концентрация серной кислоты снижается до 20–30 г/л. Полученный после кристаллизации сульфат никеля отделяли от маточного раствора на центрифуге. Способ реализован в Кольской ГМК и в соответствии с ним в настоящее время производится порядка 20 т шестиводного сульфата никеля марки “ч”. Получить соль более высокого качества пока не представляется возможным из-за повышенного содержания в нем железа, которое попадает в соль в основном из технической серной кислоты, содержащей примерно 50 мг/л железа. Использование для очистки от железа селективных сорбентов, например смолы S957, которую ранее использовали для очистки сернокислых растворов медного производства [15], очевидно, может повысить качество сульфата никеля.

Выводы

Проведенные исследования подчеркивают важность оптимизации процессов получения сульфата никеля и повышения его качества для удовлетворения растущего спроса на этот продукт

в металлургии и других областях. Показано, что электрохимическое растворение некондиционных металлических никелевых продуктов в серной кислоте является перспективным и эффективным методом получения сульфата никеля, позволяющим увеличить скорость растворения и снизить энергозатраты.

Список источников

1. Резник И. Д., Ермаков Г. П., Шнейерсон Я. М. Никель. В 3 т. Т. 3: Сульфидные медно-никелевые руды. Характеристика руд и месторождений. Пирометаллургия и гидрометаллургия сульфидного медно-никелевого сырья, получение электролитного и карбонильного никеля, поведение благородных металлов. Производство и потребление никеля в мире. М.: Наука и технологии, 2003. 608 с.
2. Энергичное потребление сульфата никеля поддерживает цены на металл. 2025. URL: <https://www.metaltorg.ru/n/9AB72B?ysclid=mc63vpgctm866372341> (дата обращения: 26.06.2025).
3. Рынок никелевого сульфата. 2025. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/nickel-sulphate-market> (дата обращения: 26.06.2025).
4. Лебедь А. Б., Акулич Л. Ф., Набойченко С. С. Получение солей сульфата меди и никеля сернокислого на ОАО «Уралэлектромедь». Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. 136 с.
5. Norilsk Nickel Harjavalta в 2012 г. намерена увеличить выпуск никеля на 7 % — до 52 тыс. тонн. 2025. URL: <https://perwerts.ru/novosti-industrii/norilsk-nickel-harjavalta-v-2012-g-namerena.html> (дата обращения: 26.06.2025).
6. Kasikov A. G., Dyakova L. V., Khomchenko O. A. An Extraction Technology for Nickel Sulfate Production from Nickel Solutions Produced by the Kola MMC // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Vol. 56, no. 4. P. 589–594.
7. Способ конверсии соли цветного металла: пат. 2430171 РФ : МПК C22B 23/00, 3/38 / Касиков А. Г., Дьякова Л. В.; заявл. 21.06.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27.
8. Способ конверсии хлорида металла в его сульфат: пат. 2489502 РФ : МПК C22B 3/28, 3/40 / Касиков А. Г.; заявл. 29.05.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 27.
9. Касиков А. Г., Хомченко О. А., Скороходов В. И. и др. Комплексная переработка тонких пылей никелевого производства комбината «Североникель» // Цветные металлы. 1996. № 7. С. 16–20.
10. Баймаков Ю. В., Журин А. И. Электролиз в гидрометаллургии. М.: Металлургия, 1977. 334 с.
11. Никифорова Е. Ю., Килимник А. Б. Закономерности электрохимического поведения металлов при наложении переменного тока // Вестник ТГТУ. 2009. Т. 15, № 3. С. 604–613.
12. Каданер Л. И., Бойко А. В. К вопросу применения метода кривых заряжения при исследовании электродных процессов, протекающих при прохождении переменного тока больших амплитуд // Электрохимия. 1971. Т. 7, № 10. С. 1483–1488.
13. Касиков А. Г., Белогурова Е. А., Тюкин Д. П. Получение сульфатов никеля и кобальта для литий-ионных аккумуляторов из некондиционных металлов путем их электрохимического растворения // Арктический семинар по электрохимии редких металлов, посвященный 300-летию Российской академии наук : Сборник тезисов докладов (Апатиты, 02–04 декабря 2024 г.). Екатеринбург, 2024. С. 29.
14. Рябушкин М. И., Тюкин А. П., Савоськин Д. С. и др. Способ получения сульфата никеля: пат. 2840018 С1 РФ : МПК C01G 53/10; заявл. 25.04.2024; опубл. 15.05.2025, Бюл. № 14.
15. Касиков А. Г., Арешина Н. С., Мальц И. Э. и др. Сорбционная очистка растворов медно-никелевого производства с использованием ионитов «Purolite» // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 11, № 5. С. 689–693.

References

1. Reznik I. D., Yermakov G. P., Shneyerson Ya. M. *Nikel'. Sul'fidnyye medno-nikelevyye rudy. Kharakteristika rud i mestorozhdeniy. Pirometallurgiya i gidrometallurgiya sul'fidnogo medno-nikelevogo syr'ya, polucheniye elektrolitnogo i karbonil'nogo nikelya, povedeniye blagorodnykh metallov. Proizvodstvo i potrebleniye nikelya v mire* [Nickel. Sulfide copper-nickel ores. Characteristics of ores and deposits. Pyrometallurgy and hydrometallurgy of copper-nickel sulfide raw materials, production of electrolytic and carbonyl nickel, behavior of precious metals. Nickel production and consumption in the world]. Moscow, Nauka i tekhnologii, 2003, 608 p. (In Russ.)
2. *Energichnoye potrebleniye sul'fata nikelya podderzhivayet tseny na metal* [Energetic consumption of nickel sulfate supports metal prices]. MetalTorg.ru (In Russ.) Available at: <https://www.metaltorg.ru/n/9AB72B?ysclid=mc63vpgctm866372341> (accessed 26.06.2025).
3. *Rynok nikelovogo sul'fata* [Nickel sulfate market]. *ProverenoRynokOtchety* [VerifiedMarketReports] (In Russ.). Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/nickel-sulphate-market> (accessed 26.06.2025).
4. Lebed' A. B., Akulich L. F., Naboychenko C. S. *Polucheniye soley sul'fata medi i nikelya sernokislogo na OAO "Uralelektromed'"* [Production of copper sulfate and nickel sulfate salts at Uralelectromed']. Yekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2015, 136 p. (In Russ.).

5. *Norilsk Nickel Harjavalta v 2012 g namerena uvelichit' vypusk nikelya na 7— do 52 tys tonn* [In 2012, Norilsk Nickel Harjavalta intends to increase nickel production by 7% to 52 thousand tons]. *Metalloprokat* [Metal rolling]. (In Russ.). Available at: <https://perwerts.ru/novosti-industrii/norilsk-nickel-harjavalta-v-2012-g-namerena.html> (accessed 26.06.2025).
6. Kasikov A. G., Dyakova L. V., Khomchenko O. A. An Extraction Technology for Nickel Sulfate Production from Nickel Solutions Produced by the Kola MMC. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2022. Vol. 56, No. 4. P. 589–594.
7. *Sposob konversii soli tsvetnogo metalla* [Conversion method of salt of non-ferrous metal]: patent 2430171 Rossijskaya Federaciya. No. 2010125362; yayavl. 21.06.2010, opubl. 27.09.2011, Bul. No 27, 11 p. (In Russ.)
8. *Sposob konversii khlorida metalla v yego sul'fat* [Method of converting metal chloride to sulphate thereof]: patent 2489502 Rossijskaya Federaciya. No. 2012122236, yayavl. 29.05.2012, opubl. 10.08.2013, Bul. No 27, 9 p. (In Russ.)
9. Kasikov A. G., Khomchenko O. A., Skorokhodov V. I. et al. Kompleksnaya pererabotka tonkikh pyley nikel'evogo proizvodstva kombinata "Severonikel" [Complex processing of fine dusts of nickel production at the Severonickel Plant]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 1996, No. 7, pp. 16–20. (In Russ.).
10. Baymakov Yu. V., Zhurin A. I. *Elektroliz v gidrometallurgii* [Electrolysis in hydrometallurgy]. Moscow, Metallurgiya, 1977, 334 p. (In Russ.).
11. Nikiforova Ye. Yu., Kilimnik A. B. Zakonomernosti elektrokhimicheskogo povedeniya metallov pri nalozhenii peremennogo toka [Patterns of electrochemical behavior of metals when alternating current is applied]. *Vestnik TGTU* [Bulletin of TSTU], 2009, Vol. 15, No. 3, pp. 604–613. (In Russ.)
12. Kadaner L. I., Boyko A. V. K voprosu primeneniya metoda krivykh zaryazheniya pri issledovanii elektrodnykh protsessov, protekayushchikh pri prokhozhenii peremennogo toka bol'shikh amplitud [On the application of the charging curve method in the study of electrode processes occurring during the passage of high-amplitude alternating current]. *Elektrokhiimiya* [Electrochemistry], 1971, Vol. 7, No. 10, pp. 1483–1488. (In Russ.).
13. Kasikov A. G., Belogurova Ye. A., Tyukin D. P. Polucheniye sul'fatov nikelya i kobal'ta dlya litiy-ionnykh akkumulyatorov iz nekonditsionnykh metallov putem ikh elektrokhimicheskogo rastvoreniya [Production of nickel and cobalt sulfates for lithium-ion batteries from substandard metals by their electrochemical dissolution]. *Arkticheskiy seminar po elektrokhimii redkikh metallov, posvyashchennyy 300-letiyu Rossiyskoy akademii nauk : Sbornik tezisev dokladov, Apatity, 02–04 dekabrya 2024 g.* [Arctic Seminar on Electrochemistry of Rare Metals dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences : Collection of abstracts (Apatity, December 02–04, 2024)]. Yekaterinburg, 2024, p. 29. (In Russ.).
14. *Sposob polucheniya sul'fata nikelya* [Method of producing nickel sulphate]: patent 2840018 Rossijskaya Federaciya. No. 2024111587, yayavl. 25.04.24, opubl. 15.05.25, Bul. No 14, 17 p. (In Russ.).
15. Kasikov A. G., Areshina N. S., Mal'ts I. E. et al. Sorbtionnaya ochistka rastvorov medno-nikel'evogo proizvodstva s ispol'zovaniyem ionitov "Purolite" [Sorption purification of copper-nickel solutions using Purolite ionites]. *Sorbtionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2019, Vol. 11, No. 5, pp. 689–693. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Г. Касиков — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;
Е. А. Белогурова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
Д. П. Тюкин — руководитель проектов управления развития рынков;
С. В. Щербаков — заместитель директора завода — главный инженер;
Д. Е. Николаев — старший технолог Химико-металлургического цеха;
А. В. Шевцов — главный специалист гидрометаллургического отдела Научно-технического центра;
А. П. Тюкин — начальник Научно-технического управления Дирекции развития производства.

Information about the authors

A. G. Kasikov — PhD (Chemistry), Leading Researcher;
E. A. Belogurova — PhD (Engineering), Senior Researcher;
D. P. Tyukin — Project Leader, Product Development Department;
S. V. Shcherbakov — Deputy Director-Chief Engineer;
D. E. Nikolayev — Senior Technologist of Chemical and Metallurgical Department;
A. V. Shevtsov — Chief Specialist of Hydrometallurgical Department of the Scientific and Technical Center;
A. P. Tyukin — Head of Scientific and Technical Department of Production Development Directorate.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 14.07.2025.
The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 14.07.2025.