ХИМИЯ

УДК 544.653

https://doi.org/ 10.47928/1726-9946-2026-26-1-29-41

PZDSRY

Научная статья

Совместное электровосстановление ионов неодима и кобальта на фоне эвтектического расплава KCl–NaCl–CsCl при 823 K

Х. Б.Кушхов[1] – действительный член АМАН, Ж. З. Али[2], А. М. Ф. Кахтан[3], М. Н. Лигидова[4], М. А. Шогенова[5]

[1,2,4,5] *Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*
[3] *Педагогический колледж Университета Сейюн, г. Сейюн, Йемен*
[1] *hasbikushchov@yahoo.com,* [2] *ali.zhubagi@yandex.ru,* [4] *adamokova1@mail.ru,* [5] *Madina.tlimakhova@mail.ru*

Аннотация. Методами циклической и квадратно-волновой вольтамперометрии, хронопотенциометрии разомкнутой цепи изучено совместное электровосстановление ионов неодима и кобальта Nd^{3+} и Co^{2+} эвтектического расплава KCl–NaCl–CsCl при 823 K. Показано, что потенциалы электровосстановления ионов кобальта и неодима при различном содержании их в эвтектическом расплаве, различаются примерно на 1,5 В. При совместном содержании ионов кобальта и неодима имеет место деполяризация выделения более электроотрицательного металла – неодима, на предварительно выделившимся на вольфрамовом электроде, металлическом кобальте с образованием, различных по составу, интерметаллических соединений Nd_xCo_y. Методом хронопотенциометрии разомкнутой цепи определены потенциалы растворения интерметаллических фаз на основе неодима и кобальта.

Ключевые слова: ионные расплавы, неодим, кобальт, интерметаллические соединения, электровосстановление.

Финансирование. Работа не выполнялась в рамках фондов.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Для цитирования. *Кушхов Х. Б., Али Ж. З., Кахтан А. М. Ф., Лигидова М. Н., Шогенова М. А.* Совместное электровосстановление ионов неодима и кобальта на фоне эвтектического расплава KCl–NaCl–CsCl при 823 K // Доклады АМАН. 2026. Т. 26, № 1. С. 29–41. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2026-26-1-29-41; EDN: PZDSRY

© Кушхов Х. Б., Али Ж. З., Кахтан А. М. Ф., Лигидова М. Н., Шогенова М. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CHEMISTRY

UDC 544.653 Original article

Joint electroreduction of neodymium and cobalt ions in a eutectic KCl–NaCl–CsCl melt at 823 K

Khasbi B. Kushkhov[1] – full member of IAAS, Zhubagi Z. Ali[2], Abdulkader M. F. Qahtan[3], Marina N. Ligidova[4], Madina A. Shogenova[5]

[1,2,4,5] *Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia*
[3] *College of Education, Seiyun University, Seiyun, Yemen*
[1] *hasbikushchov@yahoo.com,* [2] *ali.zhubagi@yandex.ru,* [4] *adamokova1@mail.ru,* [5] *Madina.tlimakhova@mail.ru*

Abstract. The combined electroreduction of neodymium and cobalt ions Nd^{3+} and Co^{2+} of a KCl–NaCl-CsCl eutectic melt at 823 K was studied by cyclic and square-wave voltammetry and open–circuit chronopotentiometry. It is shown that the electroreduction potentials of cobalt and neodymium ions at different concentrations in the eutectic melt differ by about 1.5 V. With the combined content of cobalt and neodymium ions, there is a depolarization of the release of a more electronegative metal, neodymium, onto metallic cobalt previously released on a tungsten electrode, with the formation of intermetallic compounds Nd_xCo_y of various compositions. The dissolution potentials of intermetallic phases based on neodymium and cobalt have been determined by open-circuit chronopotentiometry.

Keywords: ionic melt, neodymium, cobalt, intermetallic compound, electroreduction.

Funding. The work was not carried out within the framework of funds.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print.

For citation. *Kushkhov H. B., Ali Zh. Z., Qahtan A. M. F., Ligidova M. N., Shogenova M. A.* Joint electroreduction of neodymium and cobalt ions in a eutectic KCl–NaCl–CsCl melt at 823 K. Adyghe Int. Sci. J. 2026. Vol. 26, No. 1. Pp. 29–41.
DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2026-26-1-29-41; EDN: PZDSRY

© Kushkhov H. B., Ali Zh. Z., Qahtan A. M. F., Ligidova M. N., Shogenova M. A., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение.

В настоящее время эффективное функционирование и развитие таких высокотехнологичных отраслей как микроэлектроника, приборостроение, авиационная и космическая техника, робототехника, атомная энергетика и металлургия, немыслимы без использования функциональных материалов на основе редкоземельных металлов (РЗМ). Это связано уникальным сочетанием физико-химических свойств РЗМ и их соединений, к которым можно отнести высокую каталитическую активность, способность к сорбции, выраженные магнитные и оптические свойства, хорошие деоксидантные (раскисление расплава) и лигирующие свойства [1]–[3]. Сегодня одним из наиболее востребованных продуктов, на технологическом рынке являются магнитные материалы. Сплавы редкоземельных металлов с металлами триады железа обладают превосходными магнитными и электронными характеристиками, что делает данные материалы предметом повышенного внимания исследователей со всего мира [4]–[7]. В этом отношении, особый интерес представляют интерметаллические соединения неодима и кобальта Nd_xCo_y. Соединение $NdCo_5$ обладает большой магнитокристаллической анизотропией, высокими значениями коэрцитивности и магнитного момента, высокой температурой Кюри, а также имеет один из самых высоких показателей максимального энергетического произведения $(BH)_{max}$ при комнатной температуре [8], [9]. Соединение $NdCo_2$ обладает гигантскими значениями магнитокалорического эффекта, магнитострикции и магнитосопротивления [10]–[14]. Эти выдающиеся магнитные свойства делают интерметаллиды Nd_xCo_y. превосходными материалами для создания постоянных магнитов.

На сегодняшний день процессы производства магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов, например, Nd–Fe–B, $SmCo_5$ и т. д., включают кальциетермическое восстановление оксидов РЗМ и Co или сплавление предварительно полученных металлов с последующим тонким помолом в инертной атмосфере [1], [2]. Сложность технологического процесса, протекание реакции при высоких температурах (выше 1000°C), трудности при отделении целевого продукта от образующегося шлака и необходимость использования дорогостоящего металлического кальция в качестве восстановителя, делают чрезвычайно актуальной проблему поиска и разработки эффективных методов получения магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов. В литературе имеется определенная информация о получении интерметаллических соединений на основе неодима и кобальта. В работах [15]–[17] были получены интерметаллические соединения неодима и кобальта методом диффузионного насыщения в галогенидных расплавах. Авторами [18] исследован процесс электроосаждения неодима на подложку из кобальта в хлоридно-фторидном расплаве (NaCl–KCl) – 10 мас.% NaF – 5 мас.% NdF_3. Коллективом авторов [19] путём электролиза низкотемпературных солевых расплавов LnF–LiF (иногда с добавкой BaF_2) с растворимыми анодами из Fe, Co и Mn были получены сплавы редкоземельных металлов с 3d-металлами: Fe–Dy, Fe–Y, Co–Y, Co–Sm, Co–Pr, Co–Nd, Mn–Gd и Mn–Y. В работе [20], предварительно спечённую смесь порошка Nd_2O_3 – Co_3O_4, гранулы которой выступали в качестве катода, восстановили до $NdCo_5$ гальваностатическим электролизом в расплавленном хлориде кальция.

В работе [21] проведено исследование процессов совместного электровосстановления ионов диспрозия и неодима с ионами металлов триады железа и, путем совместного электровыделения компонентов синтезируемых соединений из эквимольного расплава KCl–NaCl при 973 K, осуществлён процесс электрохимического синтеза интерметаллических соединений фазы Ln_xFe_y, Ln_xCo_y, Ln_xNi_y (Ln=Nd, Dy). В наших работах [22] и [23] в эквимольном KCl–NaCl и эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl исследован

механизм электровосстановления ионов Nd^{3+}, а также совместное электровосстановление ионов Nd^3+ и Ni^{2+} на инертном вольфрамовом и активном никелевом электродах и показана возможность электрохимического синтеза интерметаллических соединений Nd_xNi_y.

Работ посвященных исследованию совместного электровосстановления ионов неодима и кобальта в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl в литературных источниках не обнаружены.

Исходя из этого, целью данной работы является исследование совместного электровосстановления ионов неодима и кобальта на фоне эвтектического расплава KCl–NaCl–CsCl при 823 K.

Материалы и методы.

Эксперименты проводили в герметичной кварцевой трехэлектродной ячейке, в атмосфере очищенного аргона. Анодом и одновременно контейнером для расплава, служил стеклоуглеродный тигель объемом 30 см^3. В качестве электрода сравнения нами был использован серебряный электрод который был зачехлён в керамическую гильзу из диоксида циркония стабилизированного оксидом церия, в которую предварительно был помещен электролит состава KCl–NaCl–CsCl (эвтектика) – AgCl (2,5 моль.%). Катодом служила вольфрамовая проволока диаметром 1,0 мм. Для изоляции, по всей длине вольфрамового катода, исключая рабочую зону погруженную в расплав, одевались алундовые трубки. Площадь рабочего электрода рассчитывали по глубине погружения в расплав (10 ÷ 15 мм). Подготовка и сборка ячейки осуществлялась в перчаточном боксе mBraun Labstar 25 (Германия) в атмосфере аргона. Для создания рабочей температуры 823K применяли печь сопротивления шахтного типа, СШОЛ 0,9.3/11 компании «Тула–Терм» нагревательным элементом которой, являлась нихромовая спираль. Автоматическое регулирование температуры осуществлялось с помощью встроенного электронного регулятора (точность поддержания температуры ± 5°C. Дополнительно, температуру в самом расплаве, контролировали хромель-алюмелевой термопарой, помещенной в алюмооксидную гильзу, опущенную в исследуемый расплав.

Циклические хроновольтамперограммы, квадратно-волновая вольтамперограммы, хронопотенциограммы, хронопотенциограммы разомкнутой цепи были получены с использованием электрохимического комплекса Autolab PGSTAT 30 фирмы Ecochemie (Нидерланды), оснащенного интерфейсом IF – 030. Вольтамперограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения GPES 4.9.

Приготовление электролита.

В качестве фонового электролита был выбран эвтектический расплав| KCl (24,5мол.%) – NaCl (30,0мол.%) – CsCl (45,5мол.%). Для его приготовления использовали KCl, NaCl, CsCl марки ос.ч. Соли перед проведением эксперимента сушили в вакуумном сушильном шкафу в течении 10 ч, а затем прокаливали в муфельной печи в течении 5 ч при температуре 450 °C. В качестве источника ионов неодима и кобальта, использовали ультрасухие соли марки ос.ч. $NdCl_3$, $CoCl_2$, компания «Химкрафт» (Россия, Калининград).

Результаты и обсуждения.

Особенности электрохимического поведения ионов в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl были описаны нами в работе [24]. Показано, что электровосстановление ионов Nd^{3+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 K протекает обратимо в однц стадию с переносом трёх электронов до скоростей поляризации 0,2 В/с. При более высоких скоростях поляризации сказывается замедленность стадии переноса заряда. Также определён электродный потенциал E (Nd^{3+}/Nd^0) в расплаве KCl–NaCl–CsCl относительно серебряного электрода сравнения. Электрохимическое поведение иона Co^{2+} в эвтектиче-

ском расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 K исследовано в работе [25]. Было также показано, что электровосстановление ионов Co^{2+} протекает обратимо в одну двухэлектронную стадию до скоростей поляризации 0,1 В/с. Эти результаты послужили исходными данными при изучении совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl.

Совместное электровосстановление ионов неодима Nd^{3+} и кобальта Co^{2+} исследовали методами циклической и квадратно–волновой вольтамперометрии, хронопотенциометрии разомнутой цепи, в трех различных вариантах. В первом варианте в эвтектический расплав добавляли определенное количество хлорида кобальта и регистрировали вольтамперные зависимости электровосстановления ионов Co^{2+}. Затем в этот же расплав содержаший ионы Co^{2+} добавляли трихлорид неодима и снимали вольтамперную зависимость при совместном содержании ионов Nd^{3+} и Co^{2+} в фоновом электролите KCl–NaCl–CsCl эвтектического состава.

Во втором варианте электрохимические измерения проводили в обратной последовательности. По третьему варианту, предварительно подготовленную смесь сухих солей - фонового электролита KCl–NaCl–CsCl, трихлорида неодима и дихлорида кобальта засыпали в стеклоуглеродный тигель и плавили в атмосфере высокочистого аргона и термостатировали при температуре 823 K. Проведенные исследования показали, что способ приготовления рабочего электролита не влияет на общую картину и характер вольтамперных зависимостей совместного электровосстановления ионов неодима Nd^{3+} и кобальта Co^{2+}. Поэтому, в основном, исследование процесса совместного электровосстановления ионов неодима Nd^{3+} и кобальта Co^{2+} проводили по третьему варианту, чтобы избежать разгерметизации электрохимической ячейки и не нарушать глубину погружения вольфрамового катода.

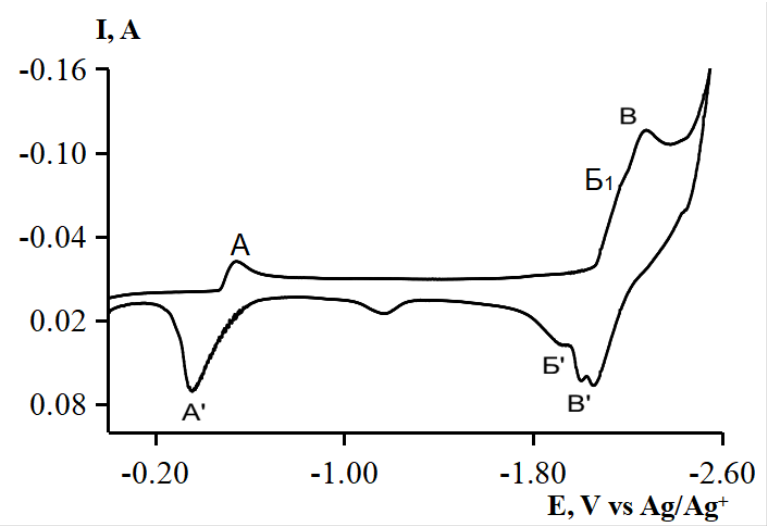

Рис. 1. Циклические хроновольтаперограммы процесса совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 K. V=0,2 В/с; $C(NdCl_3)$ =3,0×10^{-4} моль/см^3; C ($CoCl_2$) = 5,0×10^{-5} моль/см. S катода = 0,20 см^2

Fig. 1. Cyclic chronovoltagegrams of the process of joint electroreduction of Nd^{3+} and Co^{2+} ions in the eutectic melt of KCl–NaCl–CsCl at 823 K. V = 0.2 V/s; $C(NdCl_3)$ = 3.0×10^{-4} mol/cm^3; C ($CoCl_2$) = 5.0×10^{-5} mol/cm. S cathode = 0.20 cm^2

Рис. 1 демонстрирует циклические вольтамперограммы совместного электровосстановления хлоридных комплексов Nd^{3+} и Co^{2+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 К. На вольтамперных зависимостях чётко выделяется волна электровосстановления иона кобальта (А) при потенцалах – (0,4 ÷ 0,5)В, также видна волна восстановления (Б) при потенциалах – (2,05 ÷ 2,02)В и волна (В) при потенциале – (2,20 ÷ 2,26)В.

При увеличении температуры до 973 К наблюдается тенденция разделения катодной волны (Б) на две волны: $Б_1$ при потенциалах – (1,84 ÷ 1,90)В и $Б_2$ при потенциалах – (1,90 ÷ 1,95)В (Рис. 2).

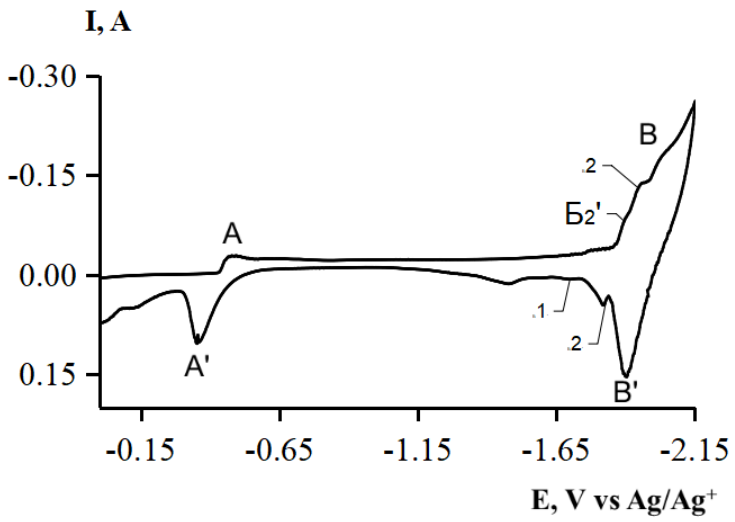

Рис. 2. Циклические хроновольтаперограммы процесса совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} на вольфрамовом электроде в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 973 К. V=0,2 В/с; C($NdCl_3$) =3,0×10^{-4} моль/см^3; C ($CoCl_2$) = 5,0×10^{-5} моль/см. S катода = 0,20 см^2

Fig. 2. Cyclic chronovoltagegrams of the process of joint electroreduction of Nd^{3+} and Co^{2+} ions on a tungsten electrode in a eutectic melt of KCl–NaCl–CsCl at 973 K. V = 0.2 V/s; C ($NdCl_3$) = 3.0×10^{-4} mol/cm^3; C ($CoCl_2$) = 5.0×10^{-5} mol/cm. S cathode = 0.20 cm^2

Перед волной Б наблюдется небольшой по высоте подъём тока при потенциалах – (1,73÷1,75)В. Появление этих волн связано с деполяризацией электровосстановления ионов неодима на металлическом кобальте, который предварительно выделился на вольфрамовом электроде при более положительных потенциалах. На всех этих волнах происходит совместное электровосстановление ионов неодима и кобальта с образованием интерметаллических фаз. На волне В происходит электровосстановление ионов неодима Nd^{3+} до металлического неодима, которая по потенциалам совпадает с волной восстановления трихлорида неодима в расплаве KCl–NaCl–CsCl в отсутствии хлорида кобальта. На анодной ветви циклической вольтамперограммы наблюдается более чёткое разделение волн анодного окисления продуктов катодной ветви циклических вольтамперограмм.

Соответствие катодных волн восстановления и анодных волн электроокисления продуктов катодного цикла нами подтверждены снятием вольтамперных кривых до различных потенциалов возврата, соответствующих завершению катодной волны восстановления (Рис. 3, кривые 1–3)

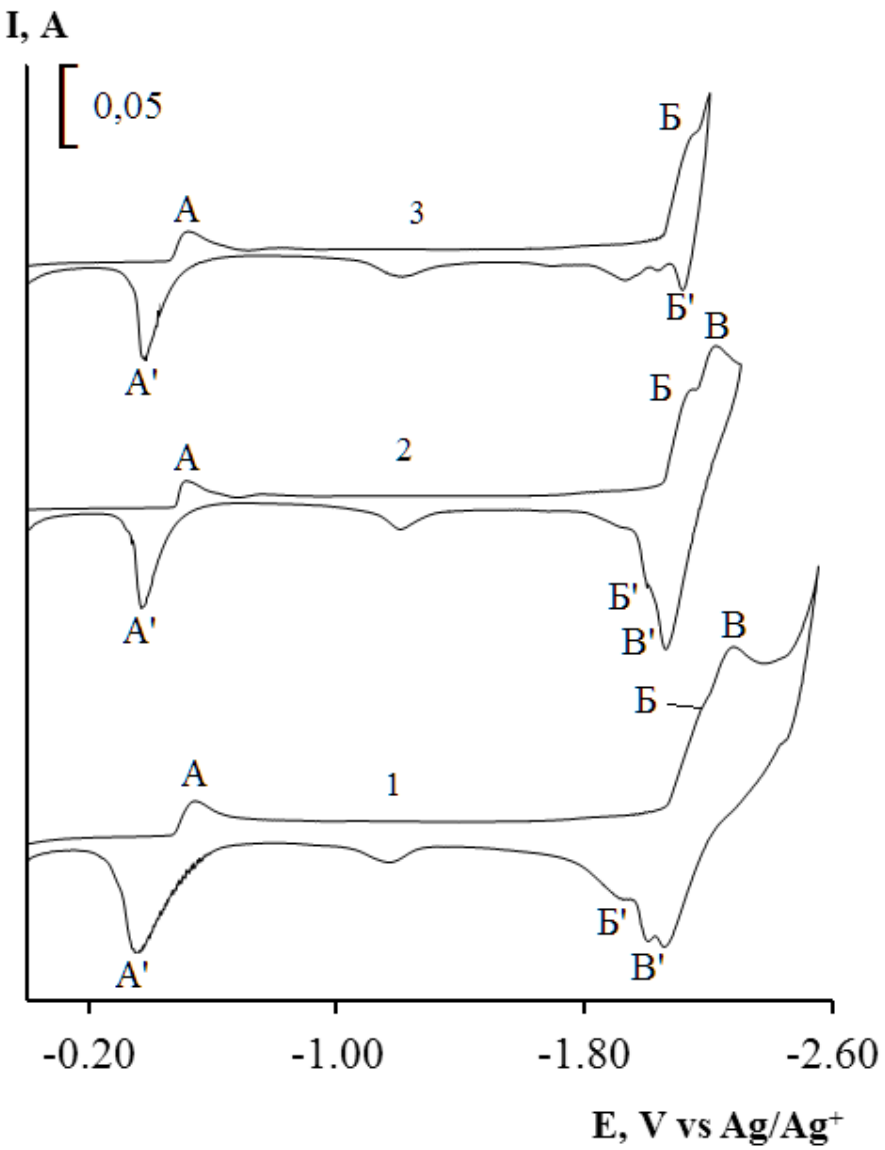

Рис. 3. Циклические хроновольтаперограммы процесса совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} на вольфрамовом электроде в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при различных потенциалах возврата: 1 –(-2,55)В; 2 – (-2,3)В; 1 – (-2,2)В; C ($NdCl_3$) =3,0×10^{-4} моль/см^3; C ($CoCl_2$) = 5,0×10^{-5} моль/см. S катода = 0,20 см^2 T = 823 K

Fig. 3. Cyclic chronovoltammograms of the process of joint electroreduction of Nd^{3+} and Co^{2+} ions on a tungsten electrode in the eutectic melt of KCl–NaCl–CsCl at different return potentials: 1 – (-2.55)V; 2 – (-2.3)V; 1 – (-2.2)V; C ($NdCl_3$) = 3.0×10^{-4} mol/cm^3; C ($CoCl_2$) = 5.0×10^{-5} mol/cm. S cathode = 0.20 cm^2 T = 823 K

Квадратно–волновая вольтамперограмма расплава KCl–NaCl–CsCl, содержащего $CoCl_2$ и $NdCl_3$ также чётко показывает наличие четырёх стадий в суммарном процессе совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} (Рис. 4). Потенциалы волн восстановления на циклической и квадратно–волновой вольтамперограммах чётко совпадают.

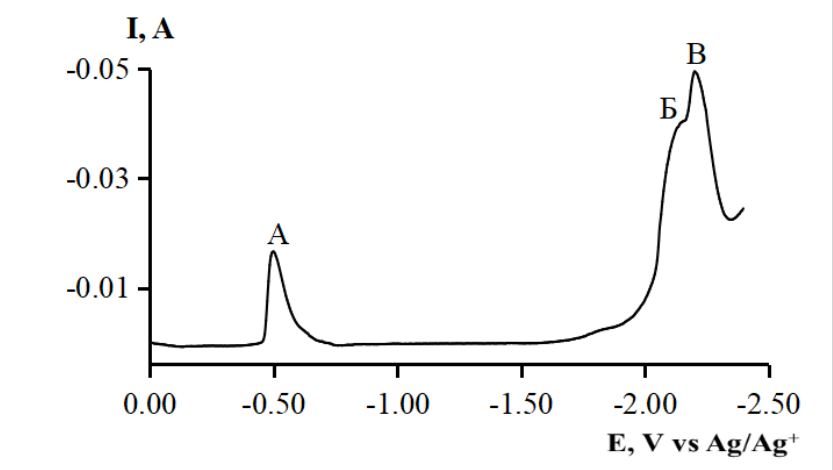

Рис. 4. Квадратно – волновая вольтамперограмма процесса совместного электровосстановления ионов Nd^{3+} и Co^{2+} на вольфрамовом электроде в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl. ω = 20 Гц; S катода = 0,20 см^2 T = 823 K. C ($NdCl_3$) =3,0×10^{-4} моль/см^3; C ($CoCl^2$) = 5,0×10^{-5} моль/см.

Fig. 4. Square-wave voltammogram of the process of joint electroreduction of Nd^{3+} and Co^{2+} ions on a tungsten electrode in a eutectic melt of KCl–NaCl–CsCl. ω = 20 Hz; S cathode = 0.20 cm^2 T = 823 K. C ($NdCl_3$) = 3.0×10^{-4} mol/cm^3; C ($CoCl_2$) = 5.0×10^{-5} mol/cm

На хронопотенциограммах разомкнутой цепи (Рис. 5) при выключении гальваностатического импульса тока, наблюдается первая ярко выраженная задержка потенциала соответствующая потенциалу растворения металлического неодима – (2,25 ± 0,02)В (плато 1).

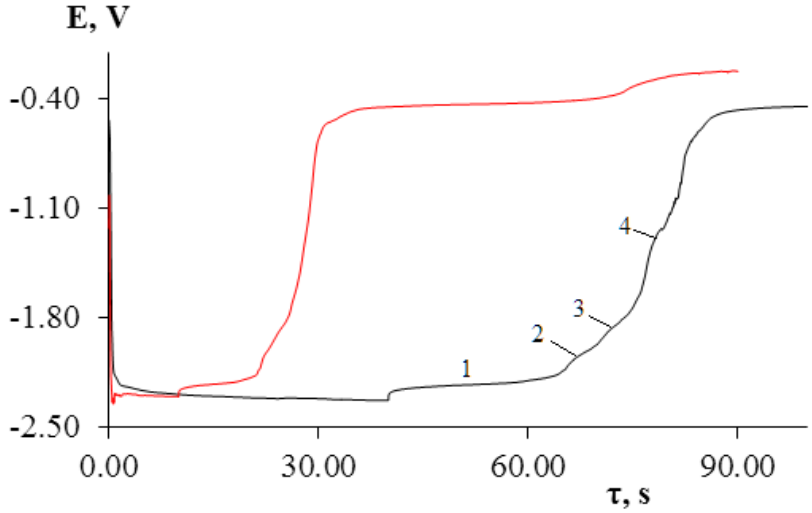

Рис. 5. Хронопотенциограммы разомнутой цепи расплава KCl–NaCl–CsCl–$NdCl_3$–$CoCl_2$ на вольфрамовом электроде при 823 K. Плотность тока поляризации i = 0,15 А/см^2; Продолжительность гальваностатического импульса 1 – 10 с; 2 – 40 с. C ($NdCl_3$) =3,0×10^{-4} моль/см^3; C ($CoCl_2$) = 5,0×10^{-5} моль/см.

Fig. 5. Chronopotentiograms of the open circuit of the KCl–NaCl–CsCl–$NdCl_3$–$CoCl_2$ melt on a tungsten electrode at 823 K. Polarization current density i = 0.15 A/cm^2; Duration of galvanostatic pulse 1 – 10 s; 2 – 40 s. C ($NdCl_3$) = 3.0×10^{-4} mol/cm^3; C ($CoCl_2$) = 5.0×10^{-5} mol/cm.

Помимо этой задержки, на кривых выключения наблюдается еще, как минимум, три задержки потенциала, находящихся в более положительной области относительно равновесного электродного потенциала Nd^{3+} / Nd_0 : при потенциалах – (2,00 ± 0,05)В (плато 2); – (1,80 ± 0,05)В (плато 3); – (1,235 ± 0,05)В (плато 4). После этих задержек потенциал вольфрамового электрода смещается к потенциалу растворения металлического кобальта.

Исходя из проведенных электрохимических измерений можно заключить, что потенциалы восстановления ионов Co^{2+} / Nd^{3+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 К различаются примерно на 1,5 В. Поэтому электрохимический синтез интерметаллических соединений неодима и кобальта возможен в кинетическом режиме. В кинетическом режиме состав интерметаллидов Nd_xCo_y . будет зависеть от состава электролита, т. е. как от концентрации трихлорида неодима и дихлорида кобальта, так и их соотношения, плотности тока при гальваностатическом электролизе. Результаты по реализации высокотемпературного электрохимического синтеза интерметаллических соединений неодима с кобальтом будут представлены нами в следующих работах.

Заключение.

Методами циклической и квадратно–волновой вольтамперометрии, хронопотенциометрии разомкнутой цепи изучено совместное электровосстановление ионов неодима и кобальта Nd^{3+} и Co^{2+} эвтектического расплава KCl–NaCl–CsCl при 823 К. Показано, что потенциалы электровосстановления ионов кобальта и неодима при различном содержании их в эвтектическом расплаве, различаются примерно на 1,5 В. При совместном содержании ионов кобальта и неодима имеет место деполяризация выделения более электроотрицательного металла – неодима, на предварительно выделившимся на вольфрамовом электроде, металлическом кобальте с образованием, различных по составу, интерметаллических соединений Nd_xCo_y . Методом хронопотенциометрии разомкнутой цепи определены потенциалы растворения интерметаллических фаз на основе неодима и кобальта.

Список использованных источников

1. *Ritter S. K.* A whole new world for rare earths. How the technologically important metals rose from obscurity to ubiquity. Chemical & Engineering News. 2017. Vol. 95, Iss. 34. Pp. 30–34.
2. *Jha A. R.* Rare earth materials: properties and applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. 371 p.
3. *Baranovskaya V. B., Karpov Yu. A., Petrova K. V., Korotkova N. A.* Modern trends in the use of rare earth metals and their compounds in metallurgy and the production of optical materials // Non-ferrous metals. 2020. No. 11. Pp. 54–62
4. *Kumar K.* $RETM_5$ and $RE2TM_{17}$ permanent magnets development. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63(6), R13–R57.
5. *Taylor K N. R.* Intermetallic rare-earth compounds // Adv. Phys. 1971. Vol. 20(87). Pp. 551–660.
6. *Strnat K. J. and Strnat R. M. W.* Rare earth-cobalt permanent magnets // J. Magn. Magn. Mater. 1991. Vol. 100(1–3). Pp. 38–56.
7. *Kirchmayr H. R. and Poldy C. A.* Magnetic properties of intermetallic compounds of rare earth metals. In Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Ed. Gschneidner K. A., Jr. and L. Eyring. North-Holland Publishing Company. 1975. Pp. 55—231.
8. *Algarabel P. A., A. del Moral, Ibarra M. R., Sousa J. B., Moreira J. M. and Montenegro J. F.* Magnetostriction of the $NdCo_5$ uniaxial permanent magnet // J. Magn. Magn. Mater. 1987. Vol. 68(2). Pp. 177–189.

9. *Klein H. P., Menth A. and Perkins R. S.* Magnetocrystalline anisotropy of light rare-earth cobalt compounds // Physica B (Amsterdam). 1975. Vol. 80. Pp. 153—163.
10. *Ouyang Z. W, Wang F. W, Huang Q, Liu W. F, Xiao Y. G, Lynn J. W, Liang J. K, and Rao G. H.* Magnetic structure, magnetostriction, and magnetic transitions of the Laves-phase compound $NdCo_2$ // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71, Iss. 6. Pp. 064405. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.064405
11. *Gratz E. and Markosyan A. S.* Physical properties of RCo_2 Laves phases // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. Vol. 13. No. 23. R385–R413.
12. *Khmelevskyi S. and Mohn P.* The order of the magnetic phase transitions in RCo_2 (R = rare earth) intermetallic compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 2000. Vol. 12, No. 45, 9453. DOI: https://doi.org/10.1088/0953-8984/12/45/308
13. *Gratz E, Lindbaum A., Markosyan A. S, Mueller H, and Sokolou A. Y.* Isotropic and anisotropic magnetoelastic interactions in heavy and light RCo_2 Laves phase compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 1994. Vol. 6, 6699.
14. *Xiao Y. G., Huang Q., Ouyang Z. W., Lynn J. W., Liang J. K., Rao G. H.* Crystal and magnetic structures of Laves phase compound $NdCo_2$ in the temperature range between 9 and 300 K // J.Alloys and compounds. 2006. Vol. 420. Pp. 29—33.
15. *Сорока В. В.* Взаимодействие редкоземельных металлов с никелем и кобальтом в хлоридных расплавах // Автореф. ... канд. хим. наук. Свердловск, 1988. 17 с.
16. *Ковалевский А. В., Сорока В. В.* // Тезисы докл. XI конф. по физической химии и электрохимии расплавленных и твердых электролитов. Екатеринбург, 1998. Т. 1. С. 227.
17. *Ковалевский А. В., Сорока В. В. Ковалевский А. В., Сорока В. В.* Реакционная емкость галогенидных расплавов, выдержанных в контакте с металлами // Расплавы. 1988. № 6. С. 28–32.
18. *Маркович С. И., Попова А. В., Семушин В. В., Кузнецов С. А.* Электрохимический синтез интерметаллических соединений кобальта с неодимом в хлоридных расплавах // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение. Вып. 5. 2021. Т. 11, № 2. С. 169–173.
19. *Edwar M.* // New Front. Rare Earth Sci. And Appl. Proc. Int. Conf. Bejing, 1985. Vol. 2. P. 1099.
20. *Abdelkader A. M., Hyslop D. J. S., Cox A. and Fray D. J.* Electrochemical synthesis and characterization of a $NdCo_5$ permanent magnet // Journal of Materials Chemistry. 2010. Vol. 20. Pp. 6039–6049. DOI: https://doi.org/10.1039/c0jm00096e
21. *Kushkhov Khasbi, Ali Zhubagi, Khotov Astemir and Kholkina Anna* Mechanism of Dy^{3+} and Nd^{3+} Ions Electrochemical Coreduction with Ni^{2+}, Co^{2+}, and Fe^{3+} Ions in Chloride Melts // Materials. 2021. Vol. 14, 7440. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14237440
22. *Kushkhov K. B., Chuksin S. I., Zhanikaeva Z. A.* Electroreduction of Neodimium and Praseodimium ions in equimolar KCl–NaCl and eutectic KCl–NaCl–CsCl melts at a tungsten electrode // Russian Metallurgy (Metally). 2013. Vol. 2013, No. 8. Pp. 610—616.
23. *Kushkhov Kh. B., Kholkina A. S., Ali Zh. Z., Khotov A. A., Pashtova L. R.* Electrochemical Behavior of Neodymium Ions and Their Combined Electroreduction with Nickel Ions in the KCl–NaCl–CsCl Eutectic Melt // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, Iss. 8. Pp. 1175—1192. DOI: https://doi.org/10.1134/S0036029523080360
24. *Kushkhov Kh. B., Khotov A. A., Ali Zh. Z. and Kisheva F. A.* Investigation of the Mechanism of the Rare-Earth Metal Ions and Nickel Ions Co-Reduction in KCl–NaCl–CsCl Eutectic Melt. // Russian Journal of Electrochemistry. 2025. Vol. 61, No. 9. Pp. 586—603.
25. *Кушхов Х. Б., Хотов А. А., Кахтан А. М. Ф.* Исследование механизма совместного электровосстановления ионов Dy^{3+} и Co^{2+} в эвтектическом расплаве KCl–NaCl–CsCl при 823 K // Доклады АМАН. 2024. Т. 24, № 1. С. 58–71. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2024-24-1-58-71; EDN: PGELNG

Поступила 13.02.2026; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 03.03.2026.

Об авторах:

Кушхов Хасби Билялович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского Государственного университета им. Х. М. Бербекова, действительный член АМАН, Заслуженный деятель науки РФ, (Нальчик, Россия), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8613-9868, SPIN-код: 8268-6590, hasbikushchov@yahoo.com

Али Жубаги Заурович, ассистент кафедры неорганической и физической химии, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), ali.zhubagi@yandex.ru

Кахтан Абдулькадер Мокбель Фархан, кандидат химических наук, руководитель химического факультета Педагогического колледжа Университета Сейюн (Сейюн, Йемен) ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8923-7867

Лигидова Марина Нургалиевна, кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической и физической химии, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6016-7236, SPIN-код: 7249-7762, adamokova1@mail.ru

Шогенова Мадина Аслановна, ведущий инженер кафедры неорганической и физической химии, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), SPIN-код: 7958-8106, madina.tlimakhova@mail.ru

References

1. *Ritter S. K.* A whole new world for rare earths. How the technologically important metals rose from obscurity to ubiquity. Chemical & Engineering News. 2017. Vol. 95, Iss. 34. Pp. 30–34.
2. *Jha A. R.* Rare earth materials: properties and applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. 371 p.
3. *Baranovskaya V. B., Karpov Yu. A., Petrova K. V., Korotkova N. A.* Modern trends in the use of rare earth metals and their compounds in metallurgy and the production of optical materials // Non-ferrous metals. 2020. No. 11. Pp. 54–62.
4. *Kumar K.* $RETM_5$ and $RE2TM_{17}$ permanent magnets development. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63(6), R13–R57.
5. *Taylor K N. R.* Intermetallic rare-earth compounds // Adv. Phys. 1971. Vol. 20(87). Pp. 551–660.
6. *Strnat K. J. and Strnat R. M. W.* Rare earth-cobalt permanent magnets // J. Magn. Magn. Mater. 1991. Vol. 100(1–3). Pp. 38–56.
7. *Kirchmayr H. R. and Poldy C. A.* Magnetic properties of intermetallic compounds of rare earth metals. In Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Ed. Gschneidner K. A., Jr. and L. Eyring. North-Holland Publishing Company. 1975. Pp. 55—231.
8. *Algarabel P. A., A. del Moral, Ibarra M. R., Sousa J. B., Moreira J. M. and Montenegro J. F.* Magnetostriction of the $NdCo_5$ uniaxial permanent magnet // J. Magn. Magn. Mater. 1987. Vol. 68(2). Pp. 177–189.
9. *Klein H. P., Menth A. and Perkins R. S.* Magnetocrystalline anisotropy of light rare-earth cobalt compounds // Physica B (Amsterdam). 1975. Vol. 80. Pp. 153—163.
10. *Ouyang Z. W, Wang F. W, Huang Q, Liu W. F, Xiao Y. G, Lynn J. W, Liang J. K, and Rao G. H.* Magnetic structure, magnetostriction, and magnetic transitions of the Laves-phase compound $NdCo_2$ // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71, Iss. 6. Pp. 064405. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.064405

11. *Gratz E. and Markosyan A. S.* Physical properties of RCo_2 Laves phases // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. Vol. 13. No. 23. R385–R413.
12. *Khmelevskyi S. and Mohn P.* The order of the magnetic phase transitions in RCo_2 (R = rare earth) intermetallic compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 2000. Vol. 12, No. 45, 9453. DOI: https://doi.org/10.1088/0953-8984/12/45/308
13. *Gratz E, Lindbaum A., Markosyan A. S, Mueller H, and Sokolou A. Y.* Isotropic and anisotropic magnetoelastic interactions in heavy and light RCo_2 Laves phase compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 1994. Vol. 6, 6699.
14. *Xiao Y. G., Huang Q., Ouyang Z. W., Lynn J. W., Liang J. K., Rao G. H.* Crystal and magnetic structures of Laves phase compound $NdCo_2$ in the temperature range between 9 and 300 K // J.Alloys and compounds. 2006. Vol. 420. Pp. 29—33.
15. *Soroka V. V.* Interaction of rare earth metals with nickel and cobalt in chloride melts //Abstract of the Candidate of Chemical Sciences. Sverdlovsk, 1988. 17 p.
16. *Kovalevsky A. V., Soroka V. V.* // Abstracts of the 11th Conference on physical chemistry and electrochemistry of molten and solid electrolytes. Yekaterinburg, 1998. Vol. 1. P. 227.
17. *Markovich S. I., Popova A. V., Semushin V. V., Kuznetsov S. A.* Electrochemical synthesis of cobalt-neodymium intermetallic compounds in chloride melts // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Chemistry and materials science. Iss. 5. 2021. Vol. 11, No. 2. Pp. 169–173.
18. *Edwar M.* // New Front. Rare Earth Sci. And Appl. Proc. Int. Conf. Bejing, 1985. Vol. 2. P. 1099.
19. *Abdelkader A. M., Hyslop D. J. S., Cox A. and Fray D. J.* Electrochemical synthesis and characterization of a $NdCo_5$ permanent magnet // Journal of Materials Chemistry. 2010. Vol. 20. Pp. 6039–6049. DOI: https://doi.org/10.1039/c0jm00096e
20. *Kushkhov Khasbi, Ali Zhubagi, Khotov Astemir and Kholkina Anna* Mechanism of Dy^{3+} and Nd^{3+} Ions Electrochemical Coreduction with Ni^{2+}, Co^{2+}, and Fe^{3+} Ions in Chloride Melts // Materials. 2021. Vol. 14, 7440. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14237440
21. *Kushkhov K. B., Chuksin S. I., Zhanikaeva Z. A.* Electroreduction of Neodimium and Praseodimium ions in equimolar KCl–NaCl and eutectic KCl–NaCl–CsCl melts at a tungsten electrode // Russian Metallurgy (Metally). 2013. Vol. 2013, No. 8. Pp. 610—616.
22. *Kushkhov Kh. B., Kholkina A. S., Ali Zh. Z., Khotov A. A., Pashtova L. R.* Electrochemical Behavior of Neodymium Ions and Their Combined Electroreduction with Nickel Ions in the KCl–NaCl–CsCl Eutectic Melt // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, Iss. 8. Pp. 1175—1192. DOI: https://doi.org/10.1134/S0036029523080360
23. *Kushkhov Kh. B., Khotov A. A., Ali Zh. Z. and Kisheva F. A.* Investigation of the Mechanism of the Rare-Earth Metal Ions and Nickel Ions Co-Reduction in KCl–NaCl–CsCl Eutectic Melt. // Russian Journal of Electrochemistry. 2025. Vol. 61, No. 9. Pp. 586—603.
24. *Kushkhov H. B., Hotov A. A., Qahtan A. M. F.* Study of the mechanism of joint electroreduction of Dy^{3+} and Co^{2+} ions in the eutectic KCl–NaCl–CsCl melt at 823 K. Adyghe Int. Sci. J. 2024. Vol. 24, No. 1. Pp. 58–71. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2024-24-1-58-71; EDN: PGELNG

Submitted 13.02.2026; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 03.03.2026.

About the authors:

Khasbi Bilyalovich Kushkhov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Inorganic and Physical Chemistry Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekova, (Nalchik, Russia), Full member of IAAS, Honored Scientist of the Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8613-9868, SPIN code: 8268-6590, hasbikushchov@yahoo.com

Zhubagi Zaurovich Ali, assistant of the Department of Inorganic and Physical Chemistry of Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekova (Nalchik, Russia), ali.zhubagi@yandex.ru

Abdulkader Moqbel Farhan Qahtan, PhD of Chemical Sciences, Head of the Chemistry Department at Seiyun University College of Education (Seiyun, Yemen), ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8923-7867

Ligidova Marina Nurgalievna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekova (Nalchik, Russia), ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6016-7236, SPIN code: 7249-7762, adamokova1@mail.ru

Shogenova Madina Aslanovna, Assistant, Department of Inorganic and Physical Chemistry, Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekova (Nalchik, Russia), SPIN code: 7958-8106, madina.tlimakhova@mail.ru