

УДК 541.135

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-9-14

Электрохимический синтез порошков интерметаллидов гольмия и никеля в галогенидных расплавах

© 2016 г. **Х.Б. Кушхов, Р.А. Карданова**

Кабардино-Балкарский государственный университет (КБГУ) им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик

Статья поступила в редакцию 18.10.15 г., доработана 26.10.15 г., подписана в печать 16.11.15 г.

Представлены результаты высокотемпературного электрохимического синтеза порошков интерметаллидов гольмия и никеля. Подобраны оптимальные условия синтеза данных соединений: температура электролиза (923–1073 К), катодная плотность тока (0,5–1,9 А/см²) и состав электролизной ванны (мол.%): KCl(48,25+49,5)–NaCl(48,25+49,5)–HoCl₃(0,5+3,0)–NiCl₂(0,5+2,5). Состав полученных порошков исследован методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии.

Ключевые слова: электрохимический синтез, интерметаллические соединения, гольмий, никель.

Кушхов Х.Б. – докт. хим. наук, проф., зав. кафедрой неорганической и физической химии КБГУ (360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173). E-mail: hasbikushchov@yahoo.com.
Карданова Р.А. – аспирантка той же кафедры. E-mail: ranetta89@mail.ru.

Для цитирования: Кушхов Х.Б., Карданова Р.А. Электрохимический синтез порошков интерметаллидов гольмия и никеля в галогенидных расплавах // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 2. С. 9–14.
 DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-9-14.

Kushkhov Kh.B., Kardanova R.A.

Electrochemical synthesis of holmium and nickel intermetallic powders in halide melts

The results of high-temperature electrochemical synthesis are presented for intermetallic nickel and holmium powders. The optimal conditions for the synthesis of these compounds were found, including: temperature of the electrolytic process (923–1073 K), cathode current density (0,5–1,9 A/cm²) and the electrolytic bath concentration ratio, mol.%: KCl(48,25+49,5)–NaCl(48,25+49,5)–HoCl₃(0,5+3,0)–NiCl₂(0,5+2,5). The resulting powder composition was studied by the X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy methods.

Keywords: electrochemical synthesis, intermetallic compounds, holmium, nickel.

Kushkhov Kh.B. – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of Department of inorganic and physical chemistry of Kabardino-Balkarian State University (360004, Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Chernyshevsky str., 173). E-mail: hasbikushchov@yahoo.com.
Kardanova R.A. – Graduate Student of the same Department. E-mail: ranetta89@mail.ru.

Citation: Kushkhov Kh.B., Kardanova R.A. Elektrokhimicheskii sintez poroshkov intermetallidov gol'miya i nikelya v galogenidnykh rasplavakh. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 2. С. 9–14.
 DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-9-14.

Введение

Широкое использование в мировом масштабе редких и редкоземельных металлов (РЗМ) предопределило развитие солнечной энергетики, сверхскоростного транспорта на магнитной подушке, инфракрасной оптики, оптоэлектроники, лазерной промышленности, ЭВМ и других отраслей [1, 2].

Сплавы РЗМ находят широкое практическое применение благодаря значительному превосходству в диапазоне изменения их свойств по сравнению с чистыми металлами. При этом для получения различных материалов редкоземельные металлы могут выступать в качестве легирующих, так и основных компонентов. Добавки РЗМ позволяют повысить прочностные характери-

сти материалов, увеличить диапазон температур их использования, придать им набор новых электрофизических свойств [3–5]. Соединения РЗМ состава РЗМNi₅ и РЗМNi₂ широко применяются в качестве катализаторов в химической и нефтехимической промышленности, а также в водородной энергетике для обратимого сорбирования больших количеств водорода [6]. Все это в полной мере относится также к сплавам и интерметаллическим соединениям (ИМС) на основе гольмия.

При взаимодействии металлов могут образовываться эвтектики, твердые растворы и ИМС. Системы гольмий–никель характеризуются существованием большого количества ИМС различ-

ного состава: HoNi , HoNi_2 , HoNi_3 , HoNi_5 , $\text{Ho}_2\text{Ni}_{17}$, Ho_3Ni , HoNi_7 , Ho_2Ni_3 [7]. Диаграммы состояния Ho—Ni еще не построены.

Интерметаллические соединения на основе РЗМ и никеля можно синтезировать различными способами [8] (СВС, твердофазный синтез, методы жидкостного бестокового насыщения, контактного обмена, гидридно-кальциевого восстановления и т.д.). Для получения чистых интерметаллидов РЗМ и выделения фаз, получение которых путем прямого сплавления затруднено, можно использовать электролиз расплавленных сред.

Литературный анализ выявил наличие единичных работ по получению интерметаллидов гольмия и никеля [9—11]. Так, авторами [9, 10] показана принципиальная возможность создания ИМС гольмия и никеля путем диффузионного насыщения никелевого электрода ионами гольмия в расплаве в KCl—HoCl_3 . В работе [11] исследовано получение ИМС гольмия и никеля диффузионным насыщением металлического никеля гольмием в расплаве KCl—NaCl . Этим способом можно получить только диффузионные покрытия.

Сущность диффузионного насыщения электроположительного металла электроотрицательным РЗМ из расплава заключается в следующем: электроположительный металл (никель) находится в расплаве соли щелочного металла с добавкой соли РЗМ (HoCl_3) в контакте с металлическим щелочным металлом. При этом создается короткозамкнутый гальванический элемент, в котором натрий является анодом, а никель — катодом. Из этих работ следует, что диффузионным насыщением получают покрытия из интерметаллидов гольмия и никеля, а не наноразмерные порошки.

Цель настоящей работы — разработка электрохимического способа получения нанопорошков интерметаллидов гольмия и никеля в галогенидных расплавах.

Методика исследования

Высокотемпературный электрохимический синтез интерметаллидов гольмия и никеля осуществляли в гальваностатическом режиме в расплаве $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$ при температуре 973 К с использованием источника постоянного тока ТЭК-14.

Идентификация и исследование полученных образцов проводились следующими методами [12—14]:

- рентгенофлуоресцентный элементный анализ — элементный анализатор «Спектроскан-МАКС-GV» (НПО «Спектрон», г. Санкт-Петербург);
- рентгенофазовый метод — рентгеновский дифрактометр ДРОН-6 (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург), рентгеновский дифрактометр «D2 Phaser» (Германия);
- дифракционный анализ — лазерный дифракционный анализатор «FritschAnalysette-22» («Nanotech», Германия);
- сканирующая электронная микроскопия — сканирующий растровый электронный микроскоп VEGA3 LMN (TESCAN, Чехия) с энергодисперсным рентгеновским микроанализатором (Oxford, Великобритания).

Источником ионов гольмия служил безводный хлорид гольмия (III) (99,99 %). Все операции взвешивания безводных хлоридов выполняли в перчаточном боксе «MbraunLabStar». Обезвоживание шестиводного хлорида никеля $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ до чистого безводного хлорида проводили с помощью тетрахлорида углерода по общеизвестной методике [15].

Электролиз осуществляли в высокотемпературной кварцевой ячейке в атмосфере инертного газа (аргон) при $T = 973$ К. Катодом служил вольфрамовый стержень высокой чистоты диаметром 3 мм, анодом — стеклоуглеродная пластинка, контейнером для расплава — алундовый тигель.

Результаты и их обсуждение

Электрохимический синтез интерметаллидов гольмия и никеля проводили в гальваностатическом режиме в расплаве $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$.

При электролизе расплавленной смеси KCl—NaCl , содержащей трихлорид гольмия (0,5—2,5 мол.%) и дихлорид никеля (0,1—2,5 мол.%), при плотности тока 0,5—2,0 А/см² на вольфрамовом электроде образуется металлосолевая «груша». Получившийся продукт в большинстве случаев не удерживается на вольфрамовом катоде и падает на дно тигля. В некоторых случаях удается удержать осадок на катоде (рис. 1).

Выщелачивание катодного осадка в горячей дистиллированной воде позволяет отделить целевой продукт от солевой фазы. После многократной промывки в дистиллированной воде осадок сушили в вакуумном сушильном шкафу при $T = 373 \pm 423$ К. Фазовый состав катодного осадка пред-



Рис. 1. Металлосолевая груша (а) и отмытый порошок интерметаллидов гольмия и никеля (б)

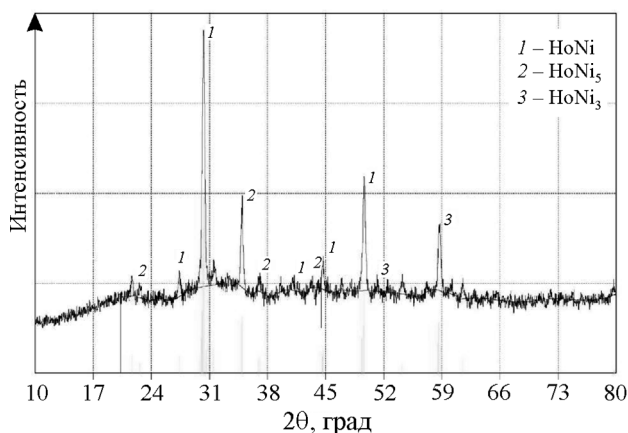


Рис. 2. Рентгенограмма продукта гальваностатического электролиза, полученного из эквимольного расплава $\text{KCl}-\text{NaCl}$, содержащего 2,5 мол.% HoCl_3 и 0,5 мол.% NiCl_2 , на вольфрамовом электроде $i_k = 1,2 \text{ A/cm}^2$, $T = 973 \text{ K}$, $S = 2,43 \text{ cm}^2$

ставлен на рис. 2 и в табл. 1. В зависимости от состава электролизной ванны и параметров электролиза получали смесь фаз металлического никеля и интерметаллидов HoNi , HoNi_5 , HoNi_3 .

Для определения оптимальных концентраций HoCl_3 и NiCl_2 необходимо учитывать, что в течение первой стадии синтеза идет выделение более электроположительного компонента — никеля.

Электровосстановление ионов гольмия начинается по мере выработки хлорида никеля. Оптимальная доля NiCl_2 составляет ~0,5 мол.%. При более высоких концентрациях NiCl_2 осадок содержит металлический никель. Изучена зависимость состава катодных осадков от содержания хлорида никеля, хлорида гольмия и их соотношения в расплаве $\text{KCl}-\text{NaCl}$ (1 : 1) (см. табл. 1).

Установлено, что содержание интерметаллидов увеличивается как при повышении концентрации хлорида гольмия в расплаве, так и при росте соотношения концентраций хлоридов гольмия и никеля (рис. 3). При соотношении концентраций $[\text{HoCl}_3] : [\text{NiCl}_2] = 1 : 1$ в катодном осадке преобладает фаза металлического никеля. С увеличением этого соотношения доля металлического никеля уменьшается, а содержание интерметаллидов HoNi , HoNi_5 , HoNi_3 возрастает. При условии $[\text{HoCl}_3] : [\text{NiCl}_2] > 5$ фаза металлического никеля в катодном осадке не обнаруживается, а образуется смесь фаз ИМС, причем преобладает фаза с большим содержанием гольмия.

Была проведена серия экспериментов в гальваностатическом режиме при различных начальных плотностях тока (0,5—2,0 A/cm^2) в электролизной ванне оптимального состава $\text{KCl}-\text{NaCl}-0,5\text{NiCl}_2-2,5\text{HoCl}_3$ (мол.%) (табл. 2). При $i_k =$

Таблица 1. Зависимость фазового состава и размера частиц продуктов гальваностатического электролиза от состава электролизной ванны $\text{KCl}-\text{NaCl}-\text{HoCl}_3-\text{NiCl}_2$

Опыт	Содержание, мол.%		$\text{NiCl}_2 : \text{HoCl}_3$	Фазовый состав	Доля частиц размером $d < 100 \text{ nm}$, об.%	Выход продукта, г/(А·ч)
	NiCl_2	HoCl_3				
1	0,5	0,5	1 : 1	Ni , HoNi , HoNi_5 , HoNi_3	22	0,36
2	0,5	1,0	1 : 2	HoNi , HoNi_5 , Ni , HoNi_3	31	0,56
3	0,5	1,5	1 : 3	HoNi , HoNi_5 , Ni , HoNi_3	28	0,67
4	0,5	2,0	1 : 4	HoNi , HoNi_5 , Ni , HoNi_3	51	0,82
5	0,5	2,5	1 : 5	HoNi , HoNi_5 , HoNi_3	69	0,92

Примечание. $\tau = 60 \text{ min}$, $T = 973 \text{ K}$, $S = 2,43 \text{ cm}^2$, $i_k = 1,2 \text{ A/cm}^2$.

$= 0,5 \text{ A/cm}^2$ в катодном осадке превалирует фаза металлического никеля и фазы ИМС с большим содержанием никеля. С увеличением начальной плотности тока доля никеля в катодном осадке уменьшается, а гольмия — возрастает. При $i_k = 1,2 \text{ A/cm}^2$ фаза металлического никеля в катодном осадке отсутствует, а из фаз ИМС преобладают фазы с большим содержанием гольмия. При

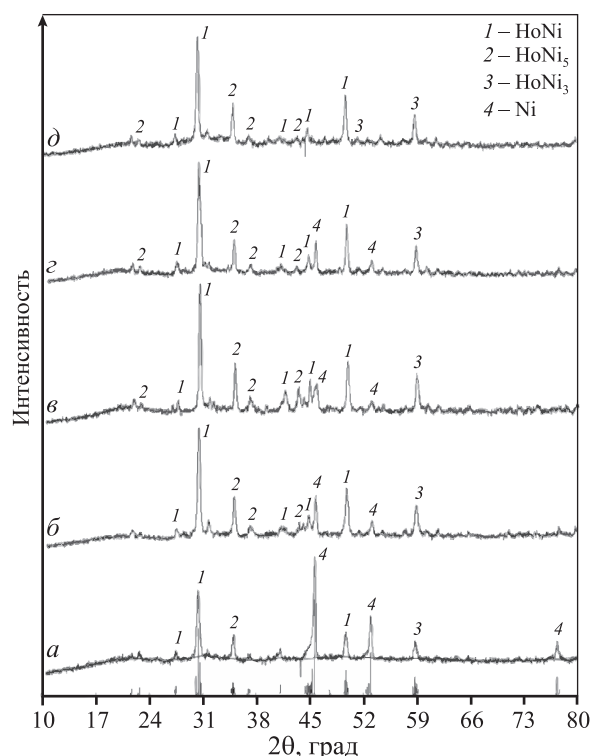


Рис. 3. Зависимость состава продуктов гальваностатического электролиза от соотношения компонентов электролизной ванны $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$
 $i_k = 1,2 \text{ A/cm}^2$, $T = 973 \text{ K}$, $S = 2,43 \text{ cm}^2$
 $[\text{NiCl}_2]:[\text{HoCl}_3] = 1:1$ (а), $1:2$ (б), $1:3$ (в), $1:4$ (г), $1:5$ (д)

плотности тока $\sim 2,0 \text{ A/cm}^2$ в катодном осадке уже появляется фаза металлического гольмия.

Установлено, что продолжительность электролиза оказывает существенное влияние на состав катодного осадка.

На рис. 4 представлен результат дисперсионного анализа порошков интерметаллидов гольмия и никеля, полученных гальваностатическим электролизом расплава $(\text{KCl—NaCl})_{\text{эвт}}\text{—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$ при соотношении $[\text{HoCl}_3]:[\text{NiCl}_2] = 5:1$, плотности тока $1,2 \text{ A/cm}^2$ и температуре 973 K .

Был проведен анализ (количественный и качественный) структуры, морфологии и элементного состава полученных образцов на сканирующем растровом электронном микроскопе VEGA3 LMN. Полученные снимки свидетельствуют о процессе совместного электровыделения гольмия и никеля (рис. 5, 6).

В табл. 3 представлена зависимость фазового состава продуктов гальваностатического электролиза в расплаве $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$ от температуры проведения синтеза. Увеличение температуры синтеза приводит к образованию металлического гольмия.

Таблица 2. Зависимость фазового состава и размера частиц продуктов гальваностатического электролиза в расплаве $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$ от плотности тока

Опыт	i_k , A/cm^2	Фазы	Доля частиц $d < 100 \text{ нм}$, об. %
1	0,5	Ni, HoNi ₅ , HoNi, HoNi ₃ , HoNi ₂	34
2	1,2	HoNi, HoNi ₅ , HoNi ₃	69
3	1,9	Ho, Ni, HoNi ₅ , Ho ₂ Ni ₁₇	79
Примечание. $\tau = 60 \text{ мин}$, $\text{HoCl}_3 - 2,5 \text{ мол. \%}$, $\text{NiCl}_2 - 0,5 \text{ мол. \%}$.			

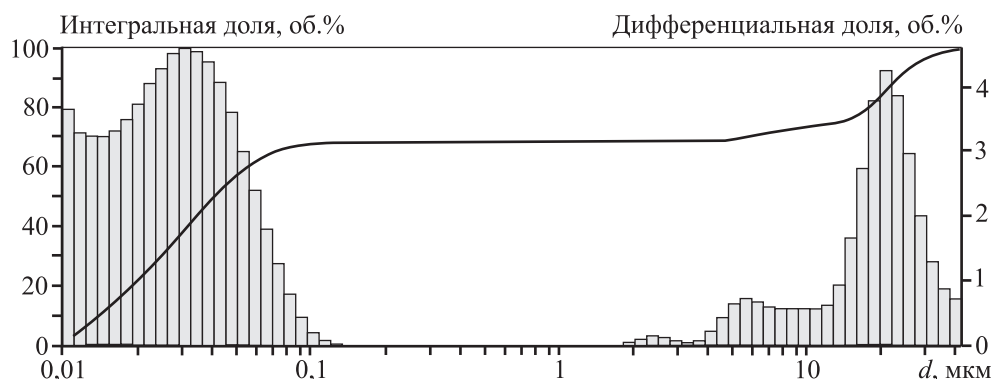


Рис. 4. Гранулометрический состав образцов, полученных гальваностатическим электролизом в системе $\text{KCl—NaCl—HoCl}_3\text{—NiCl}_2$ на вольфрамовом электроде
 $\text{HoCl}_3 - 2,5 \text{ мол. \%}$, $\text{NiCl}_2 - 0,5 \text{ мол. \%}$, $i_k = 1,2 \text{ A/cm}^2$, $T = 973 \text{ K}$, $S = 2,43 \text{ cm}^2$, диапазон измерений $d = 0,01\text{--}2000 \text{ мкм}$

Таблица 3. Зависимость фазового состава продуктов гальваностатического электролиза в расплаве $KCl-NaCl-HoCl_3-NiCl_2$ от температуры проведения синтеза

Опыт	T, K	Фазы
1	700	HoNi, HoNi ₅ , HoNi ₃
2	750	Ho, HoNi, HoNi ₅
3	800	HoNi, HoNi ₂

Примечание. $\tau = 60$ мин, $HoCl_3 - 2,5$ мол.%, $NiCl_2 - 0,5$ мол.%.

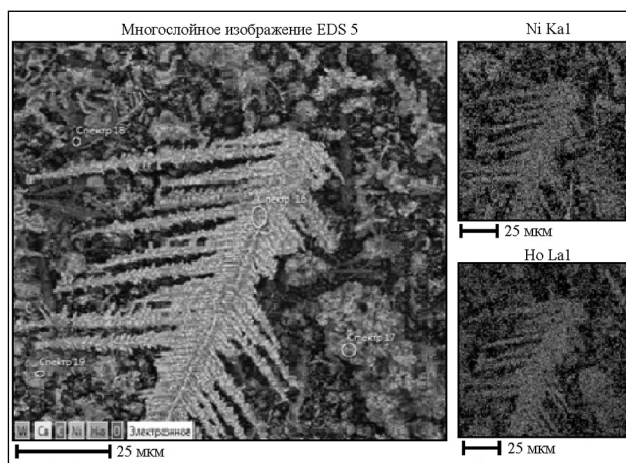


Рис. 5. Карта образца, полученная на сканирующем растровом электронном микроскопе VEGA3

Фазовый состав — HoNi, HoNi₅, HoNi₃

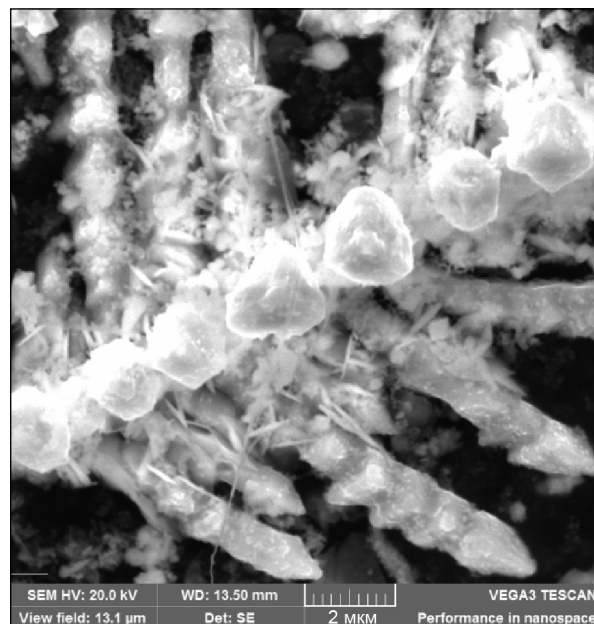


Рис. 6. Изображение продукта гальваностатического электролиза ($KCl-NaCl-HoCl_3-NiCl_2$), полученное на сканирующем растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN (увеличение 1590 \times)

Выводы

1. Проведенные исследования показали принципиальную возможность синтеза интерметаллических соединений на основе гольмия и никеля электролизом из галогенидных расплавов.

2. Подобраны оптимальные условия синтеза соединений Ho_xNi_y (состав электролизной ванны, плотность тока, продолжительность электролиза).

3. Полученные результаты рентгенофазового и лазерного дифракционного анализов частиц синтезированных порошков показывают наличие различных фаз сплава гольмия с никелем (HoNi, HoNi₅, HoNi₃) и подтверждают возможность получения их наноразмерных порошков (более 51 % частиц размером до 100 нм).

Литература

1. Савельева И.Л. Редкоземельная промышленность России: Современное состояние, ресурсные условия развития // География и природные ресурсы. 2011. No. 1. С. 122—129.
2. Михайлов Ю.М. Редкоземельные металлы как основа получения перспективных материалов, необходимых для развития вооружения и военной техники // Оборонно-промышленный комплекс России: Федерал. справочник. 2014. Т. 10. С. 127—134.
3. Новоженев В.А., Стручева Н.Е. Исследование влияния атомных факторов на величины энтальпий образования интерметаллических соединений редкоземельных металлов (РЗМ) с галлием // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. No. 3—1. С. 133—136.
4. Коллинз Д.Е., Коллинз В.П., Макгартти Д.А. Применение редкоземельных металлов: Свойства и применение редкоземельных металлов / Под ред. Е.М. Савицкого. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. С. 76—94.
5. Савицкий Е.М. Перспективы исследования и применения редкоземельных металлов, сплавов и соединений: Редкоземельные металлы и сплавы. М.: Наука, 1971. С. 5—17.
6. Кондратьев Д.А. Получение сплавов-покрытий и порошков-интерметаллидов диффузионным насыщением никеля и кобальта неодимом, диспрозиом и эрбием в хлоридных расплавах: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Киров: ВятГУ, 2013.
7. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 1997.
8. Итин В.И., Найборошенко Ю.С. Высокотемпературный электрохимический синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1989.

9. *Qiqin Y.* Electrochemistry of deposition of rare earth metals and their alloys in molten salts // Proc. 6-th Intern. Symp. on molten salt chemistry and technology (Okt. 2001). Shanghai, China, 2001. P. 383—390.
10. *Su Y.Z., Yang Q.Q., Liu G.K.* Electroreduction of Ho^{3+} on nickel cathode in molten KCl-HoCl_3 // J. Rare Earths. 2000. Vol. 18. P. 34—38.
11. *Самоделькина О.В.* Восстановление хлоридов празеодима, неодима, тербия и гольмия в ионных расплавах: Дис. ... канд. хим. наук. Екатеринбург: РГБ ОД, 2004.
12. *Васильев Е.К., Нахмансон М.М.* Качественный рентгенофазовый анализ. Новосибирск: Наука, 1986.
13. *Вилков Л.В., Пенкин Ю.А.* Физические методы исследования в химии. Резонансные и электрооптические методы: Учеб. пос. для вузов. М.: Высш. шк., 1989.
14. *Брандон Д., Каплан У.* Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004.
15. *Ревзин Г.Е.* Безводные хлориды редкоземельных элементов и скандия // Методы получения химических реактивов и препаратов. М.: ИРЕА, 1967. Вып. 16. С. 124—129.
5. *Savitskii E.M.* Perspektivy issledovaniya i primeneniya redkozemel'nykh metallov, splavov i soedinenii: Redkozemel'nye metally i splavy [Prospects of research and application rare-earth metals, alloys and their compounds]. Moscow: Nauka, 1971. P. 5—17.
6. *Kondrat'ev D.A.* Poluchenie splavov-pokrytii i poroshkov-intermetallidov diffuzionnym насыщением никеля и кобальта неодимом, диспрозием и эрбием в хлоридных расплавах [Receiving of coverings alloys and intermetallic powders by diffusive saturation of nickel and cobalt with neodymium, dysprosium and erbium in chloride melts]: Abstract of the dissertation of PhD. Kirov: VyatSU, 2013.
7. *Lyakishev N.P.* Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih system [Charts of a condition of double metal systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1997.
8. *Iitin V.I., Naiborodenko Yu.S.* Vysokotemperaturnyi elektrokhimicheskii sintez intermetallicheskikh soedinenii [High-temperature electrochemical synthesis of intermetallic connections]. Tomsk: Izd-vo Tomsk. Un-ta, 1989.
9. *Qiqin Y.* Electrochemistry of deposition of rare earth metals and their alloys in molten salts. In: Proc. 6-th Intern. Symp. on molten salt chemistry and technology (Okt. 2001). Shanghai, China. 2001. P. 383—390.
10. *Su Y.Z., Yang Q.Q., Liu G.K.* Electroreduction of Ho^{3+} on nickel cathode in molten KCl-HoCl_3 . J. Rare Earths. 2000. Vol. 18. P. 34—38.
11. *Samodelkina O.V.* Vosstanovlenie khloridov prazeodima, neodima, terbiya i gol'miya v ionnykh rasplavakh [Reduction of praseodymium, neodymium, terbium and holmium chlorides in ionic melts]: Abstract of the dissertation of PhD. Ekaterinburg: RGB OD, 2004.
12. *Vasil'ev E.K., Nakhmansson M.M.* Kachestvennyi rentgenofazovyi analiz [Qualitative X-ray phase analysis]. Novosibirsk: Nauka, 1986.
13. *Vilkov L.V., Penkin Yu.A.* Fizicheskie metody issledovaniya v khimii. Rezonansnye i elektroopticheskie metody: Uchebnoye posobie dlya vuzov. [Physical methods of research in chemistry. Resonant and electrooptical methods: Manual for higher education institutions]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989.
14. *Brandon D., Kaplan U.* Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya [Microstructure of materials. Methods of research and control]. Moscow: Tekhnosfera, 2004.
15. *Revzin G.E.* Bezvodnye khloridy redkozemel'nykh elementov i skandiya. In: *Metody polucheniya khimicheskikh reaktivov i preparatov* [Waterless chlorides of rare-earth elements and scandium. In: *Methods of receiving chemical reactants and preparations*]. Moscow: IREA, 1967. Vol. 16. P. 124—129.

References

1. *Savel'eva I.L.* Redkozemel'naya promyshlennost' Rossii: Sovremennoe sostoyanie, resursnye usloviya razvitiya [Rare-earth industry of Russia: current state, resource conditions of development]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2011. No. 1. P. 122—129.
2. *Mikhailov Yu.M.* Redkozemel'nye metally kak osnova polucheniya perspektivnykh materialov neobkhodimykh dlya razvitiya vooruzheniya i voennoi tekhniki [Rare-earth metals as basis of receiving perspective materials necessary for development of arms and military equipment]. In: *Oborono-promyshlennyy kompleks Rossii (Federal'nyi spravochnik)*. 2014. Vol. 10. P. 127—134.
3. *Novozhenov V.A., Strucheva N.E.* Issledovanie vliyaniya atomnykh faktorov na velichinu ental'pii obrazovaniya intermetallicheskikh soedinenii redkozemel'nykh metallov (RZM) s galliym [Research of influence of nuclear factors at sizes of enthalpies of formation of intermetallic compounds of rare-earth metals (RZM) with gallium]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No. 3-1. P. 133—136.
4. *Kollinz D.E., Kollinz V.P., Makgarti D.A.* Primenenie redkozemel'nykh metallov: Svoistva i primeneniye redkozemel'nykh metallov [Application redkozemel'nykh of metals: Properties and use of rare-earth metals]. Ed. E.M. Savitskii. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1960. P. 76—94.