

УРОВЕНЬ ЧИСТОТЫ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (ПО МАТЕРИАЛАМ ВЫСТАВКИ-КОЛЛЕКЦИИ ВЕЩЕСТВ ОСОБОЙ ЧИСТОТЫ)

© 2021 г. О. П. Лазукина¹, *, Е. Н. Волкова¹, К. К. Малышев¹, М. Ф. Чурбанов¹

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук,
ул. Тропинина, 49, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: lazukina@ihps-nnov.ru

Поступила в редакцию 02.07.2021 г.

После доработки 07.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

В статье обсуждается уровень чистоты щелочноземельных металлов (ЩЗМ) и их соединений, производимых в России и за рубежом. Рассмотрен примесный состав массива ЩЗМ, представленных на Выставке-коллекции веществ особой чистоты, и вклад отдельных групп примесей.

Ключевые слова: Выставка-коллекция веществ особой чистоты, примесный состав, высокочистые щелочноземельные металлы, бериллий, магний, кальций, стронций, барий

DOI: 10.31857/S0002337X21110099

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена современному состоянию получения высокочистых веществ 2-й группы Периодической системы (ПС) элементов Д.И. Менделеева и ее отражению в материалах Выставки-коллекции веществ особой чистоты, работающей на базе ИХВВ РАН с 1974 г. Состояние вопроса на конец XX века детально представлено в монографии [1]. За последние 20 лет произошло заметное повышение уровня чистоты производимых в мире простых веществ и их соединений, в том числе и щелочноземельных металлов (ЩЗМ) – на порядок по содержанию примесей металлов [1, 2].

В статье рассмотрен примесный элементный состав массива ЩЗМ, представленных в настоящее время на Выставке-коллекции. Для установления статистических характеристик примесного состава образцов по неполным данным анализа использован метод максимального правдоподобия для функции логнормального распределения примесей по концентрации без разбиения [1] и с разбиением всей совокупности примесных элементов на классы [3]. Метод позволяет получить уточненную информацию о наиболее вероятном ожидаемом среднем и суммарном содержании примесей каждого класса и всех примесей в массиве образцов. Классификация примесей зависит от природы изучаемого массива образцов и в данной работе соответствует следующему разбиению:

– газообразующие и легкие *p*-элементы (ГО и легкие) – H, C, N, O, F, Cl, B, Al, Si, P, S;

– *p*-элементы – 13 остальных стабильных элементов 13–16-й групп ПС;

– переходные металлы (ПМ) – 26 стабильных элементов 4–12-й групп ПС;

– щелочные металлы (ЩМ) – 5 стабильных элементов 1-й группы ПС;

– ЩЗМ – 5 стабильных элементов 2-й группы ПС;

– редкоземельные металлы (РЗМ) – 16 стабильных элементов 3-й группы ПС.

Приводится информация о достигнутом в настоящее время уровне чистоты ЩЗМ и их соединений в России и мире. Уровень чистоты представлен числом девяток ($6N = 99.9999$ мас. % основы, $5N5 = 99.9995$ мас. % основы и т.д.). Содержание основы для промышленных марок определяется как $(100 - Sum_{m,b})$ мас. %, где $Sum_{m,b}$ – измеренное суммарное содержание ограниченного набора лимитируемых примесей металлов (metals basis). С целью более корректного сравнения промышленных марок и образцов Выставки-коллекции для последних приводится уровень чистоты по всем примесям металлов: указана величина $(100 - Sum_{met,theor})$, мас. %, где $Sum_{met,theor}$ – теоретическая оценка суммарного содержания примесей металлов, являющаяся частью от общего содержания примесей.

ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ НА ВЫСТАВКЕ-КОЛЛЕКЦИИ ВЕЩЕСТВ ОСОБОЙ ЧИСТОТЫ

На Выставке-коллекции в настоящее время 9 образцов ЩЗМ, основная часть образцов поступила до 2000 года; в XXI веке поступили образцы кальция и магния. Образцы получены методами вакуумной дистилляции, направленной перекристаллизации и зонной плавки. Сопоставительный анализ образцов проводился в аналитических центрах ИХВВ РАН, ИПТМ РАН, АО “Гиредмет”, НИИМВ. Применялись атомно-абсорбционный метод, лазерная масс-спектрометрия, искровая масс-спектрометрия, атомно-эмиссионный метод с индуктивно связанной плазмой, масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой.

Бериллий. На Выставке-коллекции один образец бериллия (ХФТИ НАН Украины). Образец описан в [1]. Суммарное содержание примесей составляет 2×10^{-3} ат. %. Основной вклад вносит примесь свинца (7×10^{-4} ат. % или 1.6×10^{-2} мас. %), определяя степень чистоты образца на уровне 3N8. Суммарное содержание остальных примесей металлов не превышает 5×10^{-3} мас. %.

Магний. На Выставке-коллекции 3 образца магния: один из МИЭТ [1] и два из ХФТИ ННЦ Украины (последнее поступление в 2013 г.). Уровень чистоты более ранних образцов по примесям металлов составляет 4N. В образце ХФТИ 2013 г. из 71 проконтролированной примеси установлено содержание 8, их сумма равна 2×10^{-3} ат. %. Основной вклад вносят примеси хлора и цинка – по 7×10^{-4} ат. %. Оценка суммарного содержания всех примесей составляет 6×10^{-3} ат. %. Оценка суммарного содержания примесей металлов – 3×10^{-3} ат. % (5×10^{-3} мас. %), что соответствует уровню чистоты образца 4N5.

Кальций. На Выставке-коллекции 3 образца кальция, поступившие из Института химии АН Таджикистана [1], ХФТИ ННЦ Украины и ОАО “Чепецкий механический завод” (поступление в 2011 г.). Уровень чистоты более ранних образцов по примесям металлов составляет 4N и 3N5 соответственно. В образце ОАО ЧМЗ содержание 15 примесей, на которые проводился анализ, ниже пределов обнаружения, находится в интервале от 2.5×10^{-1} ат. % (примесь кислорода) до 1×10^{-4} ат. % (или от 1×10^{-1} до 2×10^{-5} мас. %). Содержание примесей 12 металлов $< 9 \times 10^{-2}$ мас. %, что соответствует уровню чистоты $> 3N$.

Стронций. На Выставке-коллекции один образец стронция (Институт химии АН Таджикистана) [1]. Оценка суммарного содержания примесей, найденная как сумма классов примесей, составляет 9×10^{-2} ат. % (6×10^{-2} мас. %). Определяющий

вклад в эту величину вносят примеси ЩЗМ. Степень чистоты образца составляет 3N4.

Барий. На Выставке-коллекции один образец бария (Институт химии АН Таджикистана) [1]. В образце проконтролирована 21 примесь металлов. Суммарное содержание примесей составляет 2×10^{-3} ат. % (1×10^{-3} мас. %). Степень чистоты образца 5N.

Соединения ЩЗМ. На Выставке-коллекции шесть образцов галогенидов ЩЗМ: $MgCl_2$, $SrCl_2$, SrI_2 , BaF_2 , BaI_2 , $BaBr_2$. Образцы поступили из АО “Гиредмет”, ИХВВ РАН и ООО “Ланхит” (4 образца в 2011 г.). Их примесный состав детально описан в [4], суммарное содержание примесей в образцах 10^{-3} – 2×10^{-2} мас. % без учета примесей кислорода и водорода. Уровень чистоты по металлам составляет 3N8–5N.

Характеристики примесного состава массива ЩЗМ. Обследованность массива 9 образцов ЩЗМ на примеси составляет 54% (общая) и 19% для примесей с измеренной концентрацией.

На рис. 1 приведена оценка среднего содержания 40 примесей с измеренной концентрацией для массива образцов ЩЗМ. Средняя концентрация отдельных примесей в массиве находится в интервале 7×10^{-7} – 1×10^{-2} ат. %; наиболее высокое значение концентрации установлено для примесей азота, кислорода и углерода. Для 35 примесей установлены средние пределы обнаружения, составляющие 1×10^{-6} – 1×10^{-4} ат. %. Таким образом, в образцах определялись фактически все примеси (кроме водорода и примесей инертных газов).

В табл. 1 приведены оценки ($-\lg$) среднего суммарного содержания Sum и содержания различных классов примесей в массиве ЩЗМ. Уточненная оценка среднего ($-\lg$) суммарной концентрации примесей во всем массиве образцов ЩЗМ, найденная как сумма оценок для всех классов примесей, составляет 1.84 ± 0.17 и значимо ниже, чем оценка во всем массиве образцов, полученная без разбиения примесей на классы (1.03 ± 0.28).

Примеси классов “ГО и легкие” и ПМ вносят основной вклад в суммарное содержание примесей в ЩЗМ, равный 8.5×10^{-3} и 5×10^{-3} ат. % соответственно. Оценка среднего суммарного содержания примесей класса ЩЗМ (аналогов) составляет 7×10^{-4} ат. %, примесей класса ЩМ 2.5×10^{-4} ат. %, р-элементов – 1×10^{-4} ат. %. Класс примесей РЗМ представлен пределами обнаружения; верхняя граница содержания примесей данного класса составляет 2×10^{-4} ат. %. Оценка среднего суммарного содержания примесей как суммы классов в “типичном” образце ЩЗМ равна 1.5×10^{-2} ат. % (1.4×10^{-2} мас. %). Среднее суммарное содержание

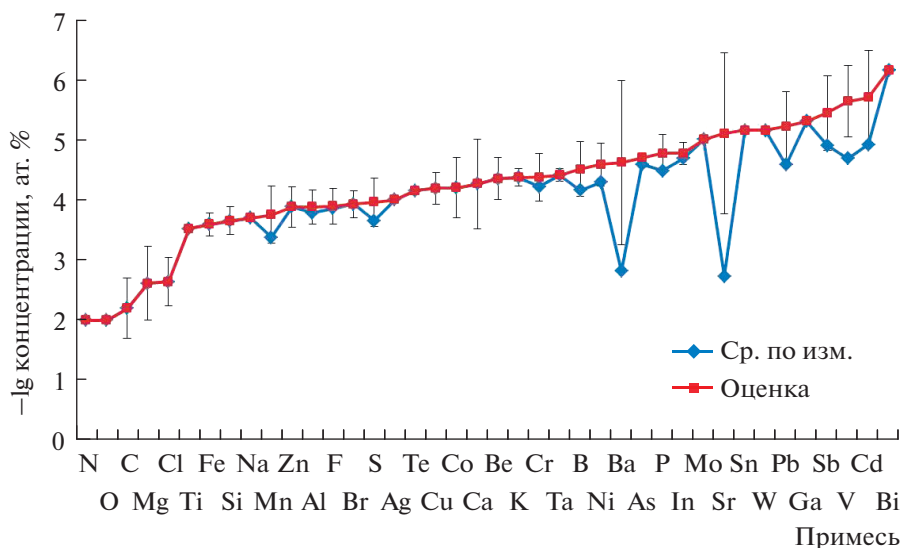


Рис. 1. Среднее содержание примесей в образцах ЩЗМ, для которых есть измеренные значения концентрации; оценки приведены с доверительными интервалами; для 11 примесей указано единственное измеренное значение концентрации.

примесей всех металлов составляет 8×10^{-3} мас. % (60% от суммы всех примесей), что соответствует среднему уровню чистоты массива образцов ЩЗМ Выставки-коллекции по металлам 4N2.

Среднее измеренное содержание примесей \bar{X} для различных классов изменяется в пределах от 5×10^{-4} ат. % для примесей ЩЗМ (аналогов) до $n \times 10^{-5}$ ат. % для примесей щелочных металлов и

p-элементов. Величина \bar{X} для примесей переходных металлов 1×10^{-4} ат. %.

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ЧИСТОТЫ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РОССИИ И МИРЕ

Достигнутый мировой уровень чистоты ЩЗМ и их соединений в настоящее время составляет

Таблица 1. Интегральные характеристики примесного состава массива образцов ЩЗМ. Разложение на классы примесей, ($-\lg$) концентрации, ат. %

Примеси	\bar{X}	S_X	\bar{Y}	S_Y	N_X	N_Y	$-\lg Sum_X$	$-\lg Sum_Y$	$-\lg Sum$	$\pm \Delta \lg Sum$
Все примеси массива (без разбиения на классы)	3.93	0.98	4.78	1.35	138	255	1.87	1.99	1.03	0.28
ГО и легкие	3.55	0.99	3.31	1.73	45	14	2.26	2.64	2.07	0.21
ПМ	4.07	0.84	4.95	1.16	56	93	2.67	3.51	2.29	0.31
ЩЗМ	3.26	1.08	4.23	1.54	12	16	2.82	3.12	3.18	0.54
ЩМ	4.15	0.42	4.17	1.48	3	23	3.93	3.28	3.60	
Остальные <i>p</i> -элементы	4.69	0.68	4.87	0.93	22	48	4.05	3.90	3.93	0.24
РЗМ			5.17	1.41	0	61		3.71	>3.71	
Сумма классов примесей									1.84	0.17

Примечание. \bar{X} , S_X — среднее и среднеквадратичное отклонение для величины $X = -\lg x$ (x — концентрация примеси); \bar{Y} , S_Y — то же для $Y = -\lg y$ (y — предел обнаружения); N_X — число примесей с установленной концентрацией; N_Y — число примесей с установленным пределом обнаружения; $-\lg Sum_X$ — ($-\lg$) среднего суммарного содержания примесей с измеренной концентрацией; $-\lg Sum_Y$ — ($-\lg$) средней суммы пределов обнаружения примесей; $-\lg Sum$, $\pm \Delta \lg Sum$ — оценка ($-\lg$) среднего суммарного содержания примесей и ее неопределенность.

Таблица 2. Достигнутый максимальный уровень чистоты ШЗМ и их соединений в России и мире

ШЗМ	Be	Mg	Ca	Sr	Ba
Зарубежные фирмы	5N	6N	5N	5N	5N
	5N*	5N	6N	5N	6N
Россия	2N	3N5 5N	3N 5N	4N5	4N8
Выставка-коллекция	3N8	4N5 3N8	4N	3N4 4N7	5N 5N

* Соединения ШЗМ (курсив).

5N–6N. Значительное число зарубежных фирм производит продукцию чистотой 3N–4N (табл. 2).

Разработки научно-исследовательских институтов СССР и СНГ. В СССР и затем в СНГ в конце XX века разработки ХФТИ НАН Украины позволили получить бериллий, магний и кальций чистотой 5N–6N [5–7]; Институтом химии АН Таджикистана были получены кальций, стронций и барий чистотой 4N4–5N4 [8]. В ИРЕА были разработаны методы получения карбонатов кальция и бария, нитратов кальция, бария и стронция чистотой до 5N, используемых для производства оптического стекла и волоконных световодов [9–11]. В АО ВНИИХТ разрабатывались технологии получения особо чистых фторидов, в том числе ШЗМ, с содержанием примесей 10^{-4} – 10^{-7} мас. % [12].

В АО “Гиредмет” и затем в ООО “Ланхит” были разработаны способы получения и глубокой очистки методами кристаллизации и дистилляции высокочистых галогенидов металлов [13, 14]; в настоящее время выпускаются высокочистые соединения ШЗМ чистотой до 5N.

В течение последних 20 лет рядом научно-исследовательских институтов (АО ВНИИХТ, НИЦ “Курчатовский институт” – ИРЕА, НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, ИНХ СО РАН и др.) были продолжены работы по развитию методов получения высокочистых и особо чистых ШЗМ и их соединений [15–18]. Разработаны технологии получения метилсиликатов, формиатов и других соединений ШЗМ с содержанием отдельных примесей металлов 10^{-4} – 10^{-7} мас. %. Организован выпуск партий фторидов бериллия, кальция, стронция, бария чистотой 2N–3N, метилсиликатов кальция, стронция, бария ОСЧ 7-4 для оптического стекловарения, карбоната бария для волоконной оптики ОСЧ 7-5а и др.

Бериллийсодержащую продукцию (фольгу, пластины, проволоку и др.) с пониженным содержанием примесей производят АО “ВНИИИМ им. академика А.А. Бочвара” и ВЭТЦ ВИАМ [19, 20]. ОАО “Всероссийский институт легких сплавов” (ОАО ВИЛС) изготавливает по технологии бес-

флюсовой плавки в инертной атмосфере слитки из магниевых сплавов чистотой 2N–2N8 [21].

Современные технологии производства бериллия из отечественного сырья в последнее десятилетие разработаны Томским политехническим университетом [22] и АО ВНИИХТ (головной исполнителем) [23].

Производство щелочноземельной продукции чистотой $\geq 2N$ в России и СНГ. Предприятия России и СНГ производят кальций и магний чистотой до 3N–3N5.

Производство бериллия, стронция, бария в форме простого вещества из собственного сырья в России в настоящее время отсутствует [24–26].

ООО “Ланхит” производит соединения ШЗМ чистотой до 5N. Ряд предприятий выпускает соединения ШЗМ квалификации “ос. ч.” для оптического стекловарения и волоконной оптики. Выпускается востребованная номенклатура соединений ШЗМ чистотой 2N–3N.

Бериллий поставляется в Россию в основном из Казахстана. Остальная часть бериллия производится путем переработки вторичного бериллийсодержащего сырья на базе ФГУП “Базальт” [24]. Чистота слитков в обоих случаях, по данным производителей, составляет 2N–2N5 [27, 28]. Стратегией развития промышленности редких и редкоземельных металлов в Российской Федерации на период до 2035 года планируется создание полного цикла бериллиевого производства на базе Малышевского изумрудно-бериллиевого месторождения в Свердловской области [24].

Магний в России производят в основном два предприятия: ОАО “Соликамский магниевый завод” и АВИСМА – филиал ОАО “Корпорация ВСМПО-АВИСМА” [25]. Основной вид сырья для производства магния – карналлит, добываемый на Соликамском месторождении. Оба предприятия, по данным производителей, выпускают магний чистотой 3N–3N5 [29].

В настоящее время ОАО “Чепецкий механический завод” – один из крупнейших мировых производителей *кальция* и единственный в России и Европе [25]. Завод производит металлический кальций в виде слитков, кусков, стружки, крупки

и гранул. Освоено производство кальциевой инжекционной проволоки. На Выставке-коллекции имеется образец кальция производства ОАО ЧМЗ чистотой $\geq 3N$.

Основным предприятием по выпуску стронция в СССР и СНГ был Тамохуш-Исфаринский гидрометаллургический завод в Таджикистане; здесь же производилась вся номенклатура стронциевой продукции ($SrCO_3$, $SrSO_4$, $Sr(NO_3)_2$, $SrCrO_4$ и др.) [26,30]. Уровень чистоты стронция составлял 2N, соединений — до 2N7.

В СССР и СНГ барий чистотой 2N6 производили Тамохуш-Исфаринский гидрометаллургический завод [30], “Уральский завод химических реактивов” (Свердловская область, Верхняя Пышма).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце прошлого века в СССР и затем России и СНГ были разработаны методы получения ЩЗМ в форме простого вещества и соединений ЩЗМ чистотой 5N–6N. Уровень зарубежных фирм в то время составлял 4N [1, 2].

В XXI веке российскими институтами продолжена разработка методов получения широкой гаммы соединений ЩЗМ чистотой ~5N.

В настоящее время в России выпускаются соединения ЩЗМ чистотой 5N, соответствующие современному мировому уровню. Чистота элементарных бериллия, магния и кальция не выше 2N, 3N5 и 3N соответственно; стронций и барий в форме простых веществ не производятся.

Чистота образцов ЩЗМ Выставки-коллекции в форме простых веществ, поступивших в основном в последней четверти XX века, в целом соответствует достигнутому в то время мировому уровню. Структура примесного состава образцов свидетельствует о сопоставимом вкладе газообразующих примесей и примесей металлов в суммарное содержание.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках темы № 0095-2019-0002 “Развитие Постоянно действующей выставки-коллекции веществ особой чистоты. Базы данных по высокочистым веществам и материалам для микроэлектроники и фотоники” государственного задания ИХВВ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Девятых Г.Г., Карпов Ю.А., Осипова Л.И.* Выставка-коллекция веществ особой чистоты М.: Наука, 2003. 236 с.
2. *Karpov Yu.A., Churbanov M.F., Baranovskaya V.B., Lazukina O.P., Petrova K.V.* High Purity Substances – Prototypes of Elements of Periodic Table // *Pure Appl. Chem.* 2020. V. 92. № 8. P. 1357–1366. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1205>

3. *Малышев К.К., Лазукина О.П., Волкова Е.Н., Чурбанов М.Ф.* Новая методика оценки среднего и суммарного содержания примесей в образцах высокочистых веществ // *Неорган. материалы.* 2016. Т. 52. № 3. С. 356–366.
4. *Лазукина О.П., Малышев К.К., Волкова Е.Н., Чурбанов М.Ф.* Примесный состав высокочистых твердых галогенидов // *Неорган. материалы.* 2019. Т. 55. № 12. С. 1351–1362.
5. *Зеленский В.Ф., Тихинский Г.Ф., Ажажа В.М.* Получение особо чистых редких и редкоземельных металлов и некоторые их свойства // *Высокочистые вещества.* 1994. № 3. С. 66–75.
6. *Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Крюков В.Б., Тихинский Г.Ф.* Получение высокочистого кальция и исследование некоторых его свойств // *Вопросы атомной науки и техники.* Сер.: ФРП и РМ. 1994. Вып. 3(63). С. 129.
7. *Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Ковтун Г.П., Неклюдов В.Е.* Получение и свойства особо чистых редких металлов // *Тез. докл. XIII Всероссийской конф. “Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение”.* Нижний Новгород, 2007. С. 15–18.
8. *Ваховов А.В., Вигдорович В.Н., Худайбердиев В.Г., Насырова М.К., Дусматова М.З.* Получение кальция, стронция и бария высокой чистоты комбинационными методами // *Вопросы атомной науки и техники.* Сб. “Материалы совещания по вопросам получения и исследования свойств чистых металлов” Харьков: ХФТИ АН УССР. 1977. С. 17–22.
9. *Факеев А.А., Князева А.Н., Родимцева И.Ю., Козачок А.И., Савельева Л.В.* Исследование в области получения карбонатов кальция и бария особой чистоты // *Получение веществ для волоконной оптики.* ГГУ, 1980. С. 106–108.
10. *Серебrenикова Г.М., Тараненко Н.П., Степин В.Д., Мазенова Н.П.* Эффективность очистки нитрата бария от анионных примесей методом кристаллизации из раствора // *Получение веществ для волоконной оптики.* ГГУ, 1980. С. 111–113.
11. *Факеев А.А., Князева А.Н., Козачок А.И., Родимцева И.Ю.* Использование процессов соосаждения в технологии продуктов для волоконной оптики // *Получение веществ для волоконной оптики.* ГГУ, 1980. С. 104–105.
12. *Федоров В.Д.* Разработка технологий получения чистых соединений редких металлов // *ВНИИХТ – 50 лет. Юбилейный сборник трудов.* 2001. С. 284–295.
13. *Нисельсон Л.А., Третьякова К.В., Гасанов А.А., Чувилина Е.Л.* Неорганические галогениды высокой чистоты. Из опыта получения // *Тез. докл. XI Всероссий. Конф. “Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение”.* ижний Новгород, 2000. С. 8–9.
14. *Чувилина Е.Л., Гасанов А.А.* Получение безводных неорганических галогенидов для выращивания монокристаллов // *Сб. тр. XIII Российско-китайского симп. “Новые материалы и технологии”.* Т. 2. М.: Интерконтакт Наука, 2015. С. 762–766.

15. *Факеев А.А., Сухановская А.И.* Исследование и разработка метода получения формиата кальция особой чистоты // Журн. прикл. химии. 2006. Т. 79. № 1. С. 3–7.
16. *Стрельникова И.Е., Гринберг Е.Е., Беляков А.В., Ивлева Ю.В., Левин Ю.И., Иванов С.В., Жариков Е.В.* Получение высокочистого форстерита методом алкоксотехнологии // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № S1–2. С. 97–100.
17. *Коцарь М.Л., Таланов А.А.* Термодинамика процессов получения кальция высокой чистоты // Журн. неорганической химии. 2016 Т. 61. № 3. С. 362–368.
18. *Матясова В.Е., Коцарь М.Л., Ананьев А.В., Алекберов З.М., Быков А.Д.* Ионообменные процессы переработки сульфатных растворов и пульп с получением высокочистых соединений бериллия // Атомная энергия. 2015 Т. 119. № 6. С. 331–335.
19. <http://bochvar.ru/products/berillievye-folgi-i-rentgenovskie-okna/>
20. http://vetc.viam.ru/products_vetc
21. <https://oaovils.ru/production/product/146/147/>
22. <https://news.tpu.ru/news/2017/01/01/26563/>
23. ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2021 годы”. Комплексный проект ПНИЭР: “Разработка инновационной технологии получения бериллийсодержащих концентратов и гидроксида бериллия из минерального и техногенного сырья”, 2015–2017 гг. Головной исполнитель – АО “ВНИИХТ”. http://fcpir.ru/participation_in_program/contracts/14.582.21.0008/
24. Стратегия развития промышленности редких и редкоземельных металлов в Российской Федерации на период до 2035 года. https://minpromt-org.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda
25. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 24-20. Производство редких и редкоземельных металлов. М.: Бюро НТД, 2020. 338 с.
26. *Левченко Е.Н., Быховский Л.З., Тигунов Л.П.* Стронций России: нереализованные возможности // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. 2007. № 6. С. 13–19.
27. www.ulba.kz.
28. www.sarbazalt.ru.
29. www.cmz.pf.
30. <https://www.tajik-gateway.org/wp/industry/himicheskaya-promyshlennost/aoot-tamohush-isfarinskij-gidrometal/>