

**МАГНИТОХИМИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ
ПРИРОДНЫХ ИЗОТОПОВ ^{25}Mg , ^{235}U и ^{187}Os**

Я.О. ШАБЛОВСКИЙ

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru

Поступило 23.11.2021

Исследованы возможности магнитохимического выделения изотопов ^{25}Mg , ^{235}U и ^{187}Os . Выделение изотопов ^{25}Mg и ^{235}U основывается на различиях магнитных моментов сепарируемых атомов, а выделение изотопа ^{187}Os – на двух явлениях: накоплении ^{187}Os в рениевых породах в результате β -распада изотопа ^{187}Re и аномально низкой магнитной восприимчивости оксида OsO_2 , позволяющей обеспечить магнитоиндуцированную селективность восстановления осмия(VIII) до осмия(IV).

Библ. ссылок 30

Введение

Хорошо известно [1], что изотопные эффекты существенно расширяют возможности химического синтеза. Свойства химических элементов в моноизотопном состоянии могут разительно отличаться от свойств тех же элементов в состоянии естественной смеси изотопов [2]. У некоторых элементов свойства моноизотопных фаз уникальны (см., например, [3, 4]).

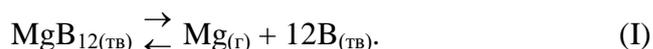
Классическое решение проблемы разделения изотопов основывается на прямом или косвенном использовании масс-зависимых эффектов, важнейшими из которых являются газовая диффузия и в особенности газовое центрифугирование. Перспективной альтернативой длительное время считалось химическое обогащение – использование реакций изотопного обмена [5, 6], но в последние годы это направление уступило приоритетное положение лазерному разделению изотопов [7]. Между тем, некоторые природные изотопы можно выделить магнитохимичес-

ким путём. Недавно эта возможность была исследована применительно к сепарации изотопов углерода [8] и экспериментально апробирована при фракционировании изотопов ртути, таллия и свинца [9]. Здесь, опираясь на наши предшествующие результаты [10], мы исследуем возможности магнитохимического выделения изотопов ^{25}Mg , ^{235}U и ^{187}Os .

Выделение изотопа ^{25}Mg

Магний встречается в природе в виде трёх стабильных изотопов: ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg . Недавно было обнаружено [11], что изотоп ^{25}Mg , отличающийся от изотопов ^{24}Mg и ^{26}Mg наличием у ядра его атома собственного магнитного момента $\hat{\mu} = -0,85545\mu_B$, ускоряет ферментативный гидролиз аденозинтрифосфата (АТФ) миозином. Скорость фосфорилирования аденозиндифосфата фосфокреатинкиназой, АТФ-синтетазой и глицерофосфаткиназой с ионом $^{25}\text{Mg}^{2+}$ оказалась в 2–3 раза выше, чем скорость образования АТФ теми же ферментами и в тех же условиях, но с ионами $^{24}\text{Mg}^{2+}$ и/или $^{26}\text{Mg}^{2+}$. При этом скорости синтеза АТФ ферментами с $^{24}\text{Mg}^{2+}$ и с $^{26}\text{Mg}^{2+}$ не различались. Результаты [11], надёжно установленные как на выделенных, изолированных ферментах, так и в митохондриях, означают, что препараты ^{25}Mg , особенно в сочетании с пиридоксином, способны существенно повысить адаптационные способности военнослужащих при экстремальных физических нагрузках.

Для выделения ^{25}Mg целесообразно использовать термическое разложение додекаборида магния MgB_{12} в постоянном магнитном поле, а точнее, магнитоселективную инверсию реакции



Ранее [10, 12] нами были определены соотношения магнитных характеристик компонентов реакционной смеси, при которых постоянное магнитное поле h может активировать термодинамически запрещённую реакцию либо, наоборот, подавить реакцию, протекающую при $h=0$. Бор и додекаборид магния отличаются очень слабым диамагнетизмом, и вносимые ими вклады в магнитохимическую эксергию реакционной смеси (I) взаимно компенсируются. По этой причине протекание реакции (I) при наложении магнитного поля определяется парамагнетизмом металлического магния.

Воздействие магнитного поля на вещество заключается в упорядочении "молекулярных токов" – внутримолекулярных и внутриатомных миграций зарядовой плотности [13]. Вещество парамагнитно, если каналы этих миграций заряда являются жёсткими, т.е. магнитное поле

h не влияет на их кривизну, а только упорядочивает пространственные ориентации микроскопических магнитных моментов, обусловленных этими миграциями заряда. Такая регуляризация обеспечивает формирование макроскопической намагниченности, сонаправленной полю h и тем самым усиливающей магнитное поле в объёме парамагнетика. В свою очередь, диамагнетизм вещества означает, что каналы молекулярных токов – нежёсткие и искривляются в результате внесения такого вещества в магнитное поле. Возникающие при этих искривлениях магнитные моменты противоположны полю h и потому ослабляют магнитное поле в объёме диамагнетика.

В свете сказанного ясно, что, в отличие от магнитной восприимчивости парамагнетиков, магнитная восприимчивость диамагнитных веществ не зависит от собственных магнитных моментов ядер их атомов.*) Парамагнетизм природного магния, состоящего преимущественно из немагнитных изотопов ^{24}Mg (78,60%) и ^{26}Mg (11,29%), выражен слабо ($\chi = 13.1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$ [15]) и практически не зависит от температуры. Моноизотопному ^{25}Mg с учётом наличия у ядра его атома собственного магнитного момента соответствует значительно бóльшая магнитная восприимчивость, зависящая от температуры по закону Кюри-Вейсса. Так, температуре $T = 1000\text{K}$ соответствует $\chi \approx 100 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$. В силу этих различий магнитное поле, подавляя образование парамагнитных веществ (см. [10, 12]), при осуществлении реакции (I) будет действовать преимущественно на ^{25}Mg . Расчёт по экспериментальным данным [16, 17] показал: сочетание температуры T и напряжённости магнитного поля h , удовлетворяющее ограничению

$$6.55 \cdot 10^{-6} h^2 < -\Delta_r G(T) < \frac{0.04574 h^2}{T}, \quad (1)$$

$$\Delta_r G(T) = 0.264T \ln T - 2.402T - 0.35T^2 - \frac{292482}{T} + 31646, \text{ кДж/моль}, \quad (2)$$

при проведении реакции (I) обеспечит возгонку смеси изотопов ^{24}Mg и ^{26}Mg с накоплением ^{25}Mg в твёрдом остатке разложения MgB_{12} .

Выделение изотопа ^{235}U

Природный уран на 99,2745% состоит из изотопа ^{238}U , а содержание ^{235}U обычно не превышает 0,72%. Промышленные методы обогащения урана изотопом ^{235}U , необходимым для осуществления самоподдерживающихся цепных ядерных реакций, основаны на различии масс ядер ^{238}U и ^{235}U , а потому весьма трудоёмки и низкопроизводи-

*) Это наглядно проявляется при сопоставлении свойств H_2O и D_2O , молярные магнитные восприимчивости которых совпадают (см. [14]).

тельны. Целесообразно обогащение урана, основанное на более существенном физико-химическом различии его изотопов.

Такое различие обеспечивается основным законом парамагнетизма:

$$\mu^2 = 8C_W, \quad (3)$$

где μ – эффективный магнитный момент, C_W – константа Кюри-Вейсса (см. [18]). В отличие от изотопа ^{238}U , а также примесного изотопа ^{234}U , изотоп ^{235}U обладает ненулевым магнитным моментом $\hat{\mu} = -0,35\mu_B$ [19], наличие которого существенно усиливает парамагнитные свойства. Результаты количественной оценки этого усиления, произведённой нами по формуле (3) с использованием стандартных справочных данных, представлены в таблице.

Изотопные различия констант Кюри-Вейсса

Вещество	^{238}U	^{235}U	$^{238}\text{UH}_3$	$^{235}\text{UH}_3$	$^{238}\text{UF}_3$	$^{235}\text{UF}_3$	$^{238}\text{UF}_4$	$^{235}\text{UF}_4$
C_W	0,123	0,225	1,861	2,214	1,532	1,854	1,052	1,321

Практический интерес представляет магнитоиндуцированная инверсия реакций



позволяющая осуществить химическое обогащение урана изотопом ^{235}U .

Реакция (II) при $T > T' = 498\text{K}$ протекает в прямом направлении, но при дальнейшем повышении температуры инвертируется: при $T > T'' = 695\text{K}$ начинается интенсивное разложение гидрида урана, причём на скорости обоих процессов влияет парциальное давление водорода

$$\log p_{\text{H}_2} = 9,465 - \frac{4710}{T},$$

где $[p_{\text{H}_2}] = \text{mm Hg}$ [20]. С учётом этого температурная зависимость изменения молярной энергии Гиббса реакционной смеси при осуществлении процесса (II) выражается равенством

$$\vec{\Delta}_r G(T) = 1,441T - 0,141T \ln T - 365, \text{ кДж/моль}. \quad (4)$$

Благодаря различию парамагнитных свойств изотопов ^{235}U и ^{238}U (см. таблицу) воздействие магнитного поля в температурном интервале

$T' < T < T''$ позволяет индуцировать селективную инверсию реакции (II), а именно, разложение гидроксида урана, затрагивающее только $^{235}\text{U}\text{H}_3$. Это возможно, если сочетание температуры и напряжённости магнитного поля удовлетворяет требованию

$$\frac{1,738h^2}{T} < \bar{\Delta}_r G(T) < \frac{1,989h^2}{T}. \quad (5)$$

Процесс (II) реализуется при сравнительно низкой температуре, также на него не влияет множественный полиморфизм урана, затрудняющий управление химическими взаимодействиями урана при $942\text{K} < T < 1049\text{K}$. Для выделения изотопа ^{235}U также можно использовать процесс (III), отличающийся от процесса (II) наличием двух альтернативных рабочих интервалов температуры: *) 1) $1049\text{K} < T < 1408\text{K}$ – область устойчивости высокотемпературной модификации твёрдого урана; 2) $T > 1408\text{K}$ – область устойчивости жидкого урана.

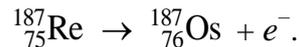
Селективное магнитохимическое инвертирование реакции (III), т.е. разложение $^{235}\text{UF}_3$ с образованием ^{235}U и $^{235}\text{UF}_4$, не затрагивающее $^{238}\text{UF}_3$, будет иметь место, если сочетание температуры и напряжённости магнитного поля удовлетворяет требованию

$$\frac{1,424h^2}{T} < \bar{\Delta}_r G(T) < \frac{1,614h^2}{T}. \quad (6)$$

Ограничение (6) определяет температурно-полевые режимы магнитохимического обогащения урана изотопом ^{235}U в обоих вышеуказанных рабочих интервалах процесса (III). Соответствующие этим интервалам выражения $\bar{\Delta}_r G(T)$ здесь не приведены из-за неполноты доступных данных о температурной зависимости теплоёмкости $C_p(T)$ трифторида урана: на современном этапе известна только линейная аппроксимация [22] $C_p(T) = 0,03354T + 117,81$ Дж/(моль·К), недостаточная для корректного расчёта инверсии реакции (III).

Выделение изотопа ^{187}Os

Металлический осмий, получаемый из платиноидного сырья, представляет собой смесь сопоставимых количеств изотопов ^{192}Os , ^{190}Os , ^{189}Os , ^{188}Os с примесью ^{186}Os и ^{184}Os (~1,55% и ~0,02% соответственно). Помимо перечисленных шести стабильных изотопов существует также стабильный изотоп ^{187}Os [23], который может образовываться в результате β^- -распада



*) Именно из-за этой двойственности так сильно разнятся экспериментальные оценки температуры инверсии реакции (III): от 1325 К до 1770 К [21].

Природный рений состоит из смеси стабильного изотопа ^{185}Re (37,4 %) и изотопа ^{187}Re (62,6 %). Последний нестабилен в силу правила изобар Щукарёва–Маттауха, однако период полураспада ^{187}Re превышает $4 \cdot 10^{10}$ лет, т.е. соизмерим с возрастом Вселенной. В рудах изотоп ^{187}Os всегда сопутствует рению [24], но даже в наиболее богатых рением порфировых молибденит-халькопиритных рудах Каджаранского месторождения (Республика Армения) содержание Re не превышает 800 г/т [25]. Как правило, концентрации первичного рения и вторичного осмия ещё меньше, поэтому накопление ^{187}Os в рениевых породах рассматривалось главным образом в контексте петрогенетической и геохронологической индикации [26, с. 108-109]. Тем не менее, поскольку осмий в ренийсодержащих меденосных песчаниках и сланцах, а также в медно-молибденовых отложениях вторичных кварцевых пород на 98,75 – 99,5 % состоит из ^{187}Os [24], его извлечение позволяет получить металлический осмий в моноизотопном состоянии.

Стандартная технология промышленного получения металлического осмия [27], основанная на окислительной обработке сырья с целью получения легколетучего OsO_4 и последующей высокотемпературной отгонке этого оксида, рассчитана на переработку платиноидного сырья, т.е. на переработку малых количеств богатого сырья. Прогнозируя это принципиальное ограничение, авторы [28] построили на тех же принципах технологическую схему для извлечения ^{187}Os из жидких и твёрдых промпродуктов медного производства, т.е. для переработки больших объёмов ультрабедного сырья. На протяжении последующих трёх десятилетий эта технологическая схема, по сути, не менялась [29]. Между тем, намного более эффективно первичное концентрирование ^{187}Os не в форме легколетучего OsO_4 , а в форме нелетучего OsO_2 с использованием в качестве сырья дисперсной фазы побочных продуктов переработки ренийсодержащих руд (шламы, послеэкстракционные межфазные суспензии, продукты осаждения из маточных растворов).

Предлагаемый способ выделения изотопа ^{187}Os включает получение первичного осмиевого концентрата, его смешивание с измельчённым щелочным агентом, получение вторичного осмиевого концентрата спеканием смеси и выделение черного металла. Первичный осмиевый концентрат получают в виде твёрдого продукта обработки сырья растворителем, проведённой в две последовательные стадии с отфильтровыванием нерастворившейся фракции на каждой стадии. На первой стадии в качестве растворителя используют легкокипящий органический восстановитель, предпочтительно в сочетании с обработкой раствора постоянным магнитным полем. На второй стадии в качестве растворителя используют дистиллированную воду. Вторичный осмиевый

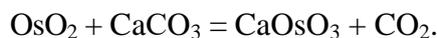
концентрат получают в виде оксида кальция-осмия(IV) CaOsO_3 , а черновой металл выделяют из него прокаливанием в атмосфере азота при температуре $880^\circ \pm 10^\circ \text{C}$ с последующим промыванием продукта прокаливания дистиллированной водой. В качестве щелочного агента используют карбонат кальция либо гидроксид кальция, а спекание смеси проводят при температуре $540^\circ \pm 10^\circ \text{C}$.

Использование в качестве сырья дисперсной фазы побочных продуктов переработки ренийсодержащих руд обеспечивает первичное геохимическое изотопное обогащение осмия.

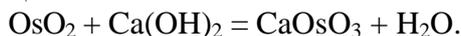
При обработке сырья органическим растворителем, во-первых, удаляется значительная часть примесей органических веществ, а во-вторых, обеспечивается восстановление осмия(VIII) до осмия(IV), соединения которого нерастворимы в воде, т.е. обеспечивается концентрирование осмия в твёрдой фракции. По сравнению с другими соединениями осмия(IV) оксид OsO_2 имеет аномально низкую магнитную восприимчивость [30]. С учётом этого восстановление осмия(VIII) до осмия(IV) органическим растворителем целесообразно проводить в постоянном магнитном поле, воздействие которого существенно повысит селективность восстановления осмия(VIII) до осмия(IV) путём образования OsO_2 (см. [10]).

Твёрдая фракция, полученная на первой стадии обработки сырья растворителем, помимо осмия содержит рений в форме водорастворимых перренатов. Вторая стадия обработки сырья растворителем с использованием дистиллированной воды даёт сразу два редкометалльных концентрата: перренат-ионы переходят в водный раствор, а осмий сосредоточивается в отфильтровываемом первичном осмиевом концентрате.

При спекании смеси первичного осмиевого концентрата с щелочным агентом при температуре $540^\circ \pm 10^\circ \text{C}$ образуется вторичный осмиевый концентрат в виде оксида кальция-осмия(IV) CaOsO_3 . При использовании в качестве щелочного агента карбоната кальция протекает реакция



При использовании в качестве щелочного агента гидроксида кальция протекает реакция



Прокаливание оксида кальция-осмия(IV) в атмосфере азота при температуре $880^\circ \pm 10^\circ \text{C}$ приводит к получению изотопно-обогащённого черного осмия в результате протекания реакции



Промывание продукта прокаливания дистиллированной водой позволяет отделить полученный осмий от оксида кальция.

Приведём примеры.

Пример 1 (переработка отходов производства меди).

290 г тёмного осадка, образовавшегося на границе органической фазы после реэкстрагирования рения гидратом аммиака из 8%-го раствора технического триалкиламина в керосине с добавлением трибутилфосфата, растворяли в 2,5 л этилового спирта в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Нерастворившуюся осмийсодержащую фракцию отделяли стеклянным фильтром (Класс 4), после чего растворяли в 1 л дистиллированной воды в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Полученный раствор отделяли от твёрдого остатка стеклянным фильтром (Класс 4) и направляли на переработку с целью извлечения рения, а твёрдый остаток смешивали с измельчённым гидроксидом кальция. Спекание смеси проводили при температуре 550 °С в течение 2 часов. Полученный вторичный осмиевый концентрат измельчали в течение 2 мин ультразвуковым низкочастотным диспергатором УЗД1-1,0/22 с частотой 22 кГц и интенсивностью 15 Вт/см², после чего прокаливали в атмосфере азота при температуре 880 °С в течение 40 мин. После промывания продукта прокаливания дистиллированной водой получили 720 мг черного осмия.

Пример 2 (переработка отходов производства меди).

310 г тёмного осадка, образовавшегося на границе органической фазы после реэкстрагирования рения гидратом аммиака из 8%-го раствора технического триалкиламина в керосине с добавлением трибутилфосфата, растворяли в 2,5 л этилового спирта в течение 1 ч при воздействии постоянного магнитного поля $h = 10$ кЭ. Нерастворившуюся осмийсодержащую фракцию отделяли стеклянным фильтром (Класс 4), после чего растворяли в 1 л дистиллированной воды в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Полученный раствор отделяли от твёрдого остатка стеклянным фильтром (Класс 4) и направляли на переработку с целью извлечения рения, а твёрдый остаток смешивали с измельчённым гидроксидом кальция. Спекание смеси проводили при температуре 550 °С в течение 2 часов. Полученный вторичный осмиевый концентрат измельчали в течение 2 мин ультразвуковым низкочастотным диспергатором УЗД1-1,0/22 с частотой 22 кГц и интенсивностью 15 Вт/см², после чего прокаливали в атмосфере азота при температуре 880 °С в течение 40 мин. После промывания продукта прокаливания дистиллированной водой получили 810 мг черного осмия.

Пример 3 (переработка отходов производства молибдена).

330 г тёмного осадка, образовавшегося на границе органической фазы после реэкстрагирования рения гидратом аммиака из 10%-го

раствора технического триалкиламина в керосине с добавлением октанола-2, растворяли в 3 л этилового спирта в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Нерастворившуюся осмийсодержащую фракцию отделяли стеклянным фильтром (Класс 4), после чего растворяли в 1 л дистиллированной воды в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Полученный раствор отделяли от твёрдого остатка стеклянным фильтром (Класс 4) и направляли на переработку с целью извлечения рения, а твёрдый остаток смешивали с измельчённым карбонатом кальция. Спекание смеси проводили при температуре 540 °С в течение 2 часов. Полученный вторичный осмиевый концентрат измельчали в течение 2 мин ультразвуковым низкочастотным диспергатором УЗД1-1,0/22 с частотой 22 кГц и интенсивностью 15 Вт/см², после чего прокачивали в атмосфере азота при температуре 880 °С в течение 40 мин. После промывания продукта прокачиванием дистиллированной водой получили 790 мг черного осмия.

Пример 4 (переработка отходов производства молибдена).

305 г тёмного осадка, образовавшегося на границе органической фазы после реэкстрагирования рения гидратом аммиака из 10%-го раствора технического триалкиламина в керосине с добавлением октанола-2, растворяли в 3 л этилового спирта в течение 1 ч при воздействии постоянного магнитного поля $h = 10$ кЭ. Нерастворившуюся осмийсодержащую фракцию отделяли стеклянным фильтром (Класс 4), после чего растворяли в 1 л дистиллированной воды в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Полученный раствор отделяли от твёрдого остатка стеклянным фильтром (Класс 4) и направляли на переработку с целью извлечения рения, а твёрдый остаток смешивали с измельчённым карбонатом кальция. Спекание смеси проводили при температуре 540 °С в течение 2 часов. Полученный вторичный осмиевый концентрат измельчали в течение 2 мин ультразвуковым низкочастотным диспергатором УЗД1-1,0/22 с частотой 22 кГц и интенсивностью 15 Вт/см², после чего прокачивали в атмосфере азота при температуре 880 °С в течение 40 мин. После промывания продукта прокачиванием дистиллированной водой получили 830 мг черного осмия.

Заключение

Для выделения ²⁵Mg целесообразно использовать магнитоселективную инверсию реакции (I) в температурно-полевом режиме, определяемом условиями (1) и (2).

Химическое обогащение урана изотопом ²³⁵U можно осуществить путём магнитоиндуцированной инверсии реакций (II) и (III) в соответствии с соотношениями (4) – (6).

Для выделения изотопа ^{187}Os целесообразно использовать два явления – накопление ^{187}Os в рениевых породах в результате β^- -распада изотопа ^{187}Re и аномально низкую магнитную восприимчивость оксида OsO_2 , позволяющую обеспечить магнитоиндуцированную селективность восстановления осмия(VIII) до осмия(IV) в органических растворителях.

***^{25}Mg , ^{235}U եւ ^{187}Os ԲՆԱԿԱՆ ԻԶՈՏՈՊՆԵՐԻ
ՄԱԳՆԻՍՏԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՆՋԱՏՈՒՄԸ***

Յ. Օ. ՇԱԲԼՈՎՍԿԻ

Հետազոտվել են ^{25}Mg , ^{235}U և ^{187}Os իզոտոպների մագնիսաքիմիական անջատման հնարավորությունները: ^{25}Mg և ^{235}U իզոտոպների անջատումը հիմնվում է առանձին ատոմների տարբեր մագնիսական մոմենտների վրա, իսկ ^{187}Os իզոտոպների անջատումը՝ երկու այլ երևույթների՝ 1. ^{187}Os իզոտոպի կուտակման՝ ռենիումային ապարներում β^- -տրոհման ^{187}Re իզոտոպի արդյունքում և 2. OsO_2 օքսիդի անոմալ ցածր մագնիսական ընկալունակության վրա, որը հնարավորություն է ընձեռում ապահովելու օսմիում (*VIII*)-ի վերականգնումը մինչև օսմիում (*IV*):

MAGNETOCHEMICAL ENRICHING IN NATURAL ISOTOPES ^{25}Mg , ^{235}U AND ^{187}Os

Ya. O. SHABLOVSKY

Gomel State Technical University,
48October Av., Gomel, 246746., Byelorussia
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru

Magnetochemical enriching in natural isotopes ^{25}Mg , ^{235}U and ^{187}Os is studied. Separating ^{25}Mg and ^{235}U is based on the difference of atoms' magnetic moments while separating ^{187}Os is based on accumulation of this isotope in rhenium rocks due to the β^- -decay of the isotope ^{187}Re and on the anomalously low magnetic susceptibility of the oxide OsO_2 , the latter peculiarity enabling to provide the magnetoinduced selectivity of reduction of osmium (VIII) to osmium (IV).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Гаспарян Л.А., Тарханян А. С., Каранетян Н.Г., Матосян В.А., Мелик-Оганджян Р.Г. // Хим. ж. Армении, 1982, т. 35, № 1, с. 62.*
- [2] *Алексян А.Г. // Хим. ж. Армении, 2006, т. 59, № 3, с. 28.*
- [3] *Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Керобян И.Э., Тароян С.П. // Известия НАН РА, Физика, 2009, т. 44, № 5, с. 380.*
- [4] *Данагулян А.С., Оганесян Г.О., Бахшиян Т.М., Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Керобян И.А., Даллакян Р.К. // Ядерная физика, 2015, т. 78, № 6, с. 483.*
- [5] *Дангян Т.М., Алиев Р.К., Налбандян А.Б. // Хим. ж. Армении, 1985, т. 38, № 6, с. 343.*

- [6] *Мусоян Л.М., Мнацаканян Р.К.* // Хим. ж. Армении, 1990, т. 43, № 10, с. 624.
- [7] *Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Прохоров А.М., Фатеев Н.В.* Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит, 2017. с. 228.
- [8] *Ижойкин Д.А., Мышкин В.Ф., Ушаков И.А.* Основы сепарации изотопов углерода в магнитном поле. Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности. Сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции. / Издательство Томского Национального исследовательского политехнического университета, 2014. с. 130.
- [9] *Yang S., Yun L.* // Scientific Reports, 2015, v. 5, № 1, p. 12626.
- [10] *Шабловский Я.О.* // Хим. ж. Армении, 2020, т. 75, № 2-3, с. 156.
- [11] *Пугаев Э.М., Майдан В.А.* // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2018. № S1. с. 150.
- [12] *Шабловский Я.О.* // Теоретич. основы химич. технологии, 2020, т. 54, № 5, с. 629.
- [13] *Попов И.В.* Принципы физики слабых воздействий на конденсированные среды. Санкт-Петербург / Изд-во Политехнического ун-та, 2011.
- [14] *Selwood P.W., Frost A.* // Journ. Amer. Chem. Soc., 1933, Vol. 55, № 10, p. 4335.
- [15] Handbook of Chemistry & Physics. 93rd edition. Ed. by W. M. Haynes. – CRC Press, Boca Raton, FL, 2012, p.2664.
- [16] *Гермаидзе М.С., Гельд П.В., Летун С.М.* // Журнал прикладной химии, 1966, т. 39, № 8, с. 1941.
- [17] *Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. М.* / Атомиздат, 1975, с. 376.
- [18] *Башкиров Л. А. и др.* Магнитная восприимчивость и эффективный магнитный момент ионов / Груды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ, 2011, № 3 (141), с. 71.
- [19] Изотопы: свойства, получение, применение. В 2-х т. / под ред. В. Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ. Т. 1. 2005. 600 с. Т. 2. 2006, 728 с.
- [20] *Lindner D.* // Journal of the Less Common Metals, 1990, v. 157, № 1, p. 139.
- [21] *Галкин Н.П. и др.* Химия и технология фтористых соединений урана / М.: Атомиздат, 1961, 348 с.
- [22] *Годин Ю.Г., Тенишев А.В., Новиков В.В.* Ядерные топливные материалы. М.: МИФИ, 2008, с. 604.
- [23] *Калинин С.К., Файн Э.Е.* Стабильный изотоп осмий-187. Алма-Ата: Наука, 1975. с. 96.
- [24] *Есенов Ш.Е., Калинин С.К., Файн Э.Е., Егизбаева К.Е.* // Геохимия, 1970, № 5, с. 610.
- [25] *Амирян Ш.О., Межлумян Г.Б., Пароникян В.О., Фарамазян А.С.* // Известия НАН РА, Науки о Земле. 1995, т. 48, № 2-3, с. 17.
- [26] *Титаева Н.А.* Ядерная геохимия. М., МГУ. 2000, с.336.
- [27] *Синицын Н.М., Кунаев А.М., Пономарёва Е.И., Боднарь Н.М., Пичков В.Н., Абишева З.С., Зайцев В.П.* Металлургия осмия /под ред. К.А. Большакова. Алма-Ата: Наука, 1981, с.187.
- [28] *Городецкий М.И., Егизбаева К.Е., Калинин С.К.* в кн.: Химия, технология, анализ, перспективы применения осмия и его соединений. Алма-Ата: Наука, 1979. С. 163.
- [29] *Абишева З.С., Загородняя А.Н.* // Вестник МИТХТ, 2013, т. 8, № 3, с. 34.
- [30] *Greedan J.E., Willson D.B., Haas T.E.* // Inorg., 1968, Vol. 7, № 11, p. 2461.