

## Исследование возможности разделения ядерных изомеров методами физико-химического изотопного обмена

А. И. Костылев, В. А. Мазгунова, А. А. Римский-Корсаков

Установлено наличие разделительного эффекта атомов тербия-154, содержащих изомерные ядра и ядра в основном состоянии, при проведении процесса химического изотопного обмена в системе трихлорид металла – амальгама металла. В аналогичной химической системе проведены эксперименты по разделению природной смеси изотопов иттербия. Рассчитаны коэффициенты разделения изотопов иттербия на основании результатов изотопного анализа. В приближении Бигеляйзена (1996 г.) оценен относительный вклад в коэффициенты разделения исследованных изотопов и изомеров эффектов различия масс, зарядовых радиусов и спинов ядер. Сделан вывод о возможности разделения ядерных изомеров методом химического изотопного обмена за счет различия формы, размера и спина ядер в основном и изомерном состоянии.

**Ключевые слова:** ядерные изомеры, коэффициент разделения, химическая обменная реакция.

Terbium-154, terbium-154m1 and terbium-154m2 isomers were separated by the chemical exchange reaction in the organic solution of TbCl<sub>3</sub>-Tb amalgam system/ Ytterbium isotopes with natural abundance were separated in the similar chemical system. The separation coefficients of ytterbium isotopes were calculated. Partial contribution in the separation coefficients of the effects cause by the differences in mass, nuclear shape, size and nuclear spin of isotopes were estimated in the Bigeleisen approximation (1996). The possibility of separation of nuclear isomers in chemical exchange reactions is caused by the difference in the shape, seize and spin of nuclear in the ground and isomeric states.

**Keywords:** nuclear isomers, separation coefficients, chemical exchange reactions.

### Введение

Химические изотопные эффекты стандартно считают зависящими от разности масс изотопов элемента. Для реакции химического изотопного обмена



где  $M_1$  и  $M_2$  — легкий и тяжелый изотопы элемента; X и Y — фазы или лиганды, согласно классической теории Бигеляйзена и Майера [1] коэффициент обогащения  $\epsilon_0$  пропорционален разнице масс  $m_1$  и  $m_2$  изотопов:

$$\epsilon_0 = \alpha_0 - 1 \approx \ln \alpha_0 = \frac{A_0}{T^2} \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_1 m_2} = A \delta m, \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент, определяемый структурой лигандов X и Y,  $\delta m = (m_1 - m_2)/(m_1 \cdot m_2)$ . Из формулы следует, что значение коэффициента разделения  $\alpha_0$

для серии изотопов линейно зависит от  $\delta m$ . Недавние исследования, однако, показали, что линейная зависимость характерна не для всех случаев. Исключение из правил было впервые обнаружено в процессе фракционирования изотопов урана с помощью обменной реакции  $U(IV) \leftrightarrow U(VI)$  (ASANI process) [2, 3]. Оказалось, что коэффициент разделения  $^{235/238}U$  примерно в 2 раза отличается от значения, предсказываемого классической теорией. Подобные аномалии в последующем наблюдали при разделении изотопов Ba, Sr, Zn, Fe, Mo, Zr и ряда лантаноидов [4 – 6] и др.

В 1996 году Бигеляйзен [7, 8] проанализировал аномалии при разделении изотопов элементов средних и больших масс, пересмотрел свою теорию 1947 года и предложил новое соотношение для определения коэффициентов обогащения в реакциях химического изотопного обмена:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_0 + \epsilon_{BOELE} + \epsilon_{anh} + \epsilon_{hf} + \epsilon_{fs}. \quad (3)$$

В соответствии с этим соотношением полный коэффициент обогащения включает:  $\epsilon_0$  — классический, зависящий от массы, коэффициент, равный  $\epsilon_0 = A\delta m$ ;  $\epsilon_{anh}$  — погрешность, связанную с ангармоничностью колебаний атомов в молекулах;  $\epsilon_{BOELE}$  — погрешность приближения Борна-Оппенгеймера;  $\epsilon_{hf}$  — коэффициент, связанный с различием спинов ядер изотопов (ядерный спиновый эффект);  $\epsilon_{fs}$  — коэффициент, обусловленный изменением размера и формы ядра изотопа (эффект изменения зарядового радиуса ядра).

В химии средних и тяжелых изотопов, как показано Бигеляйзенем, погрешности  $\epsilon_{BOELE}$  и  $\epsilon_{anh}$  незначительны по отношению к  $\epsilon_0$ .  $\epsilon_{hf}$  — вклад ядерного спинного эффекта, обусловленного взаимодействием ядерных и электронных спинов (эффект сверхтонкого взаимодействия), вероятно может быть существенным [9]. Однако количественная оценка этого эффекта в реакциях химического изотопного обмена затруднительна. Например, для изотопов титана его вклад в коэффициент разделения составляет примерно от 15 до 30% [10]. В тоже время для  $^{235}\text{U}$  вклад этого эффекта в общий изотопный эффект менее 1% [7].

Вклад эффекта изменения зарядового радиуса ядра,  $\epsilon_{fs}$ , в общий изотопный эффект средних и тяжелых изотопов в ряде случаев имеет определяющее значение. Так, для группы изотопов урана было установлено [7, 8], что  $\epsilon_{fs}$  в 2,7 раза выше, чем значение  $\epsilon_0$ , связанное с различием масс изотопов (формула (3)). Изменение зарядового радиуса ядра связано с изменением формы и размера ядра и описывается как

$$\delta\langle r^2 \rangle = \langle r^2 \rangle_1 - \langle r^2 \rangle_2,$$

где  $\langle r^2 \rangle_1$  и  $\langle r^2 \rangle_2$  — среднеквадратичный зарядовый радиус ядра изотопа 1 и 2, соответственно. Следствием различия  $\langle r^2 \rangle$  является различие энергии электронных уровней атома или молекулы с тем или иным изотопом, что отражается на константе равновесия реакции химического изотопного обмена. Для большинства изотопов значения  $\langle r^2 \rangle$  определены экспериментально [11] и др., что позволяет использовать их для расчета изотопного эффекта.

Для условий постоянной температуры уравнение (3), следовательно, может быть записано в виде:

$$\epsilon_{tot} = A\delta m + B\delta\langle r^2 \rangle + C\delta(S), \quad (4)$$

где  $A, B$  и  $C$  — постоянные коэффициенты, зависящие от структуры лигандов  $X$  и  $Y$  (уравнение (1)),  $\delta m$  — разница масс изотопов,  $\delta\langle r^2 \rangle$  — разница средне-

квадратичных зарядовых радиусов ядер изотопов,  $\delta(S)$  — разница в энергии сверхтонкого взаимодействия изотопов, пропорциональная изменению спина ядра.

Из выражения (4) следует, что эффект разделения может иметь место не только для изотопов элемента, но и для ядерных изомеров элемента. Изомеры — долгоживущие возбужденные состояния ядер, имеющих одинаковую массу и заряд с основным состоянием изотопа, но отличающиеся внутренней структурой атомного ядра, и, следовательно, его формой, размером и спином. Коэффициент  $A$  в уравнении (4) для ядерных изомеров будет равен нулю, и коэффициент обогащения будет полностью определяться изменением  $\delta\langle r^2 \rangle$  и  $\delta(S)$ .

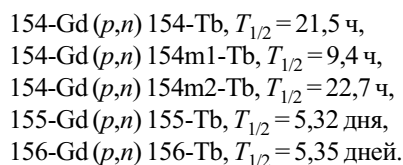
Задача выделения и концентрирования ядерных изомеров представляет интерес для ряда областей ядерной науки и техники, в связи с чем были начаты исследования возможности решения этой задачи физико-химическими методами.

Цель данной работы — изучение возможности разделения атомов, содержащих ядра в основном и изомерном состоянии (ядерных изомеров), с целью получения изомерно обогащенного материала. Для этого в работе проведено определение величин равновесных разделительных эффектов (коэффициентов разделения) атомов тербия, содержащих ядра в основном ( $^{154}\text{Tb}$ ) и изомерном ( $^{154m1}\text{Tb}$ ,  $^{154m2}\text{Tb}$ ), в реакции химического обмена трихлорид тербия — амальгама тербия. Проведению работы с радиоактивными изомерами тербия предшествовала работа с аналогом тербия — природной смесью изотопов итербия в подобной химической системе.

На основе полученных значений коэффициентов разделения изотопов итербия и изомеров тербия оценен вклад массового эффекта, эффекта изменения зарядового радиуса ядра и изменения спина ядра в суммарный разделительный эффект в этой системе.

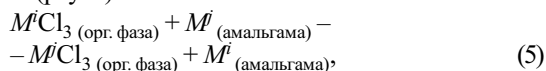
### Экспериментальная часть

Ядерные изомеры и изотопы тербия получали облучением металлического гадолиния (природного изотопного состава) протонами с энергией около 15 МэВ на циклотроне МГЦ-20 Радиового института. Образование ряда изотопов и изомеров тербия происходило по реакциям:



Химическое выделение образовавшегося тербия из облучённого образца гадолиния проводили с добавкой стабильного тербия. Облученный металлический гадолиний (1,0 – 0,4 мг), содержащий радионуклиды  $^{154m1}\text{Tb}$ ,  $^{154m2}\text{Tb}$ ,  $^{154}\text{Tb}$ ,  $^{155}\text{Tb}$ ,  $^{156}\text{Tb}$  и навеску природного тербия  $^{159}\text{Tb}$  (~ 50 мг тербия в виде  $\text{Tb}_4\text{O}_7$ ), растворяли при нагревании в соляной кислоте (0,5 ч), раствор упаривали на ротационном испарителе в вакууме при температуре 30 – 40 °С досуха, смесь гексагидратов хлоридов металлов переводили в безводные хлориды (III) кипячением с хлористым тиоилом. Аналогичным образом были получены индивидуальные безводные хлориды гадолиния и иттербия. Чистота используемых металлов составляла 99,95 – 99,97%. Безводные хлориды (III) растворяли в тетрагидрофуране в атмосфере аргона при нагревании (1 ч). В экспериментах с изомерами тербия концентрация тербия в растворе составляла 1,5 – 2 г/л, концентрация гадолиния — 0,05 – 0,025 г/л. В опытах с иттербием концентрация металла в органической фазе составляла 1 – 2 г/л, в амальгаме — 3 – 5 г/л.

Исследовали равновесное распределение изотопов и изомеров тербия и изотопов иттербия между органической фазой (тетрагидрофуран) и амальгамой (ртуть):



где  $M^i$  и  $M^j$  — изотопы или изомеры металла (Tb, Yb). В органической фазе исследуемый металл находится в форме трихлорида  $\text{MCl}_3$ , в амальгаме — в виде металла. Процесс проводили при комнатной температуре (20 °С). Амальгаму готовили растворением натрия в ртути с последующей обработкой трихлоридом металла. Были подобраны условия, обеспечивающие в течение 1 – 2 ч распределение металла между фазами в соотношении 50%/50%: 50% тербия (иттербия) в органической фазе, 50% — в ртути. Достижение равновесия контролировали измерением концентрации металла в контактирующих фазах. Пробы для анализа изотопного состава отбирали через 15 – 20 ч перемешивания. Подготовку проб для эмиссионного и масс-спектроскопического анализа осуществляли путем выделения всего количества металла (> 99,9%) из фазы, переводом металла в оксид, прокаливанием и растворением навески полученного оксида в 0,5 н азотной кислоте. Выделение металла из амальгамы осуществляли экстракцией соляной кислотой.

Гамма-спектрометрические измерения выполняли на германиевом полупроводниковом детекторе объёмом 100 см<sup>3</sup> фирмы Schlumberger и на аналогичном спектрометре фирмы Canberra.

Энергетическое разрешение по линии 1332 кэВ составляло около 1,7 кэВ. Анализ химического состава и концентрацию металлов в растворе осуществляли на оптическом эмиссионном спектрометре ICP-ES Varian 725-ES. Масс-спектроскопический анализ изотопного состава проводили на квадрупольном масс-спектрометре Angielent 7-500С, с чувствительностью не хуже  $1 \cdot 10^{-6}\%$ , точностью определения абсолютного изотопного содержания для наименее интенсивного пика  $^{168}\text{Yb} \sim 0,1\%$ , для остальных изотопов — менее 0,05%. Точность определения изотопных соотношений оценена в 0,05%.

### Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований изучали равновесное распределение изотопов иттербия Yb в условиях химического изотопного обмена между хлористым иттербием  $\text{YbCl}_3$  и амальгамой иттербия. Соотношение изотопов иттербия определяли сравнением интенсивности пика рассматриваемого изотопа с интенсивностью пика  $^{172}\text{Yb}$ . Среднее значение изотопного соотношения и стандартное отклонение рассчитывали из результатов 3 – 4 параллельных анализов.

Коэффициенты разделения изотопов иттербия  $^i\text{Yb}$  рассчитывали по отношению к  $^{172}\text{Yb}$  по формуле:

$$\alpha_{\text{Yb}}^{i/172} = \frac{\left( \frac{C_{i\text{Yb}}}{C_{172\text{Yb}}} \right)_{\text{амальгама}}}{\left( \frac{C_{i\text{Yb}}}{C_{172\text{Yb}}} \right)_{\text{органическая фаза}}}, \quad (6)$$

где  $\frac{C_{i\text{Yb}}}{C_{172\text{Yb}}}$  — среднее значение изотопного соотношения,  $i = 168, 170, 171, 173, 174, 176$ .

Коэффициент обогащения находится из соотношения  $\varepsilon = \alpha - 1$ . Свойства изотопов иттербия и рассчитанные из данных масс-спектроскопического анализа по формуле (6) коэффициенты обогащения для изотопов иттербия представлены в табл. 1 и показаны на рис. 1.

Природный иттербий имеет 7 стабильных изотопов, ядра двух из которых имеют не нулевой спин ( $^{171}\text{Yb}$  — 1/2–;  $^{173}\text{Yb}$  — 5/2–). Однако на графике “коэффициент обогащения  $\varepsilon$  – массовое число” для данных изотопов не наблюдается выраженного отклонения от линейной зависимости, или эти отклонения скрыты в большой погрешности измерений. Коэффициенты обогащения имеют поло-

Таблица 1

Свойства изотопов иттербия и рассчитанные коэффициенты обогащения

| Массовое число | Содержание изотопа в природной смеси, % | Зарядовый радиус ядра, $\langle r^2 \rangle$ , фм <sup>2</sup> [11, 13] | Спин и четность ядра | Коэффициент обогащения, $\epsilon^{i/172}$ |
|----------------|---|---|----------------------|--|
| 168            | 0,13                                    | 5,25 – 5,24   | 0+                   | 0,0053 ± 0,0021                            |
| 170            | 3,04                                    | 5,286   | 0+                   | 0,0015 ± 0,0006                            |
| 171            | 14,28                                   | 5,2930  | 1/2–                 | 0,0010 ± 0,0002                            |
| 172            | 21,83                                   | 5,3010  | 0+                   | 0,0000                                     |
| 173            | 16,13                                   | 5,3060  | 5/2–                 | –0,0006 ± 0,0002                           |
| 174            | 31,83                                   | 5,3170  | 0+                   | –0,0012 ± 0,0002                           |
| 176            | 12,76                                   | 5,3210  | 0+                   | –0,0026 ± 0,0006                           |

жительное значение для изотопов, более легких, чем <sup>172</sup>Yb. Это указывает, что более легкие изотопы концентрируются в амальгаме. Аналогичный порядок разделения легких и тяжелых изотопов при химическом изотопном обмене наблюдается в системах амальгама – водный раствор соли металла для лития и ряда редкоземельных металлов [12]. Наиболее высокое значение коэффициента обогащения имеет изотоп <sup>168</sup>Yb:  $\epsilon^{168/172} = 0,0053$ , что более чем в два раза превосходит величины для других изотопных пар. Это значение для <sup>168</sup>Yb хорошо коррелирует с резким изменением его зарядового радиуса, что показано на рис. 1а. Нейтроно дефицитное ядро <sup>168</sup>Yb в силу своего внутреннего строения обладает уни-

кальными характеристиками и имеет относительно других изотопов максимальное изменение зарядового радиуса  $\delta\langle r^2 \rangle$ , что можно связать с максимальным коэффициентом обогащения. Это указывает на существенный вклад эффекта изменения зарядового радиуса на суммарный разделительный эффект.

Оценка относительных вкладов массового эффекта, эффекта изменения зарядового радиуса и спинового эффекта в разделительный эффект проведена по формуле (4) путем подбора решений для системы из 6 уравнений с тремя неизвестными: A, B и C типа:

$$\epsilon_{Yb}^{i/172} = A\delta m^{i/172} + B\delta\langle r^2 \rangle^{i/172} + C\delta(S)^{i/172} \quad (7)$$

составленных для каждого изотопа. Для получения значений A, B и C в едином масштабе величины m, r и S нормировали на 1. Средние значения коэффициентов составили:

$$A \sim -7 \cdot 10^{-3}; B \sim -2 \cdot 10^{-3}; C \sim +3 \cdot 10^{-4}. \quad (8)$$

Порядок полученных величин говорит о сравнимом значении эффекта различия массы и различия зарядового радиуса, и, вероятно, о второстепенном значении спинового эффекта при обычном изменении спинового числа от изотопа к изотопу на 1–2 единицы.

В случае ядерных изомеров, возможность разделения которых исследовали в данной работе, обычно имеет место изменение спина на 10 и более единиц наряду с значительным изменением формы и размера изомерного ядра по сравнению с основным состоянием (табл. 2). Это предполагает воз-

Таблица 2

Ядерные характеристики радионуклидов тербия, используемых в эксперименте

| Изотоп              | Спин, S | Период полураспада, T <sub>1/2</sub> |
|---------------------|---------|--------------------------------------|
| <sup>154</sup> Tb   | 0       | 21,5 ч                               |
| <sup>154m1</sup> Tb | 3–      | 9,4 ч                                |
| <sup>154m2</sup> Tb | 7–      | 22,7 ч                               |
| <sup>155</sup> Tb   | 3/2+    | 5,32 сут.                            |
| <sup>156</sup> Tb   | 3–      | 5,35 сут.                            |

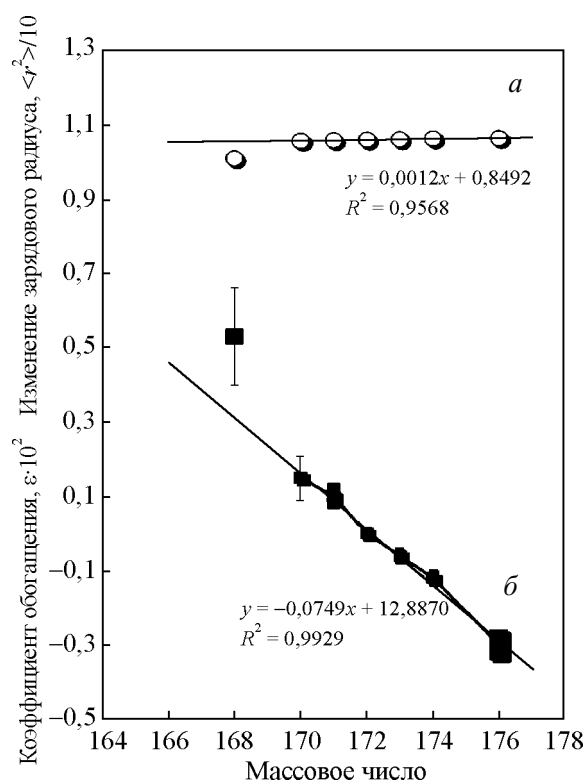
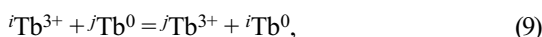


Рис. 1. а – Изменение зарядового радиуса изотопов (а – в масштабе,  $\langle r^2 \rangle / 10$ ), б – зависимость коэффициента разделения изотопов иттербия от массового числа.

возможность получения значительного изотопного эффекта в процессе химического изотопного обмена. Было исследовано распределение изотопов  $^{154}\text{Tb}$ ,  $^{155}\text{Tb}$  и  $^{156}\text{Tb}$  и изомеров  $^{154m1}\text{Tb}$ ,  $^{154m2}\text{Tb}$  в системе  $\text{Tb(III)}_{\text{хлорид}} \leftrightarrow \text{Tb(0)}_{\text{ртуть}}$ . В условиях равновесия между органической фазой, в которой находится  $\text{TbCl}_3$ , и амальгамой имеет место обратимая химическая реакция:



где  ${}^i\text{Tb}$  и  ${}^j\text{Tb}$  — изотопные или изомерные формы иттербия. При наличии разделительного эффекта должно иметь место изменение относительного содержания  $^{154}\text{Tb}$ ,  $^{155}\text{Tb}$ ,  $^{156}\text{Tb}$ ,  $^{154m1}\text{Tb}$ ,  $^{154m2}\text{Tb}$  в органической фазе и в амальгаме по сравнению с исходным состоянием. Все указанные радионуклиды являются радиоактивными (рис.2) с индивидуальным спектром излучения. Это позволяет методом гамма-спектрометрии и последующей математической обработки определить относительное содержание радионуклидов в органической фазе и в амальгаме.

На рис. 2 представлены результаты обработки данных спектрометрических измерений образцов органической фазы и фазы амальгамы. Несмотря на значительные погрешности достоверно наблюдается изменение относительного содержания радионуклидов, что доказывает наличие разделительного эффекта.

Из данных, представленных на рис. 2, можно оценить коэффициент обогащения изомеров тербия относительно основного состояния, как отношение относительного содержания радионуклидов в органической фазе и в амальгаме:

$$\epsilon_{\frac{154m1\text{Tb}}{154\text{Tb}}} = \frac{\left(\frac{154m1\text{Tb}}{154\text{Tb}}\right)_{\text{органическая фаза}}}{\left(\frac{154m1\text{Tb}}{154\text{Tb}}\right)_{\text{амальгама}}} - 1 \approx 0,047, \quad (10)$$

$$\epsilon_{\frac{154m2\text{Tb}}{154\text{Tb}}} = \frac{\left(\frac{154m2\text{Tb}}{154\text{Tb}}\right)_{\text{органическая фаза}}}{\left(\frac{154m2\text{Tb}}{154\text{Tb}}\right)_{\text{амальгама}}} - 1 \approx 0,025. \quad (11)$$

Из рис. 2 и уравнений (10), (11) следует, что изомеры тербия-154 в сравнении с основным состоянием изотопа концентрируются в органической фазе. Значительная величина коэффициентов обогащения изомеров ( $\epsilon_{m1} \sim 0,047$  и  $\epsilon_{m2} \sim 0,025$ ) может быть объяснена большим изменением спина ядер: на  $-3$  и  $-7$  единиц спинового числа соответственно (табл. 2)

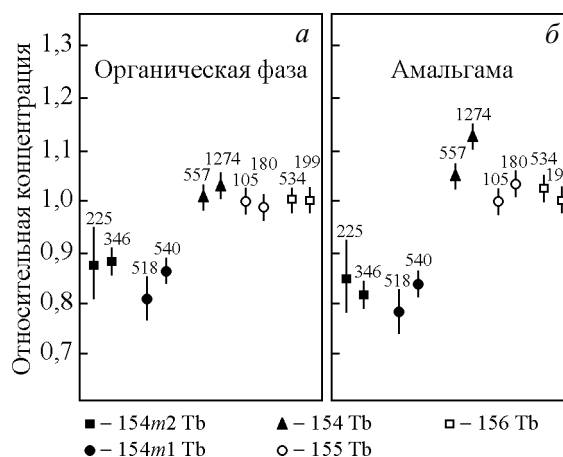


Рис. 2. Относительное содержание радионуклидов тербия: а – в органической фазе, б – в амальгаме.

и очень большим изменением зарядовых радиусов изомеров  $^{154m1}\text{Tb}$  и  $^{154m2}\text{Tb}$  относительно основного состояния, что характерно для большинства ядерных изомеров [14].

Полученные данные указывают на возможность разделения атомов, содержащих ядра в основном и изомерном состоянии. Это подтверждает существенную роль таких характеристик атомов как форма, размер и спин ядра на их равновесное распределение в реакциях химического изотопного обмена.

## Выводы

Установлено наличие разделительного эффекта атомов тербия-154, содержащих изомерные ядра и ядра в основном состоянии, при проведении процесса химического изотопного обмена. Полученные значения согласуются с величиной разделительного эффекта, зарегистрированного при исследовании разделения стабильных изотопов иттербия в аналогичном химическом процессе изотопного обмена. Разделение изомеров может быть интерпретировано, как масса-независимый разделительный эффект, обусловленный влиянием на энергетические уровни валентных электронов атома формы, размера и внутренней структуры атомного ядра. Атомы ядерных изомеров и атомы с ядрами в основном состоянии, не отличаясь по массе, могут быть по этой причине разделены до определенной степени друг от друга в обратимом химическом процессе.

## Литература

1. Bigeleisen J., Mayer M.G. Calculation of equilibrium constants for isotopic exchange reactions. J. Chem. Phys., 1947, v. 15, p. 261 – 267.

2. Fujii Y., Nomura M., Okomoto M. et al. An anomalous isotope effect of U-235 in U(IY)-U(YI) chemical exchange. *Z. Naturforsch.*, 1989, v. 44, no. 5, p. 395 – 398.
3. Fujii Y., Nomura M., Onitsuka H. et al. Anomalous isotope fractionation in uranium enrichment process. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1989, v. 26, no. 11, p. 1061 – 1064.
4. Thiemens M., Chakraborty S., Dominguez G. The physical chemistry of mass-independent isotope effects and their observation in nature. *Physical Chemistry*, 2012, v. 63, p. 155 – 177.
5. Thiemens M. History and application of mass-independent isotope effects. *Earth and Planetary Sciences, Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006, v. 34, p. 217 – 262.
6. Bigeleisen J. Theoretical basis of isotope effects from an autobiographical perspective, isotope effects in chemistry and biology. Ed. A. Kohen, H. Limbach. CRC Press – Taylor & Francis (Boca Raton, FL), 2006, p. 1 – 39.
7. Bigeleisen J. Nuclear size and shape effects in chemical reactions. isotope chemistry of the heavy elements. *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, v. 118, p. 3676 – 3680.
8. Bigeleisen J. Temperature dependence of the isotope chemistry of the heavy elements. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1996, v. 93, no. 18, p. 9393 – 9396.
9. Epov V. Magnetic isotope effect and theory of atomic orbital hybridization to predict a mechanism of chemical exchange reactions. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, v. 13, p. 13222 – 13231.
10. Fujii T., Inagawa J., Nishizawa K. Influences of nuclear mass, size, shape and spin on chemical isotope effect of titanium. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1998, v. 102, no. 12, p. 1880 – 1885.
11. Angeli I. Table of nuclear root mean square charge radii. INDC, IAEA, Vienna, 1999, 84 p.
12. Dembiński W.; Poniński M.; Fiedler R. Isotope effects of samarium and ytterbium in the acetate/amalgam separation system. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2001, v. 250, no. 3, p. 423 – 428.
13. Zerguine S., Isacker P., Bouldjedri A. Consistent description of nuclear charge radii and electric monopole transitions. *Physical Review C*, 2012, 85, 13 p.
14. Billowes J. Laser spectroscopy of radioisotopes and isomers. *Nucl. Phys. A*, 2001, v. 682, p. 206 – 213.

*Статья поступила в редакцию 24.10.2012 г.*

**Костылев Александр Иванович** — ФГУП “НПО “Радиевый институт им. В.Г.Хлопина” (г. Санкт-Петербург), кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, начальник лаборатории. Специалист в области радиохимии и технологии разделения изотопов. E-mail: Alexander.Kostylev@gmail.com.

**Мазгунова Вера Александровна** — ФГУП “НПО “Радиевый институт им. В.Г.Хлопина” (г. Санкт-Петербург), инженер-технолог. Специалист в области радиохимии. E-mail: Verun4ik-style@yandex.ru.

**Римский-Корсаков Александр Андреевич** — ФГУП “НПО “Радиевый институт им. В.Г.Хлопина” (г. Санкт-Петербург), доктор физико-математических наук, научный руководитель института. Специалист в области ядерной физики и радиохимии. E-mail: ark@khlopin.ru.