

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 544.33+546.6

ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ВИСМУТА, ДИСПРОЗИЯ, САМАРИЯ, НИОБИЯ

© 2023 г. Н. И. Мацкевич^a, *, А. Н. Семерикова^a, Н. В. Гельфонд^a, Е. Н. Ткачев^a,
М. Ю. Мацкевич^a, О. И. Ануфриева^a, П. П. Безверхий^a

^aИнститут неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.08.2022 г.

После доработки 13.09.2022 г.

Принята к публикации 16.09.2022 г.

Методом твердофазного синтеза получены керамические образцы $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$. Показано, что соединения имеют кубическую структуру (пр. гр. $Fm\bar{3}m$). Методом растворной калориметрии определены стандартные энтальпии образования, рассчитаны энтальпии решетки. Энтальпия решетки соединений $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{R}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ уменьшается по абсолютной величине при замене эрбия на самарий, что связано с увеличением радиуса редкоземельного элемента от эрбия к самарию. Установлено, что энтальпия решетки $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ больше по абсолютной величине, чем энтальпия решетки $\text{Bi}_{1.2}\text{Gd}_{0.8}\text{O}_3$.

Ключевые слова: керамические материалы, оксиды редкоземельных металлов, энтальпия образования, энтальпия решетки

DOI: 10.31857/S0044457X2260150X, **EDN:** LPJRFZ

ВВЕДЕНИЕ

Керамические материалы на основе оксида висмута, редкоземельных и переходных металлов вызывают интерес благодаря их уникальным функциональным свойствам: высокой ионной проводимости, сегнетоэлектрическим свойствам, электрохимической активности, люминесценции и др. [1–12]. Они широко используются в газовых сенсорах, топливных элементах, кислородных керамических генераторах.

Переход к экологически чистой энергетике требует новых материалов с более низкими температурами эксплуатации и повышенной стабильностью. Для достижения этих параметров проводят замещение δ -формы оксида висмута ($\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$) редкоземельными и переходными металлами.

В работах [1, 11] проведено замещение оксида висмута редкоземельными элементами (РЗЭ) и рением(VII). Получены высокие значения ионной проводимости и механической прочности. Поскольку рений – дорогостоящий металл, вместо него для катионных замен используется ниобий, вольфрам и другие переходные металлы. Очень хорошо зарекомендовали себя материалы на основе оксида висмута, замещенные редкоземельными элементами.

Как показал обзор литературы, термодинамические свойства замещенных оксидов висмута изучены недостаточно. Термодинамика позволяет определить направления изменения стабильности, оптимизировать условия синтеза, деградации материалов и др.

В настоящей работе выполнен синтез и определены стандартные энтальпии образования и энтальпии решетки соединений на основе оксида висмута, оксида ниобия и оксидов РЗЭ состава $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ синтезировали методом твердофазного синтеза из стехиометрических смесей оксидов Bi_2O_3 , Dy_2O_3 , Nb_2O_5 , Sm_2O_3 . Высокочистый оксид висмута марки 5 N (99.999 мас. %) был синтезирован в ИНХ СО РАН. Содержание примесей Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Si, Te, Zn, определенное методом масс-спектрометрии с индукционной плазмой (масс-спектрометр iCAP-Qc), не превышало 10^{-5} мас. %. Оксиды ниобия, самария, диспрозия получены на Новосибирском заводе редких металлов (чистота >99.9 мас. %). Стехиометрические смеси взвешивали, перемешивали в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 6 (клас-

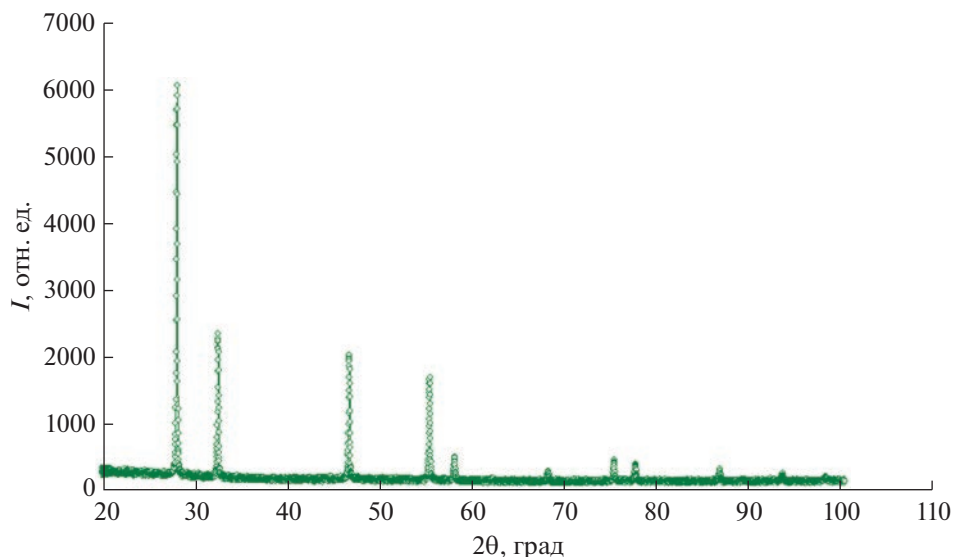


Рис. 1. Типичная дифрактограмма образцов, принадлежащих к пр. гр. $Fm\bar{3}m$.

сическая линия). Скорость перемешивания составляла от 50 до 250 об/мин, время перемешивания — 72 ч, количество промежуточных перетираний — 10. После перемешивания смесь прессовали (пресс ПГР-400) и отжигали в печи. Наилучшие результаты по синтезу достигнуты при синтезе образцов при температуре 1073 К в течение 50 ч.

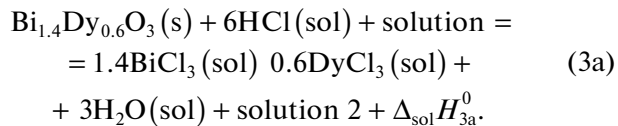
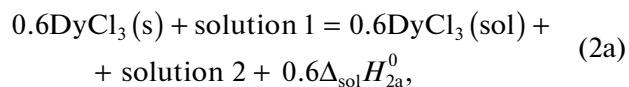
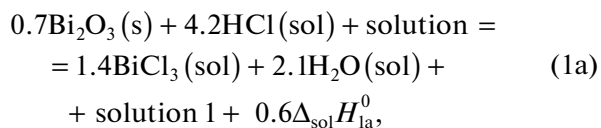
Образцы $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ исследовали с помощью рентгенофазового и химического анализа. Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (CuK_α -излучение). Типичная дифрактограмма образцов, принадлежащих к пр. гр. $Fm\bar{3}m$, приведена на рис. 1. Содержание элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, содержание кислорода — методом восстановительного плавления.

Для изучения термодинамических свойств $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ использовали метод калориметрии растворения. Метод калориметрии растворения является одним из наиболее востребованных и прецизионных методов для определения стандартных энтальпий образования неорганических веществ [13–15].

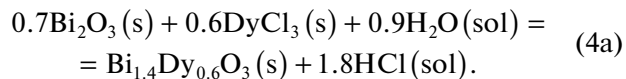
Для определения термодинамических характеристик применяли автоматизированный калориметр растворения с изотермической оболочкой. Ознакомиться с подробным устройством калориметра можно в работах [16–18]. Для проверки правильности работы калориметра в нем растворяли хлорид калия. Полученная теплота растворения составила 17.41 ± 0.08 кДж/моль, погрешность рассчитывали по стандартной методике. Справочное значение $\Delta_{\text{sol}} H^0(\text{KCl}) = 17.47 \pm 0.07$ кДж/моль [19].

В пределах погрешности значения теплоты растворения для хлорида калия совпадают.

Для определения стандартной энтальпии образования соединения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ была создана такая схема термодинамических реакций, при которой энтальпия растворения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ в 2 М соляной кислоте сравнивалась с энтальпиями растворения Bi_2O_3 и DyCl_3 .



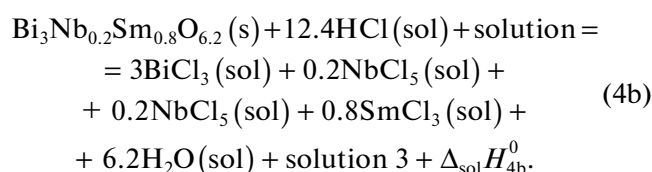
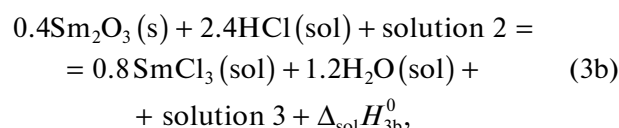
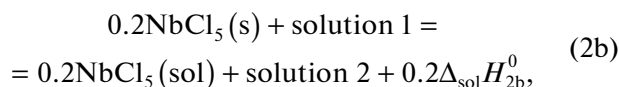
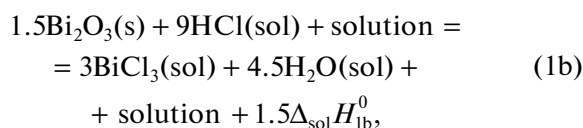
На основании полученных выше энтальпий растворения с помощью закона Гесса можно рассчитать энтальпию реакции:



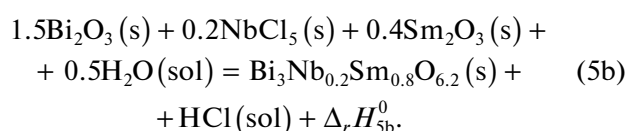
Далее на основе энтальпии реакции (4а) с использованием стандартных энтальпий образования $\text{HCl}(\text{sol})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{sol})$, $\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{s})$ и $\text{DyCl}_3(\text{s})$ можно рассчитать стандартную энтальпию образования $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})$.

Для вычисления энтальпии образования $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ был составлен приведенный ни-

же термодимический цикл. В качестве растворителя использовали 4 М соляную кислоту.



С помощью закона Гесса можно получить:



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализов показали, что в пределах погрешности полученные соединения соответствуют формулам $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ и $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$. Чистота полученных соединений >99.5%.

С помощью программы FullProf определена пространственная группа образцов и параметры решетки. Оба образца ($\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ и $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$) имеют пр. гр. *Fm3m* (флюорит, кубическая). Параметр решетки для $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ $a = 0.54894(8)$ нм, для $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ $a = 0.54575(7)$ нм.

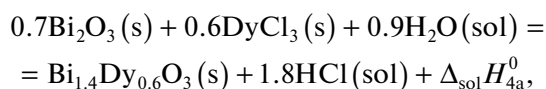
Измеренные нами энтальпии растворения оксида висмута, хлорида диспрозия и соединения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ в 2 М соляной кислоте составили:

$$\Delta_{\text{sol}}H_{1\text{a}}^0(\text{Bi}_2\text{O}_3, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -114.4 \pm 1.1 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta_{\text{sol}}H_{2\text{a}}^0(\text{DyCl}_3, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -192.2 \pm 1.2 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta_{\text{sol}}H_{3\text{a}}^0(\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -215.4 \pm 6.7 \text{ кДж/моль}.$$

На основании вышеприведенных энтальпий растворения рассчитана энтальпия реакции (4а):



$$\Delta_{\text{sol}}H_{4\text{a}}^0 = +20.0 \pm 6.8 \text{ кДж/моль}.$$

Необходимые для вычисления стандартные энтальпии образования HCl и H_2O были взяты из статьи [20] и составляли: $\Delta_f H^0(\text{HCl}(\text{sol})) = -162.6 \pm 0.2$ кДж/моль; $\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O}(\text{sol})) = -285.89 \pm 0.04$ кДж/моль. Стандартные энтальпии образования $\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{s})$ и $\text{DyCl}_3(\text{s})$ были взяты из справочника [21] и составляли: $\Delta_f H^0(\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{s})) = -577.810 \pm 4.184$ кДж/моль; $\Delta_f H^0(\text{DyCl}_3(\text{s})) = -995.792 \pm 8.368$ кДж/моль.

На основании вышеприведенных данных рассчитана стандартная энтальпия образования $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})$: $\Delta_f H^0(\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})) = -946.6 \pm 10.1$ кДж/моль.

Следует отметить, что стандартные энтальпии образования HCl и H_2O , взятые из статьи [20], отличаются от величин из справочника [21]. Величины стандартных энтальпий образования HCl (2 М) и H_2O из справочника [21] составляют: $\Delta_f H^0(\text{HCl}(\text{sol})) = -164.29 \pm 0.42$ кДж/моль; $\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O}(\text{sol})) = -285.83 \pm 0.04$ кДж/моль. На основании этих величин и ранее приведенных данных для стандартных энтальпий образования $\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{s})$ и $\text{DyCl}_3(\text{s})$ рассчитана стандартная энтальпия образования $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})$: $\Delta_f H^0(\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})) = -943.5 \pm 10.1$ кДж/моль. Считаем эту величину наиболее надежной, поскольку данные справочника содержат значения, рассчитанные на основании анализа всех имеющихся литературных данных.

На основании полученной стандартной энтальпии образования с использованием цикла Борна–Габера была рассчитана энтальпия решетки. Для ее нахождения необходимо знать стандартные энтальпии образования ионов Bi^{3+} , Dy^{3+} и O^{2-} . Эти величины были взяты из справочника [21]: $\Delta_f H^0(\text{Bi}^{3+}) = 4994.0$ кДж/моль; $\Delta_f H^0(\text{Dy}^{3+}) = 4188.6$ кДж/моль; $\Delta_f H^0(\text{O}^{2-}) = 905.8$ кДж/моль. Таким образом, энтальпия решетки, вычисленная с использованием вышеприведенной информации, составила: $\Delta_{\text{lat}} H^0(\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3(\text{s})) = -13166$ кДж/моль.

Ранее в работе [22] была измерена стандартная энтальпия образования и рассчитана энтальпия решетки соединения $\text{Bi}_{1.2}\text{Gd}_{0.8}\text{O}_3$: $\Delta_{\text{lat}} H^0(\text{Bi}_{1.2}\text{Gd}_{0.8}\text{O}_3) = -12823$ кДж/моль. Видно, что энтальпия решетки соединения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ больше по абсолютной величине, чем энтальпия решетки $\text{Bi}_{1.2}\text{Gd}_{0.8}\text{O}_3$. Радиус диспрозия меньше, чем радиус гадолиния: $r(\text{Gd}^{3+}) = 0.0938$ нм; $r(\text{Dy}^{3+}) = 0.0912$ нм [23]. К сожалению, эти соединения имеют разный состав, поэтому проследить влияние замены РЗЭ на энтальпию решетки в настоящий момент не представляется возможным.

Перейдем к определению стандартной энтальпии образования ниобата висмута, замещенного самарием $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$. В работе определены энтальпии растворения Bi_2O_3 , NbCl_5 , $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ в 4 М соляной кислоте как следующие величины:

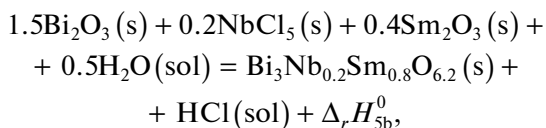
$$\Delta_{\text{sol}} H_{1b}^0 (\text{Bi}_2\text{O}_3, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -187.7 \pm 2.5 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta_{\text{sol}} H_{2b}^0 (\text{NbCl}_5, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -210.1 \pm 5.0 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta_{\text{sol}} H_{4b}^0 (\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -474.4 \pm 4.6 \text{ кДж/моль}.$$

Энтальпия растворения оксида самария, необходимая для вычисления стандартной энтальпии образования $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$, получена из работы [24]: $\Delta_{\text{sol}} H_{4b}^0 (\text{Sm}_2\text{O}_3, \text{s}, 298.15 \text{ K}) = -412.8 \pm 0.5 \text{ кДж/моль}$.

На основании экспериментальных и литературных данных рассчитана энтальпия реакции (5b):



$$\Delta_r H_{5b}^0 = -14.3 \pm 6.0 \text{ кДж/моль}.$$

Для вычисления стандартной энтальпии образования соединения $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ были взяты стандартные энтальпии образования Bi_2O_3 , NbCl_5 и Sm_2O_3 [21], а также стандартные энтальпии образования H_2O и HCl (4 М) [25]. Они составили: $\Delta_f H^0 (\text{HCl} (\text{sol})) = -162.80 \pm 0.42 \text{ кДж/моль}$ [25]; $\Delta_f H^0 (\text{H}_2\text{O} (\text{sol})) = -285.83 \pm 0.04 \text{ кДж/моль}$ [25]; $\Delta_f H^0 (\text{Bi}_2\text{O}_3 (\text{s})) = -577.810 \pm 4.184 \text{ кДж/моль}$ [21]; $\Delta_f H^0 (\text{NbCl}_5 (\text{s})) = -797.47 \pm 2.09 \text{ кДж/моль}$ [21]; $\Delta_f H^0 (\text{Sm}_2\text{O}_3 (\text{s})) = -1823.0 \pm 4.0 \text{ кДж/моль}$ [21]. Следует сказать, что данные из статьи [25] полностью совпадают с данными из справочника [21].

Стандартная энтальпия образования соединения $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$, рассчитанная по уравнению (5b), составляет: $\Delta_f H^0 (\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}) = -1749.8 \pm 8.3 \text{ кДж/моль}$.

Далее рассчитаем энтальпию решетки ($\Delta_{\text{lat}} H$) соединения $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$. Эта характеристика связана со структурой, поскольку вычисление включает энтальпии образования ионов, образующих кристаллическую решетку. Чтобы вычислить энтальпию решетки $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ использовали цикл Борна–Габера.

Для вычисления энтальпии решетки соединения $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ была использована получен-

ная нами стандартная энтальпия образования $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ и энтальпии образования ионов Bi^{3+} , Nb^{5+} , Sm^{3+} , O^{2-} , взятые из справочника [21]: $\Delta_f H^0 (\text{Bi}^{3+}) = 4994.0 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^0 (\text{Nb}^{5+}) = 13752.8 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^0 (\text{Sm}^{3+}) = 4075.2 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^0 (\text{O}^{2-}) = 905.8 \text{ кДж/моль}$. Рассчитанная энтальпия решетки соединения $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ составила: $\Delta_{\text{lat}} H^0 (\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}) = -28360 \text{ кДж/моль}$.

Ранее в работе [26] была измерена стандартная энтальпия образования ниобата висмута, замещенного эрбием ($\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Er}_{0.8}\text{O}_{6.2}$). На основании полученных экспериментальных данных рассчитана энтальпия решетки этого соединения: $\Delta_{\text{lat}} H^0 (\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Er}_{0.8}\text{O}_{6.2}) = -28540 \text{ кДж/моль}$.

Видно, что энтальпия решетки $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ меньше по абсолютной величине, чем энтальпия решетки $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Er}_{0.8}\text{O}_{6.2}$, это связано с увеличением радиуса РЗЭ от эрбия к самарию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного синтеза получены соединения состава $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ и изучены методами рентгенофазового и химического анализа. Показано, что соединения $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ являются индивидуальными фазами (пр. гр. *Fm3m*). Методом калориметрии растворения определены стандартные энтальпии образования соединений $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ и $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$. С использованием цикла Борна–Габера рассчитаны энтальпии решеток. Показано, что энтальпия решетки $\text{Bi}_{1.4}\text{Dy}_{0.6}\text{O}_3$ больше по абсолютной величине, чем энтальпия решетки $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{6.2}$ меньше по абсолютной величине, чем энтальпия решетки $\text{Bi}_3\text{Nb}_{0.2}\text{Er}_{0.8}\text{O}_{6.2}$, что связано с увеличением радиуса РЗЭ от эрбия к самарию: $r(\text{Er}^{3+}) = 0.0890 \text{ нм}$; $r(\text{Sm}^{3+}) = 0.0958 \text{ нм}$ [23].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 19-19-00095-П). Н.И. Мацкевич, А.Н. Семейкова, Е.Н. Ткачев, М.Ю. Мацкевич, О.И. Ануфриева, П.П. Безверхий благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект 121031700314-5) за использование калориметра и оборудования для синтеза.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Punn R., Feteira A.M., Sinclair D.C. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2006. V. 128. P. 15386.
<https://doi.org/10.1021/ja065961d>
2. *Lomanova N.A.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 741.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622060146>
3. *Buyanova E.S., Emel'yanova Yu.V., Morozova M.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. P. 1297.
<https://doi.org/10.1134/S0036023618100042>
4. *Drache M., Roussel P., Wignacourt J.P.* // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 80.
<https://doi.org/10.1021/cr050977s>
5. *Proskurina O.V., Sokolova A.N., Sirotkin A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 163.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621020157>
6. *Dmitriev A.V., Vladimirov E.V., Kellerman D.G. et al.* // J. Electron. Mater. 2019. V. 48. P. 4959.
<https://doi.org/10.1007/s11664-019-07227-1>
7. *Elovikov D.P., Tomkovich M.V., Levin A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 850.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622060067>
8. *Lomakin M.S., Proskurina O.V., Levin A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 820.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622060134>
9. *Borowska-Centhowska A., Liu X., Krynski M. et al.* // RSC Advances. 2019. V. 9. P. 9640.
<https://doi.org/10.1039/c9ra01233h>
10. *Ivanov S.A., Stash A.I., Bush A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 588.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622050096>
11. *Hervoches C.H., Greaves C.* // J. Mater. Chem. 2010. V. 20. P. 6759.
<https://doi.org/10.1039/c0jm01385d>
12. *Dergacheva P.E., Kulbakin I.V., Ashmarin A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 1229.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621080040>
13. *Novikov A.A., Belova E.V., Uspenskaya I.A.* // J. Chem. Eng. Data. 2019. V. 64. P. 4230.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00292>
14. *Kosova D.A., Druzhinina A.I., Tiflova L.A. et al.* // J. Chem. Thermodyn. 2018. V. 118. P. 206.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2017.11.016>
15. *Shelyug A., Navrotsky A.* // ACS Earth Space Chem. 2021. V. 5. P. 703.
<https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00199>
16. *Matskevich N.I., Shlegel V.N., Sednev A.L. et al.* // J. Chem. Thermodyn. 2020. V. 143. P. 106059.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106059>
17. *Matskevich N.I., Chuprova M.V., Punn R. et al.* // Thermochim. Acta. 2007. V. 459. P. 125.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.03.015>
18. *Matskevich N., Wolf T.* // Thermochim. Acta. 2007. V. 467. P. 113.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.10.013>
19. *Kilday M.V.* // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1980. V. 85. P. 467.
20. *Morss L.R.* // Chem. Rev. 1976. V. 76. P. 827.
<https://doi.org/10.1021/cr60304a007>
21. *Glushko V.P.* Termicheskie Konstanty Veshchestv (Thermal Constants of Substances). M.: VINITI, 1965–1982. № 1–10.
22. *Matskevich N.I., Semerikova A.N., Samoshkin D.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 11.
23. *Shannon R.D.* // Acta Crystallogr. 1976. V. A32. P. 751.
<https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
24. *Hennig C., Oppermann H.* // Z. Naturforsch. B. 1997. V. 52. № 12. P. 1517.
<https://doi.org/10.1515/znbb-1997-1213>
25. *Schmidt M., Oppermann H., Hennig C. et al.* // Z. Anorg. Allg. Chem. 2000. V. 626. № 1. P. 125.
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-3749\(200001\)626:1-%3c125::aid-zaac125%3e3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-3749(200001)626:1-%3c125::aid-zaac125%3e3.0.co;2-s)
26. *Matskevich N.I., Semerikova A.N., Gelfond N.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 743.
<https://doi.org/10.1134/S0036023620050162>