



# Конденсированные среды и межфазные границы

## Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3116>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 09.10.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 15.11.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

УДК 544.31:546.6>24

## Термодинамические свойства теллуридов тербия

© 2020 С. З. Имамалиева<sup>a</sup> ✉, Д. М. Бабанлы<sup>a,b</sup>, В. П. Зломанов<sup>c</sup>, Д. Б. Тагиев<sup>a</sup>, М. Б. Бабанлы<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup>Институт катализа и неорганической химии, НАН Азербайджана,  
пр. Г. Джавида, 113, Баку AZ-1143, Азербайджан

<sup>b</sup>Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Азербайджано-французский университет (UFAZ),  
пр. Азадлыг, 6/21, Баку AZ-1101, Азербайджан

<sup>c</sup>Московский государственный университет,  
ГСП-1, Ленинские горы, Москва 119991, Российская Федерация

<sup>d</sup>Бакинский государственный университет,  
ул. З. Халилова, 23, Баку AZ-1148, Азербайджан

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования твердофазных равновесий в системе Tb–Te и термодинамических свойств теллуридов тербия методами электродвижущих сил и рентгенофазового анализа. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что в системе образуются соединения TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbTe<sub>2</sub> и TbTe<sub>3</sub>. Для изучения сплавов из двухфазных областей TbTe<sub>3</sub>+Te, TbTe<sub>2</sub>+TbTe<sub>3</sub> и Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>+TbTe<sub>2</sub> измеряли электродвижущую силу (ЭДС) концентрационных цепей относительно электрода TbTe, а из области TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – концентрационных цепей обоим типом в интервале температур 300–450 К определены парциальные термодинамические функции TbTe и Tb в сплавах, на основании которых вычислены стандартные термодинамические функции образования и стандартные энтропии указанных теллуридов тербия.

**Ключевые слова:** теллуриды тербия, метод ЭДС, термодинамические функции.

**Источник финансирования:** Работа выполнена в рамках научной программы международной лаборатории «Перспективные материалы для спинтроники и квантовых вычислений», созданной на базе Института катализа и неорганической химии НАНА (Азербайджан) и Международного физического центра Доностиа (Испания) и частичной финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики - Грант EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/01/4-M-33.

**Для цитирования:** Имамалиева С. З., Бабанлы Д. М., Зломанов В. П., Тагиев Д. Б., Бабанлы М. Б. Термодинамические свойства теллуридов тербия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020; 22(4): 453–459. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3116>

**For citation:** Imamaliyeva S. Z., Babanly D. M., Zlomanov V. P., D. B. Taghiyev, M. B. Babanly. Thermodynamic properties of terbium tellurides. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 453–459. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3116>

✉ Самира Закир Имамалиева, e-mail: samira9597a@gmail.com



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Соединения редкоземельных элементов (РЗЭ) относятся к числу перспективных функциональных материалов, широко используемых в аэрокосмических системах и компонентах, мощных радиочастотных источниках, высокопроизводительных твердотельных инфракрасных лазерах, жестких дисках компьютеров, постоянных магнитах для высокоэффективных электродвигателей и т. д. [1, 2]. Среди них халькогениды РЗЭ, обладающие высокой термостойкостью, устойчивостью к резким изменениям условий окружающей среды, уникальными магнитными, оптическими и термоэлектрическими свойствами, нашли свое применение в современной электронной технике [3–10].

Разработка и оптимизация методов направленного синтеза новых фаз основывается на данных по фазовым равновесиям в соответствующих системах и термодинамическим свойствам промежуточных фаз [11–13].

Несмотря на то, что фазовые диаграммы большинства бинарных систем типа Ln–Te изучены подробно и представлены в ряде монографий и справочников [3, 10, 14], фазовая диаграмма системы Tb–Te до сих пор не построена. Согласно [3], тулий с теллуром образует соединения: TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbTe<sub>1.8</sub>, Tb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> и TbTe<sub>3</sub>. В более поздних работах [15, 16] подтверждены теллуриды TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbTe<sub>2</sub> и TbTe<sub>3</sub>. Однако какие-либо сведения о кристаллической структуре и свойствах Tb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> нами не обнаружены.

В литературе экспериментальные данные по термодинамическим свойствам теллуридов тербия приведены очень скудно. Справочник [17] приводит оценочные данные по стандартной энтальпии образования и энтропии TbTe и Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. В недавно опубликованных работах [18, 19] термодинамические функции образования и энтропия соединения Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> оценены методом «тетрадного эффекта».

В данной работе представлены результаты исследования твердофазных равновесий в системе Tb–Te и термодинамических свойств теллуридов тербия.

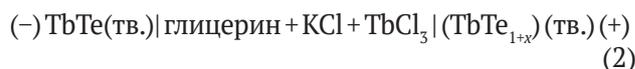
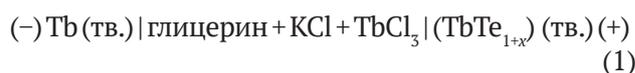
## 2. Эксперименты

Для проведения исследований были синтезированы сплавы системы Tb–Te с составами >50 ат. %Te (каждый массой 0.5 г). Были использованы элементы и реактивы, приобретенные у фирмы Alfa Aesar. Синтез проводили прямым взаимодействием элементарных тербия (CAS № 7440-27-9) и теллура (CAS № 13494-80-9) в

эвакуированных (10<sup>-2</sup> Па) кварцевых ампулах. С целью предотвращения взаимодействия тербия со стенками кварцевых ампул синтез сплавов проводили в графитизированных ампулах. Графитизирование ампул проводили термическим разложением толуола.

После выдерживания ампул при 1000 К в течение 24 часов сплавы были перетерты в порошок, тщательно перемешены, запрессованы в таблетки и отожжены при 800 К (сплавы составов 50–75 ат. % Te) или 700 К (сплавы составов >75 ат. % Te) в течение 1000 часов. Затем сплавы охлаждали в режиме выключенной печи, и образцы исследовали методом РФА (дифрактометр Bruker D8, CuK<sub>α1</sub>-излучение), результаты которого подтвердили существование соединений TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbTe<sub>2</sub> и TbTe<sub>3</sub>.

Для изучения термодинамических свойств фаз системы Tb–Te методом ЭДС нами были составлены концентрационные цепи типа (1) и (2) и измерены их ЭДС в интервале температур 300–450 К.



В качестве левого электрода в цепях типа (1) использовали тербий, а в цепях типа (2) – монотеллурид тербия с незначительным избытком теллура (состав TbTe<sub>1.01</sub>). Синтезированные равновесные сплавы с различными составами из двухфазных областей TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (50.3 и 55 ат. % Te), Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>+TbTe<sub>2</sub> (61 и 65 ат. % Te), TbTe<sub>2</sub>+TbTe<sub>3</sub> (68 и 72 ат. % Te) и TbTe<sub>3</sub>+Te (77 и 90 ат. % Te) были использованы в качестве правых электродов. Образец состава 50.3 ат. %Te (TbTe<sub>1.01</sub>) был использован в цепях типа (1) как правый электрод и при этом были получены воспроизводимые результаты.

Фазовый состав указанных сплавов подтвержден методом РФА. В качестве примера на рис. 1 приведены порошковые рентгенограммы сплавов с составами 55 ат. % Te. Как видно, образец двухфазен и состоит из двухфазной смеси соединений TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>.

Тербиевый электрод готовили путем закрепления куска металлического тербия на молибденовую проволоку (токоотвод), а все другие – запрессованием соответствующих порошковых сплавов на токоотводы в виде цилиндрических таблеток диаметром ~7 мм и толщиной 2–3 мм.

В обеих электрохимических цепях электролитом служил глицериновый раствор KCl с до-

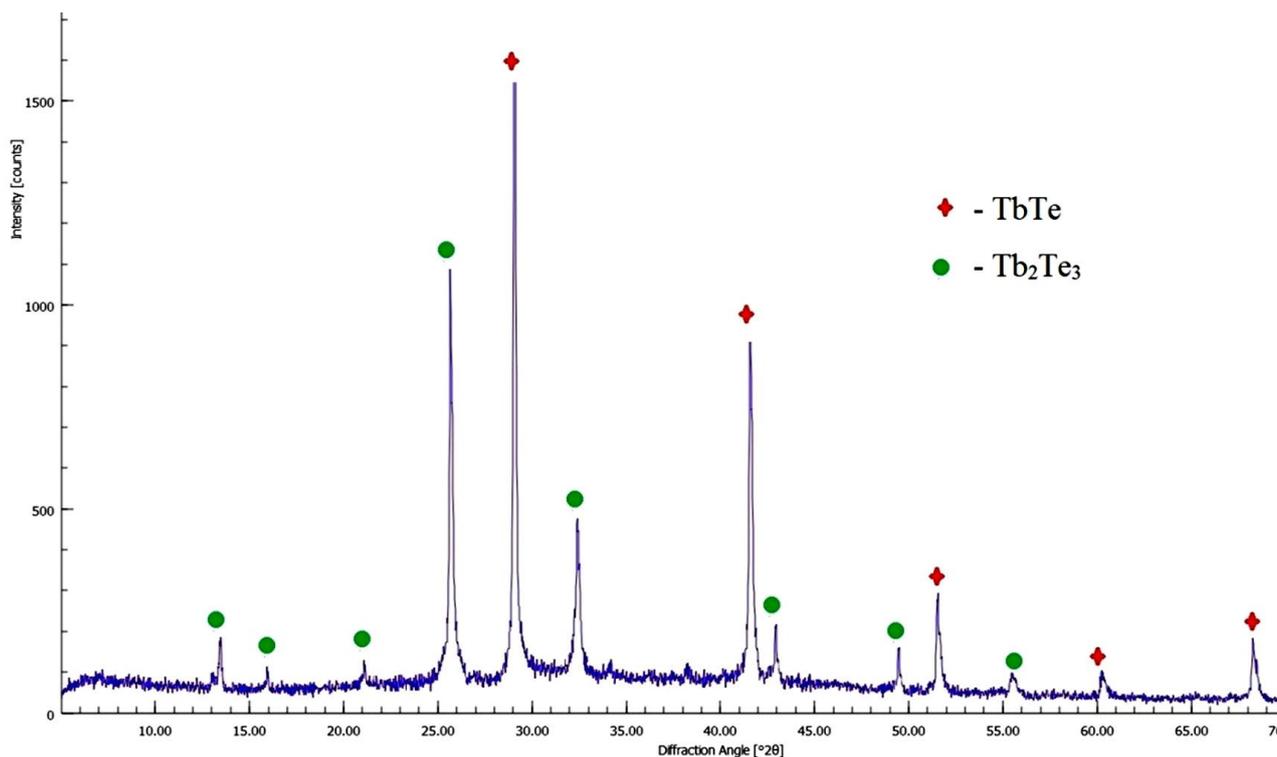


Рис. 1. Порошковая дифрактограмма сплавов из двухфазной области TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>

бавлением небольшого (0.1 %) количества TbCl<sub>3</sub>. Учитывая условие недопустимости присутствия влаги и кислорода в электролите, были использованы безводные, химически чистые соли KCl (CAS № 7447-40-7) и TbCl<sub>3</sub> (CAS № 10042-88-3), а глицерин (CAS № 56-81-5) тщательно обезвоживали и обезгаживали откачкой при температуре ~450 К.

Метод ЭДС с глицериновым электролитом в течение многих лет успешно применяется для термодинамического исследования ряда бинарных и тройных халькогенидных систем [20–26].

Методики приготовления электродов и электролита, а также сборки электрохимической ячейки подробно описаны в [20, 21, 25].

Измерения ЭДС проводили с помощью высокоомного цифрового вольтметра Keithley Model 193. Температуру электрохимической ячейки измеряли хромель-алюмелевыми термопарами и ртутным термометром с точностью 0.5 К.

Первые равновесные значения ЭДС цепей были получены после выдерживания ячейки при ~400 К в течение 40–60 ч, последующие – через каждые 3–4 часа после установления определенной температуры. Равновесными считали те значения ЭДС, которые не отличались друг от друга при неоднократном измерении при данной температуре более, чем на 0.2 мВ, независимо от направления изменения температуры. Для

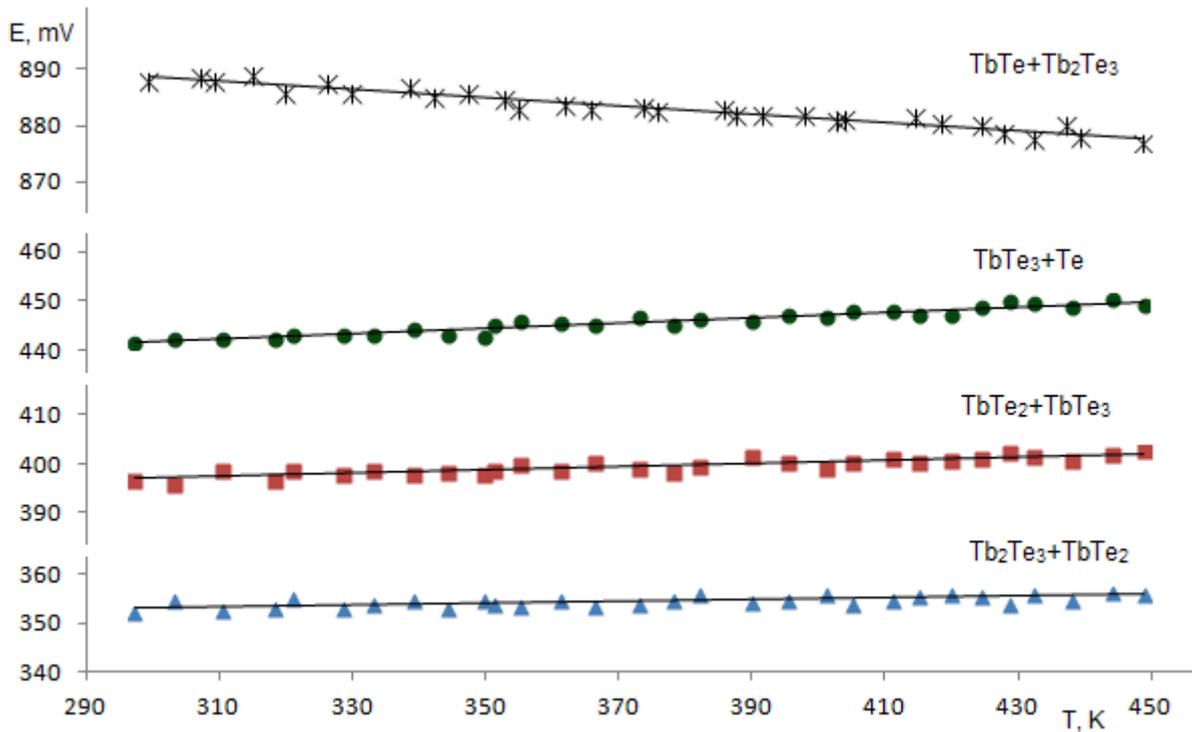
контроля обратимости цепей в течение эксперимента ЭДС каждого образца измеряли 2–3 раза при двух выборочных постоянных температурах.

Учитывая результаты наших предыдущих исследований сплавов Ln–Te методом ЭДС [22, 26], цепи типа (1) нами использованы только для изучения сплавов из области TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и получены воспроизводимые результаты для обоих электрод-сплавов. Для других фазовых областей были использованы цепи типа (2), которые привели к получению воспроизводимых данных. Из каждой гетерогенной области было исследовано по 2 сплава. Данные измерений ЭДС для обоих сплавов из одной гетерогенной области совпадали с точностью 0.5 мВ.

### 3. Результаты и их обсуждение

Полученные температурные зависимости ЭДС для всех изученных сплавов системы Tb–Te являются линейными (рис. 2), что дает возможность их обработки методом наименьших квадратов. Расчеты проводили с помощью компьютерной программы «Microsoft Office Excel 2003». Полученные линейные уравнения представлены в табл. 1 в виде:

$$E = a + bT \pm t \left[ \frac{S_E^2}{n} + \frac{S_E^2 (T - \bar{T})^2}{\sum (T_i - \bar{T})^2} \right]^{1/2}. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Температурные зависимости ЭДС цепей типа (1) и (2) для сплавов из областей и TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>+TbTe<sub>2</sub>, TbTe<sub>2</sub>+TbTe<sub>3</sub> и TbTe<sub>3</sub>+Te системы Tb–Te

**Таблица 1.** Уравнения температурной зависимости ЭДС цепей типа (1)\* и (2) в интервале 300–450 К

№	Фазовая область	$E, \text{ мВ} = a + bT \pm 2[S_E^2 / n + S_b^2(T - \bar{T})]^{1/2}$
1	TbTe <sub>3</sub> +Te	$348.29 + 0.01664T \pm 2 \left[ \frac{0.67}{30} + 1.13 \cdot 10^{-5}(T - 375.62) \right]^{1/2}$
2	TbTe <sub>2</sub> +TbTe <sub>3</sub>	$386.99 + 0.03379T \pm 2 \left[ \frac{0.62}{30} + 1.05 \cdot 10^{-5}(T - 375.62) \right]^{1/2}$
3	Tb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> +TbTe <sub>2</sub>	$425.19 + 0.05492T \pm 2 \left[ \frac{0.53}{30} + 8.9 \cdot 10^{-6}(T - 375.62) \right]^{1/2}$
4	*TbTe+Tb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	$910.32 - 0.07214T \pm 2 \left[ \frac{0.69}{30} + 1.18 \cdot 10^{-5}(T - 374.89) \right]^{1/2}$

В уравнении (3)  $n$  – число пар экспериментальных измерений  $E, \text{ мВ}$  и  $T, \text{ К}$ ;  $S_E$  – дисперсии отдельных измерений ЭДС, мВ;  $\bar{T}$  – средняя температура;  $t$  – критерий Стьюдента. Учитывая, что число экспериментальных точек  $n = 30$ , а доверительный уровень равен 95 %, критерий Стьюдента  $t \leq 2$ .

Из полученных уравнений (табл. 1) по соотношениям [20, 21]:

$$\Delta \bar{G}_i = -zFE, \tag{4}$$

$$\Delta \bar{S}_i = zF \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p = zFb, \tag{5}$$

$$\Delta \bar{H}_i = -zF \left[ E - T \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \right] = -zFa. \tag{6}$$

вычислены парциальные молярные свободная энергия Гиббса, энтальпия и энтропия TbTe в двухфазных сплавах Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>+TbTe<sub>2</sub>, TbTe<sub>2</sub>+TbTe<sub>3</sub> и TbTe<sub>3</sub>+Te (табл. 2) и тербия в сплавах TbTe+Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (табл. 3).

**Таблица 2.** Парциальные термодинамические функции TbTe в сплавах системы Tb–Te при 298 К

Фазовая область	$-\Delta\bar{G}_{\text{TbTe}}$	$-\Delta\bar{H}_{\text{TbTe}}$	$\Delta\bar{S}_{\text{TbTe}}$ Дж/(моль·К)
	кДж/моль		
TbTe <sub>3</sub> +Te	127.82±0.15	123.08±0.65	15.90±1.72
TbTe <sub>2</sub> +TbTe <sub>3</sub>	114.94±0.17	112.02±0.71	9.78±1.87
Tb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> +TbTe <sub>3</sub>	102.26±0.17	100.82±0.74	4.82±1.95

**Таблица 3.** Парциальные термодинамические функции тербия в сплавах Tb–Te при 298 К

Фазовая область	$-\Delta\bar{G}_{\text{Tb}}$	$-\Delta\bar{H}_{\text{Tb}}$	$\Delta\bar{S}_{\text{Tb}}$ Дж/(моль·К)
	кДж/моль		
TbTe <sub>3</sub>	385.10±0.33	386.58±1.40	-4.96±3.71
TbTe <sub>2</sub>	372.22±0.35	375.52±1.46	-11.07±3.86
Tb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	359.54±0.35	364.32±1.49	-16.03±3.94
TbTe	257.28±0.18	263.50±0.75	-20.88±1.99

Нетрудно показать, что величины, приведенные в табл. 2, представляют собой разность соответствующих парциальных молярных функции тербия для правого и левого электродов цепей типа (2). Например,

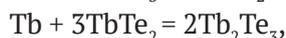
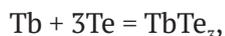
$$\Delta\bar{G}_{\text{TbTe}}(\text{TbTe}_{1+x}) = \Delta\bar{G}_{\text{Tb}}(\text{TbTe}_{1+x}) - \Delta\bar{G}_{\text{Tb}}(\text{TbTe}). \quad (7)$$

Тогда

$$\Delta\bar{G}_{\text{Tb}}(\text{TbTe}_{1+x}) = \Delta\bar{G}_{\text{TbTe}}(\text{TbTe}_{1+x}) + \Delta\bar{G}_{\text{Tb}}(\text{TbTe}) \quad (8)$$

Парциальные молярные функции тербия в сплавах TbTe<sub>1+x</sub> (правые электроды цепей типа (2)) рассчитаны по соотношению (8) и представлены в табл. 3.

Фазовые составы сплавов указанных двухфазных областей показывают, что парциальные молярные функции тербия в них являются термодинамическими характеристиками следующих реакций потенциалообразования (состояние веществ – кристаллическое):



Из этих уравнений реакций следует, что стандартные термодинамические функции образования теллуридов тербия могут быть строго вычислены по соотношениям:

$$\Delta Z^0(\text{TbTe}_3) = \Delta Z^0_{\text{Tb}},$$

$$\Delta Z^0(\text{TbTe}_2) = \frac{1}{3}\Delta Z^0_{\text{Tb}} + \frac{2}{3}\Delta Z^0(\text{TbTe}_3),$$

$$\Delta Z^0(\text{Tb}_2\text{Te}_3) = 0.5\Delta Z^0_{\text{Tb}} + 1.5\Delta Z^0(\text{TbTe}_2),$$

$$\Delta Z^0(\text{TbTe}) = \frac{1}{3}\Delta Z^0_{\text{Tb}} + \frac{1}{3}\Delta Z^0(\text{Tb}_2\text{Te}_3),$$

где  $Z \equiv G, H, S$ , а стандартные энтропии по:

$$S^0(\text{TbTe}_3) = [\Delta\bar{S}_{\text{Tb}} + S^0(\text{Tb})] + 3S^0(\text{Te}),$$

$$S^0(\text{TbTe}_2) = \frac{1}{3}[\Delta\bar{S}_{\text{Tb}} + S^0(\text{Tb})] + \frac{2}{3}S^0(\text{TbTe}_3),$$

$$S^0(\text{Tb}_2\text{Te}_3) = 0.5[\Delta\bar{S}_{\text{Tb}} + S^0(\text{Tb})] + 1.5S^0(\text{TbTe}_2),$$

$$S^0(\text{TbTe}) = \frac{1}{3}[\Delta\bar{S}_{\text{Tb}} + S^0(\text{Tb})] + \frac{1}{3}S^0(\text{Tb}_2\text{Te}_3).$$

При расчете стандартных энтропий соединений помимо собственных экспериментальных данных (табл. 3) использованы литературные данные [28] по стандартным энтропиям элементарных тербия ( $73.51 \pm 0.42$  кДж/моль) и теллура ( $49.50 \pm 0.21$  кДж/моль). Полученные результаты представлены в табл. 4. Погрешности находили методом накопления ошибок.

В табл. 4 представлены также оценочные данные для соединений TbTe и Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, приведенные в [17, 18].

#### 4. Заключение

Нами представлены результаты комплексного исследования твердофазных равновесий в системе Tb–Te и термодинамических свойств теллуридов тербия методами ЭДС и РФА. На основании экспериментальных данных установлено, что в системе образуются соединения TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbT<sub>2</sub> и TbTe<sub>3</sub>. Из данных измерений ЭДС концентрационных цепей типов (1) и (2) в интервале температур 300–450 К впервые определены парциальные термодинамические функции TbTe

**Таблица 4.** Стандартные интегральные термодинамические функции теллуридов тербия

Соединение	$-\Delta_f G^0(298\text{ K})$	$-\Delta_f H^0(298\text{ K})$	$\Delta S^0(298\text{ K})$	$S^0(298\text{ K})$
	кДж/моль		Дж/(моль·К)	
TbTe <sub>3</sub>	385.1±0.3	386.6±1.4	-5.0±3.7	194.9±4.8
TbTe <sub>2</sub>	380.8±0.4	382.9±1.5	-7.0±3.8	165.6±4.6
Tb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	750.98±0.7	756.5±3.0	-18.5±7.8	277.0±9.3
	–	795±125 [17]		264±21 [17]
	803.5	818 [19]		247.6 [19]
TbTe	336.1±0.3	340.0±1.3	-13.13.3	109.9±3.9
		314±63 [17]		97±10 [17]

и Tb в сплавах. Комбинированием указанных данных вычислены стандартные термодинамические функции образования и стандартные энтропии соединений TbTe, Tb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, TbT<sub>2</sub> и TbTe<sub>3</sub>.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках научной программы международной лаборатории «Перспективные материалы для спинтроники и квантовых вычислений», созданной на базе Института катализа и неорганической химии НАНА (Азербайджан) и Международного физического центра Доностиа (Испания) и частичной финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики - Грант EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/01/4-M-33.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Jha A. R. *Rare earth materials: properties and applications*. United States. CRC Press. 2014. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17045>
2. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(4): 1285–1290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
3. Ярембаш Е. И., Елисеев А. А. *Халькогениды редкоземельных элементов*. М.: Наука; 1975. 258 с.
4. Y-Sc., La-Lu. *Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry*. In: Hartmut Bergmann (Ed.), Rare Earth Elements, 8<sup>th</sup> Edition, Springer-Verlag Heidelberg GmbH. Berlin; 1987.
5. Muthuselvam I. P., Nehru R., Babu K. R., Saranya K., Kaul S. N., Chen S-M, Chen W-T, Liu Y., Guo G-Y, Xiu F., Sankar R. Gd<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> an antiferromagnetic

semimetal. *J. Condens. Matter Phys.* 2019;31(28): 285802-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab1570>

6. Huang H., Zhu J-J. The electrochemical applications of rare earth-based nanomaterials. *Analyst*. 2019;144(23): 6789–6811. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9AN01562K>

7. Saint-Paul M., Monceau P. Survey of the thermodynamic properties of the charge density wave systems. *Adv. Cond. Matter Phys.* 2019: 1–5 DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2138264>

8. Cheikh D., Hogan B. E., Vo T., Allmen P. V., Lee K., Smiadak D. M., Zevalkink A., Dunn B. S., Fleurial J-P., Bux S. L. Praseodymium telluride: A high temperature, high-ZT thermoelectric material. *Joule*. 2018; 2(4): 698–709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.01.013>

9. Patil S. J., Lokhande A. C., Lee D. W., Kim J. H., Lokhande C. D. Chemical synthesis and supercapacitive properties of lanthanum telluride thin film. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017; 490: 147–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.020>

10. Zhou X. Z., Zhng K. H. L, Xiog J., Park J-H, Dickerson J-H., He W. Size- and dimensionality dependent optical, magnetic and magneto-optical properties of binary europium-based nanocrystals: EuX (X=O, S, Se, Te). *Nanotechnology*. 2016;27(19): 192001-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/19/192001>

11. Okamoto H. *Desk handbook phase diagram for binary alloys*. ASM International. 2000. 900 p.

12. Babanly M. B., Mashadiyeva L. F., Babanly D. M., Imamaliyeva S. Z., Tagiyev D. B., Yusibov Y. A.. Some issues of complex studies of phase equilibria and thermodynamic properties in ternary chalcogenide systems involving Emf measurements. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2019;64(13): 1649–1672. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0036023619130035>

13. Imamaliyeva S. Z., Babanly D. M., Tagiev D. B., Babanly M. B. Physicochemical aspects of development of multicomponent chalcogenide phases having the Tl<sub>5</sub>Te<sub>3</sub> structure. A review. *Russian Journal of Inorganic*

*Chemistry* 2018;63(13): 1703–1724 DOI: <https://doi.org/10.1134/s0036023618130041>

14. Massalski T. B. Binary alloys phase diagrams, second edition. ASM International, Materials Park, Ohio; 1990. 3835 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.19910031215>

15. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Под ред. Лякишева Н. П. Справочник в 3-х томах. М: Машиностроение; 1996, 1997, 2001.

16. Eliseev A. A., Orlova I. G., Martynova L. F., Pechennikov A. V., Chechernikov V. I. Paramagnetism of some terbium chalcogenides. *Inorganic Materials*. 1987;23: 1833–1835.

17. Mills K. C. *Thermodynamic data for inorganic sulphides, selenides, and tellurides*. London: Butterworth; 1974. 854 p.

18. Vassiliev V. P., Lysenko V. A. Gaune-Escard M. Relationship of thermodynamic data with periodic law. *Pure and Applied Chemistry*. 2019;91(6): 879–884. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2018-0717>

19. Vassiliev V. P., Lysenko V. A. New approach for the study of thermodynamic properties of lanthanide compounds. *Electrochimica Acta*. 2016;222: 1770–1775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.075>

20. Морачевский А. Г., Воронин Г. Ф., Гейдерих В. А., Куценко И. Б. Электрохимические методы исследования в термодинамике металлических систем. Москва: «Академкнига», 2003. 334 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603291>

21. Бабанлы М. Б., Юсиров Ю. А. Электрохимические методы в термодинамике неорганических систем. Баку: ЭЛИМ; 2011. 306 с.

22. Imamaliyeva S. Z., Mehdiyeva I. F., Taghiyev D. B., et al. Thermodynamic investigations of the erbium tellurides by EMF method. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020;21(2): 312–318. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.2.312-318>

23. Hasanova G. S., Aghazade A. I., Yusibov Yu. A., Babanly M. B. Thermodynamic investigation of the  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ – $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  system by the EMF method. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(3): 310–319. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2961>

24. Imamaliyeva S. Z., Babanly D. M., Gasanly T. M., et al.: Thermodynamic properties of  $\text{Tl}_9\text{GdTe}_6$  and  $\text{TlGdTe}_2$ . *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2018;92(11): 2111–2116. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0036024418110158>

25. Мансимова Ш. Г., Оруджлу Э. Н., Султанова С. Г., Бабанлы М. Б. Термодинамические свойства

ва  $\text{Pb}_6\text{Sb}_6\text{Se}_{17}$ . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017;19(4): 536–541. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/234> (In Eng.)

26. Imamaliyeva S. Z., Gasanly T. M., Mahmudova M. A. Thermodynamic properties of GdTe compound. *Physics*. 2017;22: 19–21. Режим доступа: [http://physics.gov.az/Dom/2017/AJP\\_Fizika\\_04\\_2017\\_en.pdf](http://physics.gov.az/Dom/2017/AJP_Fizika_04_2017_en.pdf)

27. Imamaliyeva S. Z., Musayeva S. S., Babanly D. M., Jafarov Y. I., Taghiyev D. B., Babanly M. B. Determination of the thermodynamic functions of bismuth chalcogenides by EMF method with morpholinium formate as electrolyte. *Thermochim. Acta*. 2019; 679: 178319–17825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178319>

28. База данных термических констант веществ. Электронная версия под ред. Юнгмана В. С., 2006. Режим доступа: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.html>

### Информация об авторах

Имамалиева Самира Закир, PhD по химии, доцент, Институт катализа и неорганической химии, НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан; e-mail: [samira9597a@gmail.com](mailto:samira9597a@gmail.com). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8193-2122>.

Бабанлы Дунья Магомед, д. х. н., доцент, Институт катализа и неорганической химии, НАН Азербайджана, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджано-французский университет (UFAZ), Баку, Азербайджан; e-mail: [dunya.babanly@ufaz.az](mailto:dunya.babanly@ufaz.az). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8330-7854>

Зломанов Владимир Павлович, д. х. н., профессор, Московский государственный университет, Москва, Российская Федерация; e-mail: [zlomanov1@mail.ru](mailto:zlomanov1@mail.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0327-4715>.

Тагиев Дильгам Бабар, академик, директор, Институт катализа и неорганической химии, НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан; e-mail: [dtaghiyev@rambler.ru](mailto:dtaghiyev@rambler.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6175-9035>

Бабанлы Магомед Баба, д. х. н., профессор, член-корр., зам. директора по научной работе, Институт катализа и неорганической химии, НАН Азербайджана, Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан; e-mail: [babanlymb@gmail.com](mailto:babanlymb@gmail.com). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5962-3710>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.