

УДК 536.631

## СИНТЕЗ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ДИСЕЛЕНИДА ПЛАТИНЫ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

© 2025 г. А. В. Тюрин<sup>1,\*</sup>, Д. А. Чареев<sup>2, 3, 4</sup>,  
Н. А. Полотнянко<sup>2</sup>, Г. Е. Никифорова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук,  
Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

<sup>2</sup>Государственный университет “Дубна”,

ул. Университетская, 19, Дубна, Московская обл., 141982 Россия

<sup>3</sup>Институт экспериментальной минералогии им. Д. С. Коржинского Российской академии наук,  
ул. Академика Осипьяна, 4, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

<sup>4</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062 Россия

\*e-mail: tyurin@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 06.12.2024 г.

После доработки 26.12.2024 г.

Принята к публикации 27.12.2024 г.

Работа посвящена синтезу кристаллического диселенида платины PtSe<sub>2</sub> и изучению его термодинамических свойств. По результатам измерений изобарной теплоемкости PtSe<sub>2</sub> в интервале 5–813 К методами адиабатической и дифференциальной сканирующей калориметрии получены стандартные термодинамические функции: теплоемкость, энтропия, изменение энタルпии и приведенная энергия Гиббса. При 298.15 К рассчитаны  $C^\circ = 70.43 \pm 0.35 \text{ Дж}/(\text{К моль})$ ,  $S^\circ = 100.8 \pm 0.5 \text{ Дж}/(\text{К моль})$ ,  $H^\circ(298.15 \text{ К}) - H^\circ(0) = 14.64 \pm 0.08 \text{ кДж}/\text{моль}$ ,  $\Phi^\circ = 51.74 \pm 0.26 \text{ Дж}/(\text{К моль})$ . С помощью литературных и справочных данных оценена энергия Гиббса образования  $\Delta_f G^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ кр.}, 298.15 \text{ К}) = -109.1 \pm 2.0 \text{ кДж}/\text{моль}$ . Методом фрактальной обработки данных по теплоемкости подтверждена слоистая структура диселенида платины и оценена его температура Дебая, равная  $350 \pm 15 \text{ К}$ .

**Ключевые слова:** теплоемкость, диселенид платины, халькогениды платиноидов, судовиковит, адиабатическая калориметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, энтропия

**DOI:** 10.31857/S0002337X25010028, **EDN:** KEKQAY

### ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает комплексные калориметрические исследования халькогенидов переходных металлов [1, 2] с использованием собственных синтезированных образцов — аналогов природных минералов, имеющих перспективы для применения. Одним из таких соединений является диселенид платины PtSe<sub>2</sub>, полупроводниковый двухмерный материал со слоистой структурой [3–5], который может быть использован в фотокатализе и валитронике [6].

Согласованные данные о термодинамических свойствах веществ системы Pt–Se практически отсутствуют в литературе. Следовательно, получение новых значений термодинамических функций для PtSe<sub>2</sub>, который встречается в природе в виде минерала судовиковита [7], представляет несомненный интерес для исследования.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Синтез и анализ диселенида платины.** Согласно фазовой диаграмме системы Pt–Se [8], диселенид платины является строго стехиометричной фазой, которая конгруэнтно плавится при температуре 1245°C. Синтез образца проводили в вакуумированных ( $10^{-4}$  бар) ампулах из кварцевого стекла [9] из простых веществ, взятых в стехиометрическом соотношении с небольшим избытком селена. В качестве реактивов использовали платиновые пластины (чистота 99.95%) и кристаллический селен (чистота 99.999%). Ампулы нагревали до 550°C и выдерживали при этой температуре в течение недели. В результате платина и селен образовывали спек, а избыточный селен конденсировался в холодной части ампулы. Затем ампулу извлекали, вещество перетирали в агатовой ступке и снова, вместе с остатками селена, запаивали в ампулы под вакуумом и отжигали при 450°C в течение месяца. Зная изначальные

массы платины и селена и взвесив непрореагированную селеновую каплю, определили, что получившееся вещество имеет состав, очень близкий к стехиометрическому ( $\text{PtSe}_{2.018}$ ).

Кристаллическая структура была подтверждена методом рентгеновской порошковой дифрактометрии. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ( $\text{Cu}K_{\alpha}$ -излучение). Фазовая чистота образца определялась сравнением с базой данных PDF2.

**Измерения изобарной теплоемкости.** Для изучения низкотемпературной теплоемкости  $\text{PtSe}_2$

использовали адиабатический вакуумный калориметр БКТ-3 (ИП Малышев А.В., Московская обл.).

Методом адиабатической калориметрии (АК) теплоемкость измеряли в интервале 4.81–349.40 К с шагом по температуре 0.5–1.0 К в области 14–80 К и 1.0–4.0 К выше 80 К. Кривая температурной зависимости теплоемкости определена в 152 экспериментальных точках (табл. 1). Все измерения на установке проводились автоматически и контролировались компьютерно-измерительной системой, в состав которой входил блок аналогового регулирования и сбора дан-

**Таблица 1.** Экспериментальные значения теплоемкости  $\text{PtSe}_2$  в низкотемпературной области

$T, \text{ К}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{К моль})$	$T, \text{ К}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{К моль})$	$T, \text{ К}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{К моль})$	$T, \text{ К}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{К моль})$
<b>Серия 1 — азот</b>							
79.09	37.11	195.29	65.13	344.61	71.33	39.37	14.07
81.78	38.48	198.59	65.38	349.40	71.41	40.99	15.02
83.81	39.43	202.31	65.65	<b>Серия 2 — гелий</b>		42.61	15.93
85.85	40.49	206.39	66.01	4.81	0.0557	44.02	16.58
87.89	41.48	210.45	66.32	4.98	0.0647	45.58	17.53
89.92	42.43	214.48	66.52	5.08	0.0724	46.93	18.43
91.96	43.43	218.47	66.81	5.35	0.0944	48.55	19.29
94.00	44.11	222.40	67.03	5.62	0.114	50.06	20.21
96.04	44.99	226.28	67.33	5.89	0.143	51.53	21.09
98.08	45.71	230.01	67.55	6.43	0.193	53.14	22.11
100.12	46.55	233.91	67.74	6.94	0.258	54.76	23.03
102.78	47.46	237.86	68.01	7.51	0.315	56.11	23.89
106.06	48.78	241.81	68.17	8.32	0.432	57.73	24.87
109.35	49.89	245.64	68.39	9.22	0.533	59.35	25.85
112.64	50.84	249.50	68.65	10.09	0.6805	60.84	26.71
115.93	51.75	253.24	68.79	10.86	0.7721	62.29	27.58
119.21	52.74	256.94	68.99	11.83	0.9799	63.78	28.51
122.51	53.66	260.51	69.12	12.70	1.134	65.25	29.42
125.81	54.55	264.04	69.28	13.57	1.367	66.72	30.28
129.11	55.39	267.52	69.44	14.53	1.591	68.26	31.17
132.42	56.11	270.95	69.59	15.34	1.845	69.88	32.05
135.72	56.87	274.32	69.67	16.15	2.212	71.23	32.85
139.03	57.47	277.63	69.79	17.05	2.499	73.12	33.89
142.34	58.03	280.88	69.85	17.92	2.901	75.05	34.98
145.66	58.78	284.08	69.99	18.79	3.204	77.08	36.01
148.97	59.39	286.50	70.13	19.66	3.609	79.06	37.11
152.28	59.82	289.58	70.21	20.74	4.226	81.22	38.17
155.59	60.41	292.60	70.31	22.09	4.914	83.17	39.27
158.90	60.99	295.55	70.41	23.71	5.707	85.27	40.19
162.21	61.38	298.44	70.52	25.07	6.487	87.43	41.15
165.52	61.85	301.26	70.58	26.54	7.217	89.59	42.19
168.83	62.24	303.70	70.63	27.76	7.899	91.48	43.01
172.13	62.67	307.71	70.69	29.11	8.554	93.61	44.02
175.44	63.12	312.73	70.75	30.46	9.262	95.63	44.74
178.75	63.58	318.40	70.76	32.08	10.21	97.69	45.63
182.06	63.85	323.93	71.01	33.58	11.01	99.85	46.48
185.37	64.22	329.31	71.13	35.05	11.72		
188.68	64.41	334.56	71.21	36.40	12.43		

ных. Использовали калориметрическую ампулу в виде тонкостенного цилиндрического титанового сосуда (внутренний объем 1 см<sup>3</sup>, масса ~1.6 г), завинчивающегося бронзовой крышкой с индивидуальным уплотнением для герметизации. Температура измерялась железо-родиевым термометром сопротивления ( $R \approx 100$  Ом). Чувствительность термометрической схемы  $1 \times 10^{-3}$  К, абсолютная погрешность измерений температуры  $\pm 5 \times 10^{-3}$  К в соответствии с МТШ-90. Детальная конструкция и принцип работы калориметра приведены в работах [10, 11]. Надежность измерительной процедуры была проверена путем измерения теплоемкости меди квалификации “ос.ч.”, стандартных синтетического корунда [12] и бензойной кислоты марки К-2 [13]. Навеска образца составляла 1.20652 г. Молекулярная масса принималась равной теоретической — 353.026 г/моль [14].

Высокотемпературные измерения теплоемкости образца проводили на установке синхронного термического анализа NETZSCH DSC 404 F1 Pegasus (Германия) в атмосфере газообразного аргона с использованием калибровки по температуре плавления металлических стандартов, 1 шаг — 5 К, погрешность измерений 2%. При измерениях теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) от 318 до 813 К расчет  $C_p$  осуществляли с помощью метода отношений, при этом в качестве эталона использовали сапфир SRM 720 [15]. Для обработки полученных экспериментальных данных применяли пакет программ NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным рентгенофазового анализа, полученный образец диселенида платины не содержал примесных фаз. Дифрактограмма PtSe<sub>2</sub> была проиндексирована в гексагональной структуре (пр.гр.  $P-3m$ ) с параметрами кристаллической решетки  $a = 3.7274(2)$  Å,  $c = 5.0842(3)$  Å,  $V = 61.174(6)$  Å<sup>3</sup> (рис. 1).

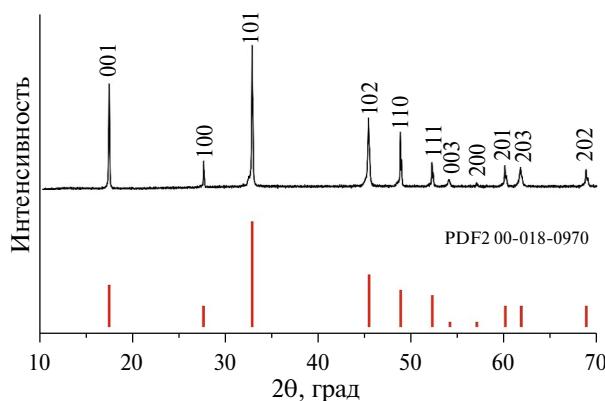


Рис. 1. Дифрактограмма образца PtSe<sub>2</sub> (приведена штрих-диаграмма эталонного образца).

Температурная зависимость теплоемкости PtSe<sub>2</sub> в области низких и высоких температур представляет собой гладкую, монотонно возрастающую кривую без видимых аномалий и фазовых переходов (рис. 2). Кривая теплоемкости, полученная с помощью ДСК, плавно продолжает кривую с результатами адиабатических исследований (на участке 318–349 К очень близки значения как  $C_p$ , так и первой производной теплоемкости). Экспериментальная зависимость теплоемкости PtSe<sub>2</sub> в интервале 4.81–813 К была описана методом наименьших квадратов с помощью аппроксимирующего полинома [16]:

$$C_p(T) = \sum_0^{14} A_j U^j, \quad (1)$$

где  $U = \ln\left(\frac{T}{400}\right)$  — логарифмическая подстановка,  $A$  — коэффициенты полинома.

Рассчитанные коэффициенты уравнения (1), приведенные в табл. 2, позволили определить стандартную изобарную теплоемкость PtSe<sub>2</sub> при 298.15 К, равную 70.43 Дж/(К моль). Рассчитанное по правилу аддитивности значение  $C_p(298.15) = 76.57$  Дж/(К моль) отличается от экспериментального на 8.5% при погрешности эксперимента  $\pm 3\%$ . По этой причине расчет по методу Неймана–Коппа нельзя использовать для оценки высокотемпературной теплоемкости халькогенидов платины.

Попытки описать высокотемпературную теплоемкость диселенида платины с помощью наиболее часто используемого уравнения Майера–Келли [17] также не увенчались успехом, поскольку выше 600 К кривая  $C_p(T)$  начинает загибаться вверх (рис. 2). Аналогичная ситуация наблюдалась и у других халькогенидов [18–22]. По этой причине для описания теплоемкости  $C_p = f(T)$  было использовано более сложное выражение

$$C_p = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3 + e \times T^{-2}. \quad (2)$$

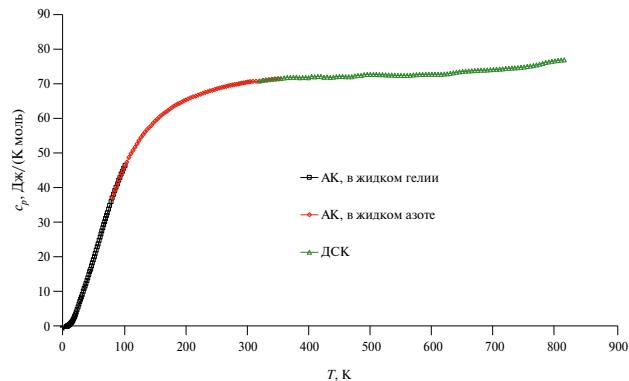


Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости образца PtSe<sub>2</sub>.

**Таблица 2.** Коэффициенты уравнения (1)

<i>j</i>	$A_j$ Дж/(К моль)
0	$0.719872 \times 10^2$
1	$0.271527 \times 10^1$
2	$-0.672551 \times 10^1$
3	$0.10074994 \times 10^2$
4	$0.10709153 \times 10^2$
5	$-0.17558198 \times 10^1$
6	$-0.749015804 \times 10^1$
7	$0.5464309135 \times 10^1$
8	$0.12096791996 \times 10^2$
9	$0.53443630116 \times 10^1$
10	$-0.61575445424 \times 10^0$
11	$-0.1348111361965 \times 10^1$
12	$-0.525756104987 \times 10^0$
13	$-0.1010766243617 \times 10^0$
14	$-0.100001312081 \times 10^{-1}$
15	$-0.40775988898 \times 10^{-3}$

Коэффициенты уравнения (2) приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Коэффициенты уравнения (2), описывающего зависимость  $C_p = f(T)$  в области 298–813 К

Коэффициент	Значение
<i>a</i>	71.37342087
<i>b</i>	0.03070095958
<i>c</i>	$-8.82517975 \times 10^{-5}$
<i>d</i>	$7.359309462 \times 10^{-8}$
<i>e</i>	-363690.0394

**Расчет стандартных термодинамических функций.** По полученным экспериментальным данным рассчитаны стандартные термодинамические функции  $C_p^\circ(T)$ ,  $S^\circ(T)$ ,  $H^\circ(T) - H^\circ(0)$  и  $\Phi^\circ(T)$  в области от 5 до 800 К (табл. 4). Отметим, что значения рассчитанных в настоящей работе термодинамических функций для PtSe<sub>2</sub> (кр.) определены впервые.

**Таблица 4.** Сглаженные значения теплоемкости и термодинамических функций PtSe<sub>2</sub>

<i>T</i> , К	$C_p^\circ$ , Дж/(К моль)	$S^\circ$ , Дж/(К моль)	$H^\circ(T) - H^\circ(0)$ , Дж/моль	$\Phi^\circ$ , Дж/(К моль)
5	0.0307	0.0102	0.0384	0.00256
10	0.6912	0.2140	1.689	0.04511
15	1.728	0.6629	7.400	0.170
20	3.847	1.429	20.98	0.380
25	6.439	2.563	46.64	0.697
30	9.055	3.968	85.39	1.122
35	11.68	5.560	137.2	1.640
40	14.40	7.296	202.4	2.237
45	17.24	9.155	281.4	2.901
50	20.20	11.12	374.9	3.624
60	26.25	15.34	607.1	5.221
70	32.15	19.83	899.4	6.984
80	37.57	24.49	1249	8.880
90	42.37	29.20	1649	10.88
100	46.52	33.88	2094	12.94
110	50.06	38.48	2577	15.06
120	53.05	42.97	3093	17.20
130	55.57	47.32	3637	19.35
140	57.71	51.52	4203	21.50
150	59.52	55.56	4790	23.63
160	61.07	59.46	5393	25.75
170	62.41	63.20	6010	27.84
180	63.57	66.80	6640	29.91
190	64.58	70.26	7281	31.94
200	65.47	73.60	7931	33.94

**Таблица 4.** Окончание

$T, \text{К}$	$C_p^\circ, \text{Дж}/(\text{К моль})$	$S^\circ, \text{Дж}/(\text{К моль})$	$H^\circ(T) - H^\circ(0), \text{Дж}/\text{моль}$	$\Phi^\circ, \text{Дж}/(\text{К моль})$
210	66.26	76.81	8590	35.91
220	66.96	79.91	9256	37.84
230	67.59	82.90	9929	39.73
240	68.15	85.79	10610	41.58
250	68.66	88.59	11290	43.43
260	69.11	91.29	11980	45.21
270	69.51	93.90	12670	46.98
280	69.87	96.44	13370	48.69
290	70.20	98.89	14070	50.38
298.15	70.43	100.8	14640	51.74
300	70.48	101.3	14780	52.01
310	70.74	103.6	15480	53.65
320	70.96	105.8	16190	55.25
330	71.16	108.0	16900	56.82
340	71.33	110.2	17610	58.37
350	71.48	112.2	18330	59.86
400	71.99	121.8	21920	67.01
500	72.40	137.9	29140	79.64
600	72.91	151.2	36400	90.49
700	74.12	162.5	43740	99.99
800	76.57	172.5	51260	108.4

Абсолютная энтропия  $\text{PtSe}_2$  при 298.15 К (табл. 4), а также справочные величины энтропии платины и селена [23] позволили рассчитать энтропию образования диселенида платины  $\Delta_f S^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ (кр.)}, 298.15) = -25.4 \pm 0.5 \text{ Дж}/(\text{К моль})$ . Используя это значение и энталпию образования  $\Delta_f H^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ (кр.)}, 298.15) = -116.7 \pm 1.6 \text{ кДж}/\text{моль}$ , определенную Столяровой и Осадчим [24], оценили энергию Гиббса образования  $\text{PtSe}_2$  при 298.15 К —  $109.1 \pm 2.0 \text{ кДж}/\text{моль}$ . Данная величина в справочных изданиях отсутствует.

**Фрактальная размерность и характеристическая температура.** Температура Дебая, являющаяся одной из важнейших характеристик твердого тела, может быть определена на основании данных по теплоемкости. Схема расчета этой величины для соединений  $\text{PtS}_2$ ,  $\text{PtSe}_2$  и  $\text{PtTe}_2$  достаточно проста, поскольку их колебательный спектр не содержит частот внутриионных колебаний, а измеренная теплоемкость может быть представлена в виде суммы вкладов изохорной теплоемкости  $C_V$  (в нашем случае это вклад, учитывающий решеточные колебания) и работы расширения решетки  $C_p - C_V$ .

Приближение Дебая, описываемое уравнением для теплоемкости при постоянном объеме, пригодно лишь для изотропных сред. В случае слоистых структур целесообразнее применять выражение вида [25]

$$C_V = 3R r \left[ D(D+1) \left( \frac{T}{\Theta} \right)^D \int_0^{\Theta/T} \frac{x^D dx}{e^x - 1} - \frac{D\Theta/T}{e^{\Theta/T} - 1} \right], \quad (3)$$

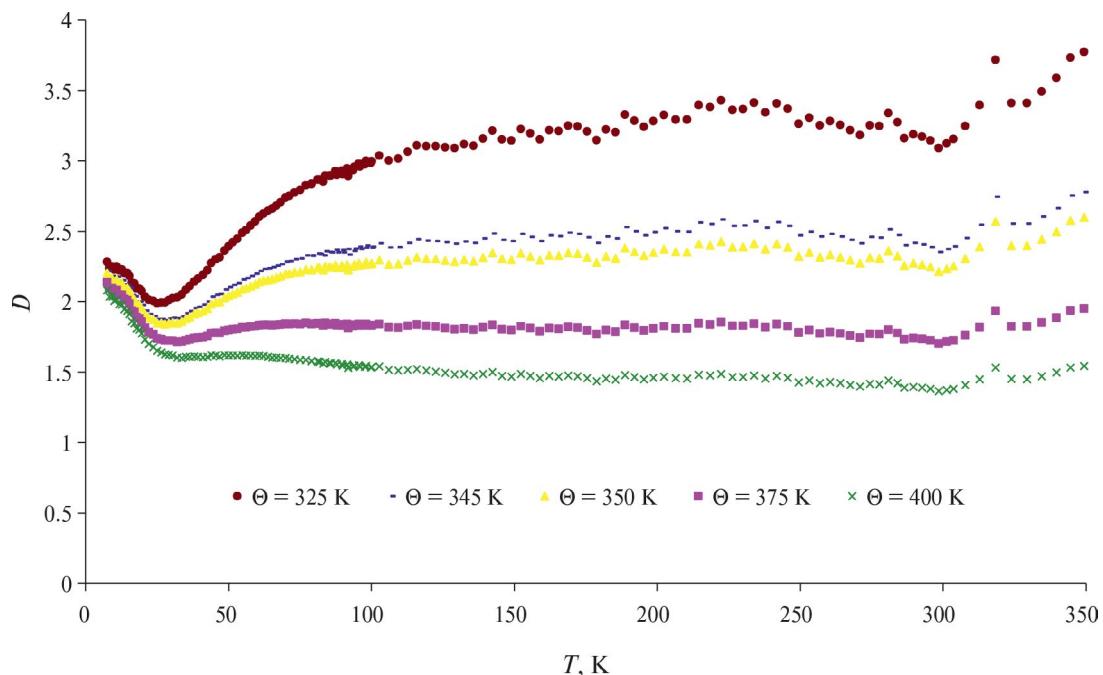
где  $r$  — количество атомов в элементарной ячейке.

Необходимо учитывать, что корректное применение данной модели возможно только в том случае, когда вещество не претерпевает фазовых превращений в изучаемом диапазоне температур, поскольку вклад аномальной теплоемкости может привести к большим ошибкам расчета температуры Дебая.

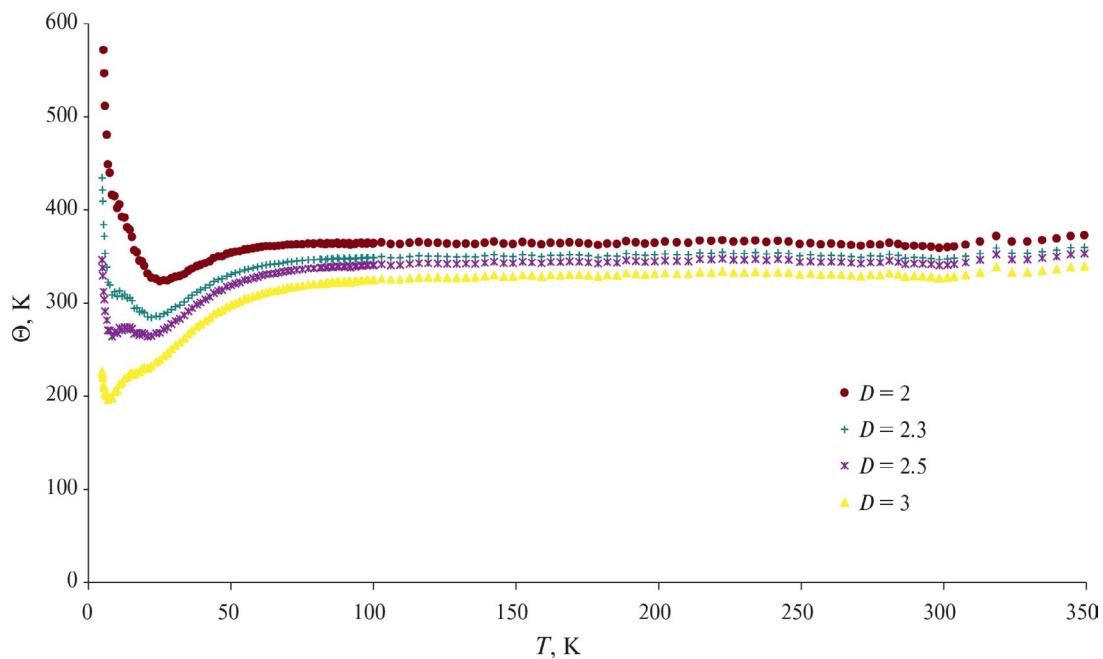
Как уже отмечалось, диселенид платины имеет слоистую структуру, поэтому его фрактальная размерность ( $D$ ) будет близка к двум [26]. На рис. 3 приведены температурные зависимости

фрактальной размерности, все кривые стремятся к значению  $D = 2.3$ , что также подтверждает слоистую структуру соединения, при этом между слоями действуют слабые ван-дер-ваальсовы или ковалентные взаимодействия [27]. Ориентируясь на это значение фрактальной размер-

ности, мы оценили характеристическую температуру  $\Theta$  (рис. 4) —  $350 \pm 15$  К. Нелинейность графика при низких температурах обусловлена неучтенными квантовыми эффектами и использованием в расчетах изобарной теплоемкости вместо изохорной.



**Рис. 3.** Температурные зависимости фрактальной размерности  $D = f(T)$  при различных фиксированных характеристических температурах Дебая  $\Theta$ .



**Рис. 4.** Температурные зависимости характеристической температуры Дебая  $\Theta = f(T)$  при различных фиксированных фрактальных размерностях:  $D = 2, 2.3, 2.5, 3$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные по измерению изобарной теплоемкости  $\text{PtSe}_2$  в широком интервале температур двумя калориметрическими методами позволили рассчитать для диселенида платины значения стандартных термодинамических функций (теплоемкости, энтропии, изменения энталпии и приведенной энергии Гиббса, фрактальной размерности, температуры Дебая). Используя собственное значение абсолютной энтропии при 298.15 К, с помощью литературных и справочных данных оценена стандартная энергия Гиббса образования  $\Delta_f G^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ кр., } 298.15 \text{ K}) = -109.1 \pm 2.0 \text{ кДж/моль}$ .

Результаты настоящей работы можно использовать при изучении системы Pt–Se для анализа геохимических и прикладных исследований, в частности, стадий месторождений платиновых минералов.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Синтез диселенида платины выполнен в рамках темы FMUF-2022-0002 НИР ИЭМ РАН и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Уральского федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030). Измерение теплоемкости диселенида платины выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чареев Д.А., Тюрин А.В., Полотнянко Н.А., Чареева П.В. Синтез и термодинамические функции дителлурида платины в низкотемпературной области // Неорган. Материалы. 2023. Т. 59. № 8. С. 859–865.  
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23080031>
- Тюрин А.В., Полотнянко Н.А., Тестов Д.С., Чареев Д.А., Хорошилов А.В. Термодинамические функции дисульфида платины  $\text{PtS}_2$  в широком интервале температур // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 2. С. 125–134.  
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20020177>
- Kjekshus A.* On the reaction between platinum and sulfur, selenium or tellurium. I. Preparation of  $\text{PtS}_2$  and  $\text{PtTe}$  // Acta Chem. Scand. 1961. V. 15. P. 159–166.  
<https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.15-0159>
- Furuseth S., Selte K., Kjekshus A.* Redetermined crystal structures of  $\text{NiTe}_2$ ,  $\text{PdTe}_2$ ,  $\text{PtS}_2$ ,  $\text{PtSe}_2$  and  $\text{PtTe}_2$  // Acta Chem. Scand. 1965. V. 19. № 1. P. 257–258.  
<https://doi.org/10.3891/ACTA.CHEM.SCAND.19-0257>
- Wang Y. et al.* Monolayer  $\text{PtSe}_2$ , a new semiconducting transition-metal-dichalcogenide, epitaxially grown by direct selenization of Pt // Nano Lett. 2015. V. 15. № 6. P. 4013–4018.  
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00964>
- Wang G. et al.* Layered  $\text{PtSe}_2$  for sensing, photonic, and (opto-) electronic applications // Adv. Mater. 2021. V. 33. № 1. P. 2004070.  
<https://doi.org/10.1002/adma.202004070>
- Полеховский Ю.С., Тарасова И.П., Несторов А.П., Пахомовский Я.А., Бахчисарайцев А.Ю.* Судовиковит  $\text{PtSe}_2$  — новый селенид платины из метасоматитов Южной Карелии // Докл. АН. 1997. Т. 354. № 1. С. 82–85.
- Richter K.W., Ipser H.* Transition metal-chalcogen systems XI: the platinum-selenium phase diagram // J. Phase Equilib. 1994. V. 15. P. 165–170.  
<https://doi.org/10.1007/BF02646360>
- Kullerud G.* Experimental techniques in dry sulfide research // Research Techniques for High Pressure and High Temperature / Ed. Ulmer G.C. N.Y.: Springer, 1971. P. 288–315.
- Varushchenko R.M., Druzhinina A.I., Sorkin E.L.* Low Temperature Heat Capacity of 1-Bromoperfluoroctane // J. Chem. Thermodyn. 1997. V. 29. № 6. P. 623–637.  
<https://doi.org/10.1006/jcht.1996.0173>
- Малышев В.В., Мильнер Г.А., Соркин Е.Л., Шибакин В.Ф.* Автоматический низкотемпературный калориметр // Приборы и техн. экспер. 1985. Т. 28. Вып. 6. С. 195–197.
- Archer D.G.* Thermodynamic properties of synthetic sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), standard reference material 720 and the effect of temperature scale on thermodynamic properties // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1993. V. 22. P. 1441–1453.  
<https://doi.org/10.1063/1.555931>
- Bissengaliyeva M.R., Gogol D.B., Taymasova S.T., Bekturjanov N.S.* Measurement of heat capacity by adiabatic calorimetry and calculation of thermodynamic functions of standard substances: copper, benzoic acid, and heptane (for calibration of an adiabatic calorimeter) // J. Chem. Eng. Data 2011.V. 56. P. 195–204.  
<https://doi.org/10.1021/je100658y>.
- <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Compositions>
- Ditmars D.A., Ishihara S., Chang S.S., Bernstein G.* Enthalpy and Heat-Capacity Standard Reference Material: Synthetic Sapphire (Alpha- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) from 10

- to 2250 K // J. Res. Natl. Bur. Stand. 1982. V. 87. № 2. P. 159–163.
16. Гуревич В.М., Хлюстов В.Г. Калориметр для определения низкотемпературной теплоемкости минералов. Теплоемкость кварца в интервале 9–300 K // Геохимия. 1979. Т. 17. № 6. С. 829.
  17. Maier C.G., Kelley K.K. An Equation for the representation of high-temperature heat content data // J. Am. Chem. Soc. 1932. V. 54. P. 3243–3246. <https://doi.org/10.1021/ja01347a029>
  18. Пашинкин А.С., Малкова А.С., Жаров В.В. Теплоемкость монотеллуридов галлия и индия // Журн. физ. химии. 1989. Т. 63. С. 1621.
  19. Svendsen S.R., Gronvold F., Westrum E.F. Thermo-dynamic properties of RuSe<sub>2</sub> from 5 to 1500 K // J. Chem. Thermodyn. 1987. V. 19. P. 1009–1022. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(87\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0021-9614(87)90011-5)
  20. Svendsen S.R. Decomposition pressures and thermo-dynamic properties of RuTe<sub>2</sub> // J. Chem. Thermodyn. 1977. V. 9. № 8. P. 789–800. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(77\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0021-9614(77)90023-4)
  21. Тюрин А.В., Чареев Д.А., Полотнянко Н.А., Хорошилов А.В., Пузанова И.Г., Зурский Н.А. Синтез и термодинамические функции дихалькогенидов рутения в широком интервале температур // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 11. С. 1272–1282. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23110155>
  22. Полотнянко Н.А., Тюрин А.В., Чареев Д.А., Хорошилов А.В., Попов Е.А. Синтез и термодинамические свойства дителлурида рутения // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 10. С. 1095–1104. <https://doi.org/10.31857/S0002337X2310010X>
  23. Barin I. Thermochemical Data of Pure Substances // VCH. 1995. V. 2. 1885 p.
  24. Столярова Т.А., Осадчий Е.Г. Стандартные энталпии образования селенидов платины PtSe<sub>2</sub> и PtSe<sub>0.8</sub> (Pt<sub>5</sub>Se<sub>4</sub>) из элементов // Геохимия. 2010. № 1. С. 98–100.
  25. Тюрин А.В., Изотов А.Д., Гавричев К.С., Злomanов В.П. Описание теплоемкости полупроводниковых соединений A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> с использованием фрактальной модели // Неорган. материалы. 2014. Т. 50. № 9. С. 979–982. <https://doi.org/10.7868/S0002337X14090164>
  26. Шебершнева О.В., Изотов А.Д., Гавричев К.С., Лазарев В.Б. Метод обработки данных низкотемпературной калориметрии с учетом мультифрактальности колебательных состояний атомов // Неорган. материалы. 1996. Т. 32. № 1. С. 36–40.
  27. Изотов А.Д., Гавричев К.С., Лазарев В.Б., Шебершнева О.В. Температурная зависимость теплоемкости веществ с мультифрактальной структурой // Неорган. материалы. 1994. Т. 30. № 4. С. 449–456.