

УДК 548.3

**ОСОБЕННОСТИ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КРИСТАЛЛАХ
АЦЕТИЛАЦЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ**

© 2011 В.Н. Серезкин*, Н.В. Сукачев, Л.Б. Серезкина, Д.В. Пушкин

*Самарский государственный университет**Статья поступила 18 июня 2010 г.**С доработки — 10 августа 2010 г.*

Для 12 ацетилацетонатов состава $M(\text{acac})_n$ ($n = 2, 3$ или 4) и $M(\text{acac})(\text{C}_2\text{H}_4)_2$ (M — металл) определены общая площадь (0S) граней полиэдров Вороного—Дирихле (ПВД), отвечающих всем межмолекулярным контактам одной молекулы в структуре кристалла, и суммарный объем пирамид (0V), в основании которых лежат такие грани, а в вершинах находятся ядра атомов, участвующих в межмолекулярных контактах. Рассмотрены важнейшие особенности невалентных взаимодействий. Установлено существование линейной зависимости энтальпии сублимации ацетилацетонатов от параметров 0S или 0V их молекулярных ПВД. Показано, что энтальпия сублимации $\text{Ga}(\text{acac})_3$ нуждается в уточнении и по теоретической оценке должна составить 124 кДж/моль.

Ключевые слова: энтальпия сублимации, структура кристаллов, полиэдры Вороного—Дирихле, невалентные взаимодействия, ацетилацетонаты, π -комплексы.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, одной из задач химии является выяснение взаимосвязи между химическим составом, строением и свойствами химических соединений. Недавно на примере углеводородов [1, 2], π -комплексов и карбониллов металлов [3, 4], бинарных оксидов и галогенидов [5] было показано, что кристаллоструктурные характеристики веществ, а именно параметры молекулярных полиэдров Вороного—Дирихле (ПВД), связаны линейной зависимостью с энтальпией сублимации веществ, которая является макроскопической оценкой энергии межмолекулярных взаимодействий в структурах кристаллов. Данная работа предпринята с целью проверки пригодности метода молекулярных ПВД (ММПВД) для выявления количественной взаимосвязи между энтальпией сублимации и структурой кристаллов ацетилацетонатов металлов, которые представляют практический интерес для использования в качестве прекурсоров в CVD процессах получения оксидных пленок и покрытий из газовой фазы [6—8].

Объектами исследования явились все известные к настоящему времени ацетилацетонаты, для которых одновременно выполнялись следующие условия: 1) установлена структура кристаллов, при этом определены координаты всех без исключения атомов; 2) отсутствует разупорядочение в размещении каких-либо атомов и 3) для вещества известна энтальпия сублимации. Кристаллоструктурные сведения были получены из Кембриджской базы данных [9], сведения об энтальпии сублимации взяты из работы [10]. Вышеуказанным требованиям удовлетворяли данные для 12 соединений, два из которых имели состав $M(\text{acac})_2$ ($M^{2+} = \text{Be}$ или Cu), 7 — $M(\text{acac})_3$ ($M^{3+} = \text{Al}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Ga}, \text{Fe}, \text{Mn}$ или Ru), 1 — $M(\text{acac})_4$ ($M^{4+} = \text{Zr}$) и 2 — $M(\text{acac})(\text{C}_2\text{H}_4)_2$ ($M^+ = \text{Ir}$ или Rh), где $\text{acac} = \text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2$.

* E-mail: serezhkin@ssu.samara.ru

МЕТОДИКА КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Основные принципы ММПВД уже неоднократно обсуждались [1—5]. Поэтому далее будут кратко рассмотрены лишь те характеристики и обозначения, которые используются при обсуждении результатов.

В процессе анализа для исследуемого вещества на основе фундаментальных кристаллоструктурных данных (пространственная группа, параметры элементарной ячейки и координаты базисных атомов) с помощью метода пересекающихся сфер [11], который использует параметры ПВД всех атомов и реализован (программа AutoCN) в комплексе программ TOPOS [12], определяются координационные числа (КЧ) всех t кристаллографически разных атомов A_i ($i = 1, 2, 3, \dots, j, \dots, t$). Одновременно устанавливаются основные характеристики ПВД атомов A_i . Такими характеристиками являются площадь (s_{ij}) каждой грани полиэдра и объем пирамиды (v_{ij}), в основании которой лежит общая грань ПВД атомов A_i и A_j , а в вершинах находится ядро атома A_i или A_j . Кроме того, на основании матрицы смежности, созданной программой AutoCN, определяется ранг граней (РГ) ПВД, который указывает особенности контактов между соответствующими атомами A_i и A_j . Как известно [2—5], в структуре любого вещества в зависимости от значения РГ парные межатомные взаимодействия A_i — A_j относятся к одному из трех типов. Так, грани с РГ = 1 эквивалентны химическим связям, все грани с РГ > 1 соответствуют внутримолекулярным невалентным взаимодействиям, а грани с РГ = 0 отвечают невалентным межмолекулярным взаимодействиям.

На основании полученных данных можно установить параметры молекулярных ПВД, которые возникают в результате объединения (его можно рассматривать как "склеивание" полиэдров по общей грани) ПВД атомов, входящих в состав одной молекулы. В качестве примера на рис. 1 показаны молекулярные ПВД в структурах $\text{Be}(\text{acac})_2$ и $\text{Cu}(\text{acac})_2$. В частности, молекулярный ПВД $\text{Cu}(\text{acac})_2$ (см. рис. 1, б) является результатом объединения ПВД 29 атомов, содержащихся в составе одной молекулы в структуре кристаллов. Эти ПВД в сумме имеют 462 грани, в том числе 274, 60, 76, 32 и 20 соответственно с РГ = 0, 1, 2, 3 и 4. В структуре молекулы ПВД химически связанных атомов обязательно имеют общую грань с РГ = 1 (например, фрагмент, отвечающий связи O1—C1 на рис. 1, в справа). Общую грань могут иметь и ПВД соседних атомов, которые содержатся в одной молекуле, но непосредственно друг с другом химически не связаны. Примером могут служить ПВД атомов H1 и H4, которые имеют общую грань с РГ = 4 (см. рис. 1, в, слева), или ПВД атомов O2 и O1 с общей гранью второго ранга (см. рис. 1, в, вверху). При объединении атомных ПВД в молекулярный ПВД обязательно исчезают все общие грани, которые эквивалентны химическим связям (РГ = 1) или внутримолекулярным межатомным взаимодействиям (РГ > 1). Поэтому огранка молекулярного ПВД будет осуществляться только гранями с РГ = 0, каждая из которых отвечает определенному контакту между двумя атомами разных молекул. Именно поэтому молекулярный ПВД $\text{Cu}(\text{acac})_2$, рас-

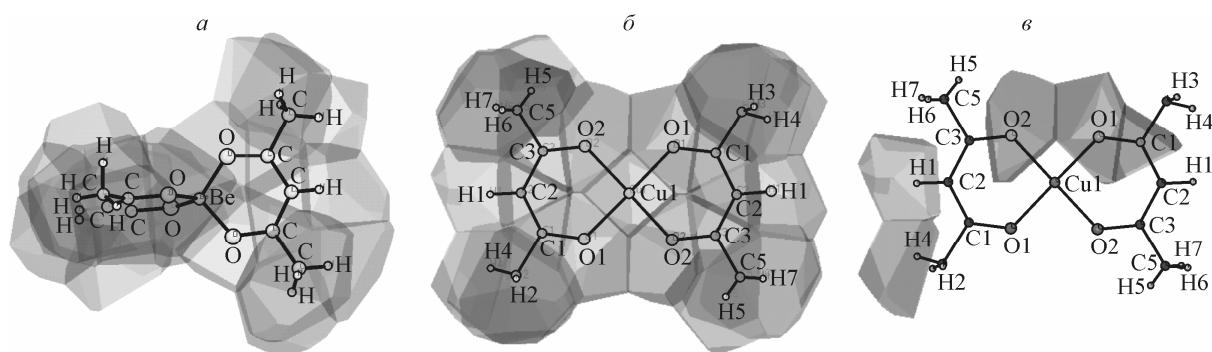


Рис. 1. Молекулярные ПВД в структурах $\text{Be}(\text{acac})_2$ {ACACBE02} (а) и $\text{Cu}(\text{acac})_2$ {ACACCU01} (б), а также фрагменты молекулярного ПВД $\text{Cu}(\text{acac})_2$ (в), показывающие форму ПВД атомов H1 и H4 (слева) и атомов O2, O1 и C1 (справа). Здесь и далее в фигурных скобках указан код вещества в Кембриджской базе структурных данных [9]

Т а б л и ц а 1

Некоторые характеристики кристаллов ацетилацетонатов*

Номер	Состав	Код в базе [9]	ΔH_{sub} , кДж/моль [10]**	V_{mol} , Å ³	Основные характеристики межмолекулярных взаимодействий				
					k	d_{min} , Å	d_{max} , Å	0S , Å ²	0V , Å ³
I	Al(acac) ₃	ALACAC16	120,0	425,5	348	2,30	4,54	443,5	230,3
II	Be(acac) ₂	ACACBE02	94,0	282,9	250	2,51	4,69	341,6	160,4
III	Co(acac) ₃	COACAC03	134,6	416,3	342	2,53	4,72	430,5	224,3
IV	Cr(acac) ₃	ACACCR05	123,0	427,5	332	1,99	4,72	445,6	229,8
V	Cu(acac) ₂	ACACCU01	122,6	273,7	274	2,63	4,17	302,6	158,6
VI	Fe(acac) ₃	FEACAC05	124,6	435,6	324	2,49	4,67	451,5	235,8
VII	Ga(acac) ₃	ACACGA02	90,0	413,1	340	2,28	4,81	440,9	220,0
VIII	Mn(acac) ₃	ACACMN21	124,7	429,6	334	2,56	4,67	445,7	232,2
IX	Ru(acac) ₃	ACACRU03	127,0	425,5	342	2,06	4,54	446,4	223,5
X	Zr(acac) ₄	ACACZR02	138,8	570,5	388	2,40	4,84	526,2	268,2
XI	Ir(acac)(C ₂ H ₄) ₂	HIDBEC	82,8	242,7	236	2,61	4,16	274,5	133,7
XII	Rh(acac)(C ₂ H ₄) ₂	ACDERH01	97,9	246,8	218	2,69	4,31	274,3	136,8

* V_{mol} — объем одной молекулы в структуре кристалла. Остальные обозначения поясняются в тексте статьи.

** Для VII, IX, XI и XII указано единственное значение ΔH_{sub} , имеющееся в справочнике [10]. Для остальных веществ, для которых в [10] содержится несколько значений ΔH_{sub} , установленных различными методами, учтены результаты, полученные (как и для XI или XII) эффузионным методом Кнудсена.

смагиваемый как единый многогранник (см. рис. 1, б), имеет 274 грани (k в табл. 1), поскольку все остальные 188 граней с РГ от 1 до 4 исчезли в процессе "склеивания".

С помощью программы InterMol комплекса TOPOS на основе данных о s_{ij} и v_{ij} для всех граней и пирамид с РГ = 0 можно установить два интегральных параметра молекулярных ПВД. Такими параметрами являются общая площадь (0S) всех граней с РГ = 0 у ПВД атомов, содержащихся в составе одной молекулы, и суммарный объем пирамид (0V), в основании которых лежат грани с РГ = 0, а в вершинах находятся ядра атомов молекулы. В рамках используемой модели параметры 0S и 0V молекулярных ПВД имеют четкий физический смысл. Так, величина 0S указывает общую площадь поверхности молекулы [13], а 0V характеризует объем той части электронной плотности молекулы, которая используется при межмолекулярных взаимодействиях, возникающих в кристаллическом веществе. Дополнительными характеристиками молекулярного ПВД являются общее число их граней с РГ = 0 (k), а также кратчайшее и самое длинное (соответственно d_{min} и d_{max}) расстояние между атомами соприкасающихся молекул. Для упрощения дальнейшего изложения условимся обозначать в общем случае невалентные контакты символом A/Z, в котором разделитель "/" указывает наличие общей грани у ПВД атомов A и Z. Если в составе вещества присутствуют атомы нескольких (например, g) разных элементов, то в структуре кристаллов теоретически могут реализоваться невалентные взаимодействия $g(g+1)/2$ типов. Чтобы количественно оценить относительную роль межмолекулярных контактов разной природы, как и ранее [1—5], введем для каждого типа взаимодействий A/Z параметр Δ_{AZ} , показывающий их парциальный вклад (в процентах) в величину интегрального параметра 0V молекулярного ПВД. В частности, в структурах ацетилацетонатов состава $\text{M}_c\text{A}_g\text{H}_b\text{O}_c$, для которых $g = 4$, могут существовать межмолекулярные контакты только десяти ($4 \cdot 5/2 = 10$) типов, при этом $\Delta_{\text{MM}} + \Delta_{\text{MO}} + \Delta_{\text{MC}} + \Delta_{\text{MH}} + \Delta_{\text{OO}} + \Delta_{\text{CO}} + \Delta_{\text{HO}} + \Delta_{\text{CC}} + \Delta_{\text{HC}} + \Delta_{\text{HH}} = 100 \%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важнейшие характеристики молекулярных ПВД рассмотренных ацетилацетонатов указаны в табл. 1, в которой каждому соединению присвоен порядковый номер (указан римской цифрой).

Т а б л и ц а 2

Парциальные вклады (%) межмолекулярных контактов в структурах I—XII в зависимости от природы атомов A/Z *

Номер соединения	Тип взаимодействия								Номер соединения	Тип взаимодействия							
	M/C	M/H	O/O	C/O	H/O	C/C	H/C	H/H		M/C	M/H	O/O	C/O	H/O	C/C	H/C	H/H
I	—	—	—	—	22,6	0,3	16,5	60,6	VII	—	—	—	0,1	25,0	0,1	17,3	57,5
II	—	0,4	<0,1	—	30,9	—	17,3	51,4	VIII	—	—	—	—	25,5	1,1	14,7	58,8
III	—	—	—	—	22,7	0,4	16,6	60,3	IX	—	—	—	—	26,0	0,4	16,3	57,4
IV	—	—	—	—	24,2	0,2	16,2	59,4	X	—	—	—	1,8	19,0	1,2	6,3	71,7
V	2,5	2,5	0,5	5,7	28,7	0,1	12,0	48,2	XI	—	3,9	—	—	13,4	<0,1	13,8	68,9
VI	—	—	—	—	25,6	0,7	15,5	58,2	XII	0,1	3,7	—	—	13,4	<0,1	13,6	69,3

* Межмолекулярные контакты типа M/M и M/O в структурах I—XII отсутствуют, поэтому соответствующие им колонки в таблице не указаны. Значения Δ округлены с точностью до одной десятой. Прочерк означает отсутствие соответствующего типа невалентных взаимодействий в структуре кристаллов.

рой), использующийся для удобства изложения. В структурах $M(\text{acac})_2$, $M(\text{acac})_3$, $M(\text{acac})_4$ и $M(\text{acac})(\text{C}_2\text{H}_4)_2$ КЧ атомов M равнялось 4, 6, 8 и 6 соответственно. В зависимости от состава молекул и строения кристаллов число граней молекулярного ПВД (k , табл. 1) изменяется от 218 (структура XII) до 388 (X), при этом в кристаллах I—XII на один атом молекулы в среднем приходится 8 межмолекулярных контактов. Как видно из табл. 2, основной вклад в межмолекулярные взаимодействия в структурах всех соединений вносят контакты трех типов — H/H, H/O и H/C, на которые в сумме приходится от 88,8 (структура V) до 99,8 % (IV и VII) величины 0V . Во всех случаях основную роль играют взаимодействия H/H (среднее $\Delta_{\text{HH}} = 60\%$), вклад контактов H/O и H/C для I—XII в среднем составляет ≈ 23 и 15 % соответственно. В большинстве кристаллов реализуются также взаимодействия C/C (единственное исключение — $\text{Be}(\text{acac})_2$ (II) с $\Delta_{\text{CC}} = 0$), однако их роль в организации структуры весьма незначительна, так как в среднем $\Delta_{\text{CC}} = 0,4\%$. Длина межмолекулярных контактов H/H, H/O, H/C и C/C в кристаллах I—XII лежит соответственно в диапазонах 1,99—4,72, 2,55—4,68, 2,68—4,84 и 3,49—4,15 Å. Парциальные вклады всех остальных возможных типов межмолекулярных контактов не превышают 6 %. При этом контакты типов M/M или M/O в кристаллах всех соединений вообще отсутствуют, в четырех случаях (структуры II, V, XI и XII) реализуются слабые взаимодействия M/H, в трех — C/O (V, VII, X), а в двух — M/C (V, XII) или O/O (II, V).

Учитывая имеющиеся в литературе сведения о ΔH_{sub} и найденные на основе структурных данных параметры молекулярных ПВД для ацетилацетонатов I—XII (см. табл. 1), с помощью регрессионного анализа была проведена проверка существования зависимостей $\Delta H_{\text{sub}} = aQ + b$, где Q — 0S или 0V . Согласно полученным результатам, предполагавшиеся линейные зависимости описываются уравнениями (1) и (2) (табл. 3, рис. 2, а, б) с коэффициентами корреляции в области 0,67—0,73. Из рис. 2, а и б видно, что максимальное отклонение от линии регрессии наблюдается для ацетилацетонатов меди и галлия, без учета которых коэффициенты корреляции увеличиваются до 0,93—0,95 (уравнения (3) и (4) в табл. 3). Примечательно, что экспериментальное значение ΔH_{sub} для $\text{Cu}(\text{acac})_2$ завышено, а для $\text{Ga}(\text{acac})_3$ занижено на ≈ 20 и 30 кДж/моль соответственно.

В связи с этим отметим, что в структуре $\text{Cu}(\text{acac})_2$ атомы меди реализуют квадратную координацию с КЧ 4. Четыре попарно параллельные грани ПВД, соответствующие связям Cu—O, не могут образовать замкнутый полиэдр вокруг атома металла и поэтому он способен к межмолекулярным взаимодействиям типа M/C и M/H, а специфическая квазиплоская форма молекулярного ПВД $\text{Cu}(\text{acac})_2$ способствует образованию межмолекулярных контактов C/O. По-видимому одновременная реализация многочисленных межмолекулярных контактов типа M/C, M/H и C/O (им отвечает 52 из 274 граней, общий парциальный вклад $\approx 11\%$, см. табл. 2), которые не

Т а б л и ц а 3

Зависимости, использующие параметры молекулярных ПВД ацетилацетонатов металлов

Число соединений	Номера соединений	Номер уравнения	Уравнение *	Коэффициент корреляции	Рисунок
12	I—XII	1	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,1536 \cdot {}^0S + 53,3$	0,675	2а
		2	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,2969 \cdot {}^0V + 54,7$	0,730	2б
10	I—IV, VI, VIII—XII	3	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,2088 \cdot {}^0S + 31,5$	0,933	—
		4	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,3802 \cdot {}^0V + 37,8$	0,948	—
21	**	5	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,2319 \cdot {}^0S + 22,6$	0,937	2в
		6	$\Delta H_{\text{sub}} = 0,4285 \cdot {}^0V + 28,0$	0,938	2г

* В указанных уравнениях параметры 0S , 0V и ΔH_{sub} даны в Å^2 , Å^3 и кДж/моль соответственно.

** Приведены результаты для ацетилацетонатов I—IV, VI, VIII—XII (см. табл. 2) и 11 π -комплексов, термодинамические и структурные параметры которых указаны в работе [3].

характерны для всех остальных ацетилацетонатов, и обуславливает завышенное значение ΔH_{sub} для $\text{Cu}(\text{acac})_2$. Для сравнения заметим, что в структуре $\text{Be}(\text{acac})_2$ с тетраэдрической координацией металла при том же КЧ 4 и стехиометрическом составе, аналогичном для $\text{Cu}(\text{acac})_2$, межмолекулярные взаимодействия М/С и С/О вообще отсутствуют, а контактам М/Н соответствует $\Delta_{\text{MH}} \approx 0,4\%$.

Учитывая anomalous отклонение от линии регрессии на рис. 2, а и б точки, отвечающей $\text{Ga}(\text{acac})_3$, сравним некоторые характеристики ацетилацетонатов восьмой (Fe, Ru) и тринадца-

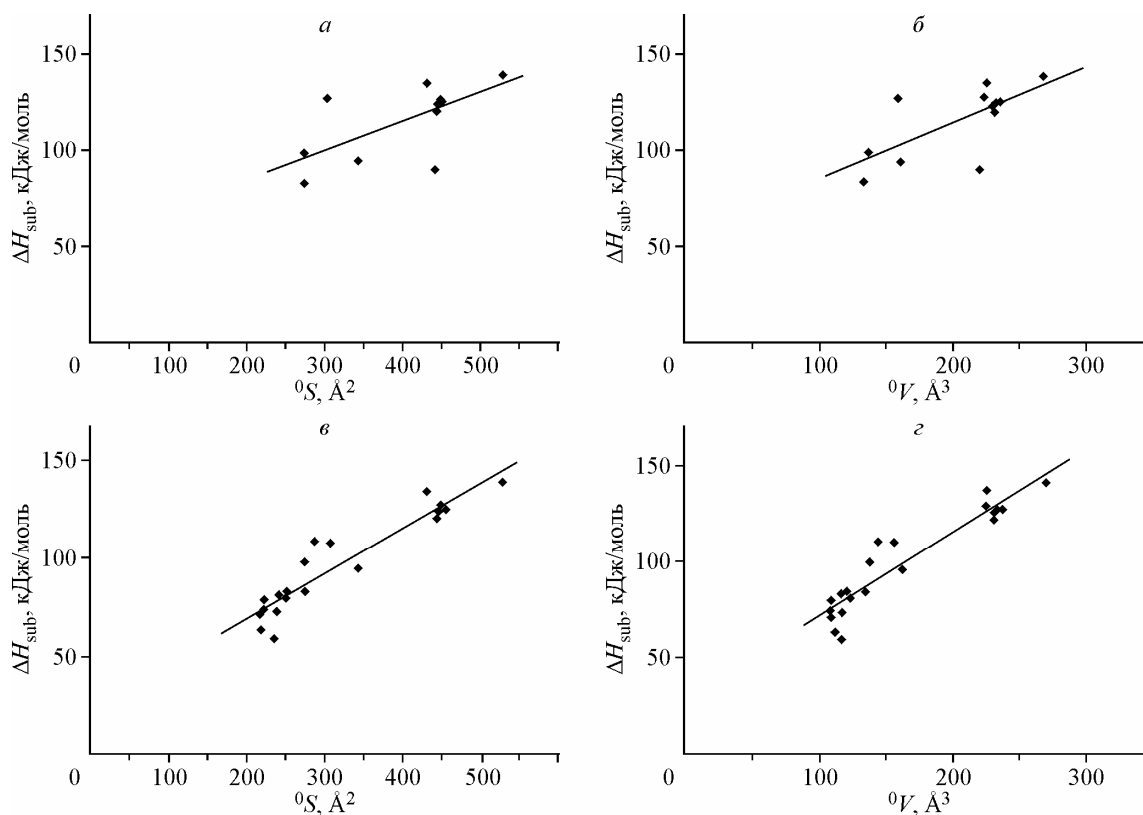


Рис. 2. Зависимость энтальпии сублимации ацетилацетонатов от параметра 0S (слева) или 0V (справа) их молекулярных ПВД. Соединения, характеристики которых были использованы при корреляционном анализе, и уравнения, соответствующие линиям регрессии на рисунках а—г, указаны в табл. 3

той (Al, Ga) групп периодической системы элементов. При переходе сверху вниз по подгруппе в парах $\text{Fe}(\text{acac})_3\text{—Ru}(\text{acac})_3$ и $\text{Al}(\text{acac})_3\text{—Ga}(\text{acac})_3$ происходит однотипное изменение молекулярной массы (увеличивается соответственно на ≈ 45 и 43 а.е.м.) и объема элементарной ячейки, приходящегося на одну формульную единицу (V_{mol} в табл. 1), который уменьшается на $10,1$ и $12,4 \text{ \AA}^3$ соответственно. В то же время с ростом молекулярной массы энтальпия сублимации для пары $\text{Fe}(\text{acac})_3\text{—Ru}(\text{acac})_3$ увеличивается (на $2,4$ кДж/моль), тогда как для пары $\text{Al}(\text{acac})_3\text{—Ga}(\text{acac})_3$ она, наоборот, резко уменьшается (на 30 кДж/моль). Поэтому, на наш взгляд, имеются основания считать, что единственное известное значение $\Delta H_{\text{sub}} = 90$ кДж/моль для $\text{Ga}(\text{acac})_3$ является ошибочным.

Отметим, что по данным ММПВД в структуре 11 одноядерных π -комплексов состава ML_2 , ML_3 и ML_2R_2 (L — циклопентадиенил, бензол или циклооктатетраенил, R = H или CH_3 , а M = Fe, Co, Ni, V, Ru, Cr, Mo, Ti, Yb или U), детально рассмотренных в работе [3], основной вклад в межмолекулярные взаимодействия вносят контакты Н/Н и Н/С, суммарный парциальный вклад которых составляет от 97 до 100 %. При этом как в π -комплексах, так и в ацетилацетонатах 0V составляет примерно половину объема, приходящегося на одну молекулу (соответственно 52(4) и 53(3) %). Поскольку межмолекулярные контакты Н/Н и Н/С (если не учитывать взаимодействия Н/О) являются важнейшими и в структуре рассмотренных ацетилацетонатов, можно было ожидать, что для π -комплексов и ацетилацетонатов должна существовать единая зависимость ΔH_{sub} от Q , где Q — 0S или 0V . При проверке этого предположения были учтены имеющиеся данные для всех 11 π -комплексов [3] и 10 ацетилацетонатов (исключение — обсуждавшиеся $\text{Cu}(\text{acac})_2$ и $\text{Ga}(\text{acac})_3$). Результаты регрессионного анализа показывают, что ожидавшиеся линейные зависимости описываются уравнениями (5) и (6) (см. табл. 3, рис. 2, в, г) с коэффициентами корреляции $\approx 0,94$. Относительная ошибка определения ΔH_{sub} по уравнениям (5) и (6) равна ≈ 7 % и сопоставима с погрешностью результатов рентгеноструктурного эксперимента рассмотренных соединений. Кроме того, следует учитывать, что и сама энтальпия сублимации соединений до сих пор определяется со сравнительно высокой погрешностью [10]. Поэтому, на наш взгляд, уравнения (5) и (6) можно использовать для оценки значений ΔH_{sub} ацетилацетонатов и π -комплексов, для которых имеются кристаллоструктурные данные. Например, рассчитанная по этим уравнениям величина ΔH_{sub} для обсуждавшегося выше $\text{Ga}(\text{acac})_3$ равна 124 кДж/моль. С учетом этого значения, как и следовало ожидать по аналогии с парой $\text{Fe}(\text{acac})_3\text{—Ru}(\text{acac})_3$, при переходе от $\text{Al}(\text{acac})_3$ к $\text{Ga}(\text{acac})_3$ энтальпия сублимации увеличивается на 4 кДж/моль.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-03-00206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СЕРЕЖКИН В.Н., СЕРЕЖКИНА Л.Б., ШЕВЧЕНКО А.П., ПУШКИН Д.В. // Журн. физ. химии. – 2005. – **79**, № 6. – С. 1058.
2. СЕРЕЖКИН В.Н., ШЕВЧЕНКО А.П., СЕРЕЖКИНА Л.Б., ПРОКАЕВА М.А. // Журн. физ. химии. – 2005. – **79**, № 6. – С. 1070.
3. СЕРЕЖКИН В.Н., ШЕВЧЕНКО А.П., СЕРЕЖКИНА Л.Б. // Координац. химия. – 2005. – **31**, № 7. – С. 495.
4. СЕРЕЖКИН В.Н., ПУШКИН Д.В., СЕРЕЖКИНА Л.Б. и др. // Журн. неорганической химии. – 2005. – **50**, № 12. – С. 2019.
5. СЕРЕЖКИН В.Н., ПРОКАЕВА М.А., ПУШКИН Д.В., СЕРЕЖКИНА Л.Б. // Журн. неорганической химии. – 2009. – **54**, № 9. – С. 1482.
6. СЫРКИН В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. – М.: Наука, 2000.
7. ЦЫГАНОВА Е.И., ДЯГИЛЕВА Л.М. // Успехи химии. – 1996. – **65**, № 4. – С. 334.
8. ЖАРКОВА Г.И., СТАБНИКОВ П.А., СЫСОВ С.А., ИГУМЕНОВ И.К. // Журн. структур. химии. – 2005. – **46**, № 2. – С. 328.
9. Cambridge Structural Database. Version 5.29. University of Cambridge, UK.
10. CHICKOS J.S., ACREE W.E. // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2002. – **31**, N 2. – P. 537.
11. СЕРЕЖКИН В.Н., МИХАЙЛОВ Ю.Н., БУСЛАЕВ Ю.А. // Журн. неорганической химии. – 1997. – **42**, № 12. – С. 2036.
12. БЛАТОВ В.А., ШЕВЧЕНКО А.П., СЕРЕЖКИН В.Н. // Координац. химия. – 1999. – **25**, № 7. – С. 483.
13. ПРОКАЕВА М.А., БАБУРИН И.А., СЕРЕЖКИН В.Н. // Журн. структур. химии. – 2009. – **50**, № 5. – С. 905.