

КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

УДК 54-386:546.11.28.47.542.732.742.547-327

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ ГЕКСАФТОРОСИЛИКАТОВ Co(II), Ni(II), Cu(II) И Zn(II) С НИКОТИНАМИДОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ[#]

© 2019 г. Т. Г. Черкасова^{1, *}, Н. В. Первухина^{2, 3}, Н. В. Куратьева^{2, 3}, В. А. Санникова¹,
Э. С. Татарина¹, Е. В. Черкасова¹

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
ул. Весенняя, 28, Кемерово, 650000 Россия

²Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630092 Россия

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия

*E-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Поступила в редакцию 05.02.2019 г.

После доработки 12.03.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

Получены из водных растворов и изучены методами химического, ИК-спектроскопического и рентгеноструктурного анализов новые комплексные соединения $[M(NA)_2(H_2O)_4]SiF_6 \cdot 2H_2O$, где $M^{2+} = Co, Ni, Zn$ (комплексы I, II, III соответственно), $NA = C_6H_6N_2O$ – никотинамид; $[Cu(NA)_2(SiF_6)(H_2O)_2] \cdot 2H_2O$ (IV) и $(HNA)_2SiF_6$ (V). Параметры элементарных ячеек: $a = 16.2448(18)$, $b = 6.8834(8)$, $c = 10.0767(11)$ Å, $\beta = 102.765(3)^\circ$, $V = 1098.92$ Å³, пр. гр. C2 для I; $a = 16.1591(7)$, $b = 6.8777(3)$, $c = 10.0314(5)$ Å, $\beta = 102.410(1)^\circ$, $V = 1088.82$ Å³, пр. гр. C2 для II; $a = 16.2265(6)$, $b = 6.8965(3)$, $c = 10.0696(5)$ Å, $\beta = 102.390(1)^\circ$, $V = 1100.60$ Å³, пр. гр. C2 для III; $a = 6.5915(4)$, $b = 7.7670(4)$, $c = 10.1506(5)$ Å, $\alpha = 110.7390(10)^\circ$, $\beta = 105.824(2)^\circ$, $\gamma = 95.448(2)^\circ$, $V = 456.868$ Å³, пр. гр. P1 для IV; $a = 14.1904(7)$, $b = 9.0468(4)$, $c = 11.8160(7)$ Å, $\beta = 106.277(2)^\circ$, $V = 1456.1$ Å³, пр. гр. C2/c для V. Комплексы I–III изоструктурны, представляют собой соединения ионного типа, образованные гексафторосиликат-анионами и комплексными катионами. Координационный полиэдр металла – малоискаженный октаэдр, построенный из атомов O четырех координированных молекул воды и двух атомов N двух пиридиновых колец двух молекул никотинамида, находящихся в *транс*-положении полиэдра. Соединение IV имеет полимерное цепочечное строение. Координационный полиэдр катиона меди представляет собой вытянутый по оси октаэдр, образованный двумя атомами N двух пиридиновых колец двух молекул никотинамида, двумя атомами O координированных молекул воды и двумя атомами F гексафторосиликат-анионов, выступающих в роли мостиков между соседними катионами. В структуре соединения V протонирован атом азота пиридинового кольца HNA^+ . Геометрия гексафторосиликат-анионов идентична во всех пяти соединениях. В структурах присутствуют разветвленные сети водородных связей.

Ключевые слова: комплексные соединения, медь(II), кобальт(II), никель(II), цинк(II), гексафторосиликат-анион, 3-пиридилийкарбоксамид-катион, никотинамид, РСА, ИК-спектроскопия

DOI: 10.1134/S0044457X19090058

ВВЕДЕНИЕ

Гетероциклические азотсодержащие соединения, являющиеся компонентами некоторых витаминов и лекарственных средств, важны для жизнедеятельности живых систем [1, 2]. В частности, никотинамид (NA) участвует в метаболических процессах человеческого организма [3–6], является компонентом ряда ферментов, например кофермента никотинамидадениндинуклеотида, и часто используется в синтезе комплексов

металлов для создания лекарственных препаратов [7]. Комплексы на основе NA являются перспективными соединениями с большой биологической активностью [8]. Никотинамид проявляет противовоспалительные свойства, его используют в качестве гидротропного агента в фармацевтической химии [9]. Так, с его помощью увеличивают растворимость нифедипина, индометацина. В работах [10–16] сообщается об антибактериальной и противогрибковой активности некоторых комплексов переходных металлов на основе никотинамида. Координационные соединения металлов-биоэлементов с NA представляют интерес

[#] Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.1134/S0044457X19090058.

не только как потенциальные биоактивные вещества, но и как комплексы с амбидентатными лигандами. Молекула NA имеет три потенциальных донорных атома: азот пиридинового кольца, азот аминогруппы и кислород карбонильной группы. Предпочтительно никотинамид координируется через атом азота пиридинового кольца [9]. В работах [17–21] описаны структуры координационных полимеров, в работе [22] – структура комплекса, в котором NA выступает в роли мостикового лиганда, координируясь через азот пиридинового кольца и кислород амидной группы.

Цель работы – синтез, ИК-спектроскопическое исследование и изучение структурных характеристик комплексных соединений $[M(NA)_2(H_2O)_4]SiF_6 \cdot 2H_2O$, где $M^{2+} = Co, Ni, Zn$ (комплексы I, II, III соответственно), $NA = C_6H_6N_2O$ – никотинамид, $[Cu(NA)_2(SiF_6)(H_2O)_2] \cdot 2H_2O$ (IV) и $(HNA)_2SiF_6$ (V).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез соединений. В качестве исходных веществ использовали $CoCO_3$, NiO , $2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$, $ZnCO_3$ марки “х. ч.”, раствор $H_2[SiF_6]$ с $\omega = 45\%$ (ч. д. а.) и NA квалификации “х. ч.”.

Гексафторосиликаты металлов $MSiF_6 \cdot 6H_2O$ ($M^{2+} = Co, Ni, Cu, Zn$) получены взаимодействием исходных веществ с $H_2[SiF_6]$ и последующей кристаллизацией при комнатной температуре [23].

Синтез соединений I–IV проводили смешением отдельно водных растворов $CoSiF_6 \cdot 6H_2O$ (0.309 г, 0.001 моль), $NiSiF_6 \cdot 6H_2O$ (0.309 г, 0.001 моль), $ZnSiF_6 \cdot 6H_2O$ (0.316 г, 0.001 моль), $CuSiF_6 \cdot 6H_2O$ (0.314 г, 0.001 моль) и NA (0.244 г, 0.002 моль). Полученные растворы оставляли для медленной кристаллизации при комнатной температуре. Образовавшиеся через несколько дней кристаллы отделяли от маточного раствора фильтрованием и сушили в эксикаторе над $CaCl_2$. Выход 70 (I), 75 (II), 67 (III), 90% (IV).

При разработке условий синтеза установлено, что добавление NA (0.244 г, 0.002 моль) в раствор гексафторокремниевой кислоты с $\omega = 9\%$ при перемешивании приводит через несколько дней к образованию бесцветных кристаллов $(HNA)_2SiF_6$ (V), которые отделяли от маточного раствора фильтрованием и сушили в эксикаторе над $CaCl_2$. Выход 56%.

Химический анализ выполняли гравиметрическим методом: на содержание SiF_6^{2-} – в виде $BaSiF_6$ [24], кобальта и никеля – в виде сульфатов, цинка – в виде 8-оксихинолината [25]. Содержание меди в соединении IV определяли фотокolorиметрическим методом [26]. Элементный

C, H, N-анализ выполнен на приборе ThermoFlash 2000.

ИК-спектры соединений I–V снимали на ИК-Фурье-спектрометре Cary 630 FTIR фирмы Agilent в интервале $4000–400\text{ см}^{-1}$ в матрице KBr. Основные частоты полос поглощения соединений ($\nu, \text{см}^{-1}$): I – 3621 (сл.), 3409 (ср.), 3258 (ср.), 1667 (ср.), 1623 (ср.), 1567 (ср.), 1439 (ср.), 1215 (сл.), 1065 (сл.) 744 (с.), 707 (с.); II – 3621 (сл.), 3409 (ср.), 3264 (ср.), 1673 (ср.), 1623 (ср.), 1567 (ср.), 1439 (ср.), 1221 (сл.), 1070 (сл.), 743 (с.), 707 (с.); III – 3621 (сл.), 3403 (ср.), 3319 (ср.), 1673 (ср.), 1623 (ср.), 1567 (ср.), 1439 (ср.), 1221 (сл.), 1065 (сл.) 746 (с.), 707 (с.); IV – ($\nu, \text{см}^{-1}$): 3532 (сл.), 3493 (сл.), 3370 (ср.), 1684 (ср.), 1634 (ср.), 1606 (ср.), 1450 (сл.), 1411 (ср.), 1210 (сл.), 1070 (сл.), 753 (с.), 685 (с.); V – 3392 (ср.), 1679 (ср.), 1623 (ср.), 1561 (ср.), 1427 (ср.), 1204 (ср.), 696 (с.).

РСА. Рентгеноструктурный эксперимент для соединений I–V выполнен на дифрактометре Bruker APEX DUO с 4K CCD-детектором с использованием ϕ - и ω -сканирования при 150(2) К. Поправки на поглощение введены с помощью программы SADABS [27], которая использует многократные измерения одних и тех же отражений при разных ориентациях кристалла. Структуры расшифрованы прямым методом и уточнены полноматричным МНК по F^2 в анизотропном приближении для неводородных атомов с использованием комплекса программ SHELXTL [28]. Атомы водорода органических лигандов локализованы из карт разностной электронной плотности и уточнены в приближении жесткого тела, атомы водорода молекул воды уточнены свободно в изотропном приближении с ограничением длины связи O–H 0.96 Å. В структурах I–III анион SiF_6^{2-} разупорядочен по двум симметрично связанным позициям с равной заселенностью положений.

Кристаллографические данные и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 1. Структурные данные для I–V депонированы в КБСД (CCDC 1983435–1983439) и могут быть свободно получены по запросу на сайте www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные вещества представляют собой устойчивые на воздухе мелкокристаллические порошки. Кристаллы III, V бесцветные, соединение I имеет розовую окраску, вещество II – голубую, комплекс IV синего цвета. Вещества разлагаются в концентрированных растворах серной и азотной кислот, в ДМСО, ДМФА, этилендиамина, не растворяются в ацетоне, этаноле, диэтиловом эфире, толуоле, *n*-углеводородах, спиртах (этиловом, бутиловом, изопропиловом, изобутиловом), ацетоне. Растворимость в воде при 25.0 ±

Таблица 1. Кристаллографические данные и условия дифракционного эксперимента для соединений I–V

Параметр	$C_{12}H_{24}CoF_6N_4O_8Si$ (I)	$C_{12}H_{24}FeN_4NiO_8Si$ (II)	$C_{12}H_{24}FeN_4O_8SiZn$ (III)	$C_{12}H_{20}CuF_6N_4O_8Si$ (IV)	$C_{12}H_{14}F_6N_4O_2Si$ (V)
<i>M</i>	553.37	553.15	559.81	521.95	388.36
Сингония, пр. гр.	Моноклиная, <i>C2</i>				
<i>a</i> , Å	16.245(2)	16.1591(7)	16.2265(6)	6.5915(4)	14.1904(7)
<i>b</i> , Å	6.8834(8)	6.8777(3)	6.8965(3)	7.7670(4)	9.0468(4)
<i>c</i> , Å	10.077(1)	10.0314(5)	10.0696(5)	10.1506(5)	11.8160(7)
α , град	102.765(3)	102.410(1)	102.390(1)	110.739(1)	106.277(2)
β , град	1098.9(2)/2	1088.81(9)/2	1100.60(8)/2	105.824(2)	1456.1(1)/4
γ , град	1.672	1.687	1.689	95.448(2)	1.772
V , Å ³ /Z	0.30 × 0.21 × 0.10	0.38 × 0.12 × 0.06	0.24 × 0.20 × 0.06	456.87(4)/1	0.20 × 0.16 × 0.10
$\rho_{\text{выч}}^{\text{г/см}^3}$	1.672	1.687	1.689	1.897	1.772
μ , мм ⁻¹	0.932	1.043	1.267	1.362	0.250
Размер кристалла, мм	0.30 × 0.21 × 0.10	0.38 × 0.12 × 0.06	0.24 × 0.20 × 0.06	0.28 × 0.26 × 0.16	0.20 × 0.16 × 0.10
Диапазон сбора данных по θ , град	2.07–27.15	2.08–27.54	2.07–27.52	2.27–27.53	2.70–27.56
Диапазон <i>h, k, l</i>	–20 ≤ <i>h</i> ≤ 19 –8 ≤ <i>k</i> ≤ 8 –10 ≤ <i>l</i> ≤ 12	–20 ≤ <i>h</i> ≤ 20 –8 ≤ <i>k</i> ≤ 8 –12 ≤ <i>l</i> ≤ 13	–13 ≤ <i>h</i> ≤ 20 –8 ≤ <i>k</i> ≤ 8 –13 ≤ <i>l</i> ≤ 13	–8 ≤ <i>h</i> ≤ 8 –10 ≤ <i>k</i> ≤ 9 –11 ≤ <i>l</i> ≤ 13	–17 ≤ <i>h</i> ≤ 18 –11 ≤ <i>k</i> ≤ 11 –15 ≤ <i>l</i> ≤ 15
I_{hkl} измеренных	4125	4446	4072	4045	6580
$I_{\text{hkl}} > 2\sigma_I$	2316 ($R_{\text{int}} = 0.0281$)	2380 ($R_{\text{int}} = 0.0202$)	2391 ($R_{\text{int}} = 0.0179$)	2104 ($R_{\text{int}} = 0.0215$)	1681 ($R_{\text{int}} = 0.0244$)
Число рефлекс-сов/огр./параметров	2316/34/156	2380/8/192	2391/8/192	2104/4/156	1681/0/114
R ($I > 2\sigma_I$)	$R_1 = 0.0731$ $wR_2 = 0.1999$	$R_1 = 0.0211$ $wR_2 = 0.0549$	$R_1 = 0.0207$ $wR_2 = 0.0526$	$R_1 = 0.0206$ $wR_2 = 0.0554$	$R_1 = 0.0267$ $wR_2 = 0.0768$
R (I_{hkl} изм.)	$R_1 = 0.0782$ $wR_2 = 0.2024$	$R_1 = 0.0222$ $wR_2 = 0.0558$	$R_1 = 0.0215$ $wR_2 = 0.0530$	$R_1 = 0.0209$ $wR_2 = 0.0555$	$R_1 = 0.0291$ $wR_2 = 0.0783$
Параметр абс. структур	0.54(7)	0.47(3)	0.47(2)		
Макс. и мин. остаточная эл. плотность, е/Å ³	1.323 и –1.358	0.388 и –0.238	0.370 и –0.297	0.409 и –0.360	0.369 и –0.268

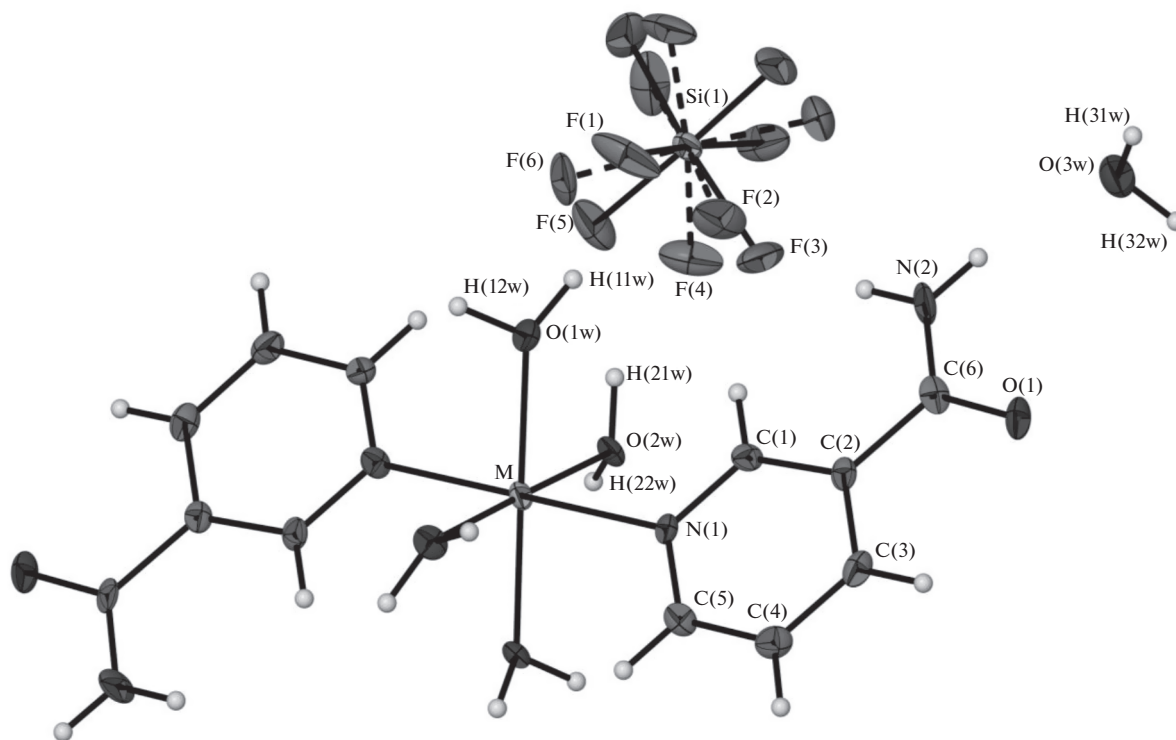


Рис. 1. Фрагмент структуры I–III. Пунктиром обозначена разупорядоченная часть гексафторосиликат-аниона.

$\pm 0.5^\circ\text{C}$ составляет для соединений: I – 0.08, II – 0.03, III – 0.15, IV – 0.02, V – 0.22 моль/л.

Поскольку, согласно концепции “жестких–мягких кислот и оснований”, ионы Co^{2+} относятся к “мягким” кислотам Льюиса, ионы Ni^{2+} и Cu^{2+} являются кислотами, занимающими промежуточное положение, а ион Si^{4+} является “жестким” акцептором электронных пар, возможно образование как ионных, так и полимерных соединений [29, 30]. Отнесение полос поглощения в ИК-спектрах веществ выполнено в соответствии с [31–35]. Молекулы воды в составе комплексов I–IV характеризуются наличием полос валентных колебаний $\nu(\text{OH})$ в интервале $3621\text{--}3403\text{ см}^{-1}$. Полосы валентных колебаний первичных амидов $\nu(\text{NH})$ регистрируются для NA при 3359 и 3152 см^{-1} , для соединений: при 3258 (I), 3264 (II), 3319 (III), 3370 и 3180 (IV), 3392 и 3219 см^{-1} (V), т.е. наблюдается некоторое смещение полос поглощения в низкочастотную область для соединений I–III и в высокочастотную – для веществ IV и V. Значения $\delta(\text{NH}_2)$ в комплексах смещаются в высокочастотную область до 1623 см^{-1} в соединениях I–III, до 1634 см^{-1} в комплексе IV по сравнению с $\delta(\text{NH}_2) = 1617\text{ см}^{-1}$ в NA. Частота $\nu(\text{CO})_{\text{NA}} = 1679\text{ см}^{-1}$ незначительно смещается в низкочастотную область до 1667 , 1673 , 1673 см^{-1} в соединениях I–III соответственно, в то время как в комплексе IV (1684 см^{-1}) наблюдается ее повыше-

ние, что может свидетельствовать об отсутствии связи атома кислорода амидной группы с атомом меди. Приведенные данные свидетельствуют, скорее, о неучастии амидной группировки в координации и отличии строения комплекса IV от других соединений. В большинстве комплексных соединений с никотинамидом координация иона металла осуществляется через атом азота пиридинового кольца [9, 17–21], но известны комплексы, в которых координация осуществляется через амидную группу [22]. Вероятно, NA координирован с ионами-комплексобразователями через гетероатом азота пиридинового кольца, что подтверждается смещением в ИК-спектрах комплексов в высокочастотную область $\nu_{\text{кольца}}$ в интервале $1600\text{--}1030\text{ см}^{-1}$ по сравнению со спектром “свободного” NA.

Полоса валентных колебаний октаэдрического аниона SiF_6^{2-} при 741 см^{-1} практически не смещается в соединениях I–III (744 , 743 , 744 см^{-1}), но претерпевает изменение в комплексе IV (756 см^{-1}), что свидетельствует о смене структурной роли гексафторосиликат-иона в этом соединении.

Монокристаллы веществ выделены при длительной изотермической кристаллизации из водных растворов соединений. Кристаллы комплексов I–III изоструктурны. Анализ массива отражений показал наличие нецентросимметричной

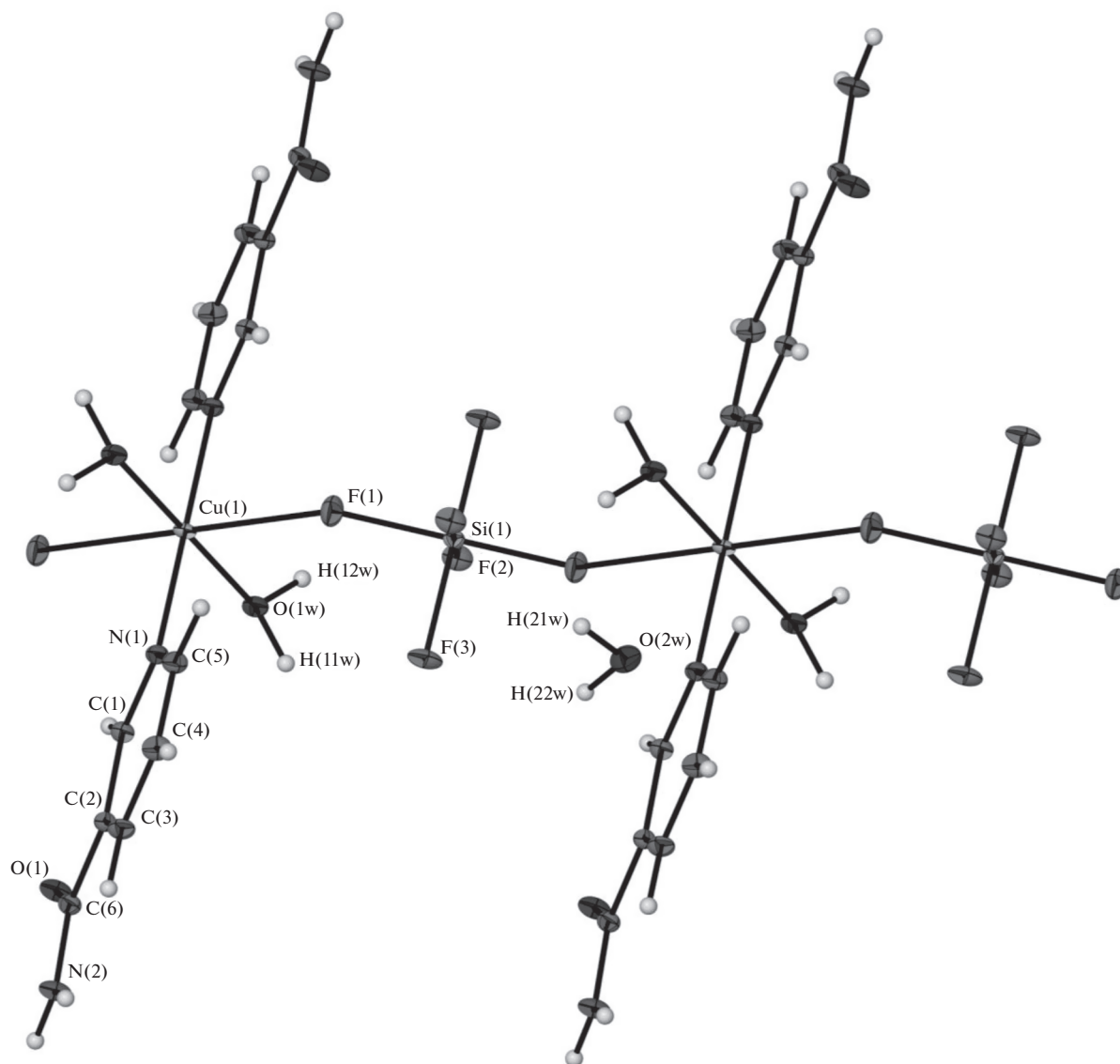


Рис. 2. Фрагмент полимерной цепочки в структуре IV.

группы у этой серии кристаллов. Возможными оказались варианты пр. гр. $C2$ и Cm . В результате структуры решены в моноклинной группе $C2$, так как показали лучшие параметры уточнения. Соединения имеют островное строение (рис. 1). В независимой части находится половина комплексного катиона, половина гексафторосиликат-аниона и одна молекула кристаллизационной воды. Координационный полиэдр катиона металла – малоискаженный октаэдр (валентные углы отличаются от идеальных на 3°), состоящий из атомов O четырех координационных молекул воды и двух атомов N пиридиновых колец никотинамида, находящихся в *транс*-положении полиэдра. Гексафторосиликат-анион выступает противоионом, не входя во внутреннюю координационную сферу металла. Катион металла и

атом Si занимают позиции на разных осях 2. В структуре присутствует разветвленная сеть водородных связей между аминогруппой NA и координированными молекулами воды в качестве донора H и кристаллизационными молекулами воды, гексафторосиликат-анионами и атомом O карбонильной группы NA в качестве акцептора водородной связи ($d(D...A)$ 2.71–2.99 Å).

В упаковке вдоль оси c чередуются катионные и анионные слои (рис. 2). Внутри катионных слоев происходит параллельное упорядочение π -систем NA лигандов по принципу “голова–хвост” с расстоянием ~ 3.5 Å между плоскостями лигандов соседних комплексных частиц (угол разворота плоскостей лигандов соседних катионов не превышает 2°). Центры катионов располагаются по

искаженному, согласно форме частицы, гексагональному закону в плоскости *ab*. Слои располагаются друг над другом практически без смещения. Анионные слои также образуют однослойную гексагональную укладку четко над и под центрами катионов.

Соединение IV кристаллизуется в триклинной сингонии и имеет полимерное цепочечное строение. Координационный полиэдр катиона меди (рис. 2) представляет собой вытянутый по оси октаэдр, образованный двумя атомами N двух пиридиновых колец никотинамида, двумя атомами O координированных молекул воды и двумя атомами F гексафторосиликат-анионов, выступающих в роли мостиков между соседними катионами. Атомы Cu и Si занимают две системы центров инверсии пространственной группы. Полимерные цепочки располагаются в ячейке параллельно оси *b* и образуют гексагональную упаковку стержней в этом же направлении. В структуре также присутствует разветвленная сеть водородных связей между аминогруппой NA и координированными молекулами воды в качестве донора H и кристаллизационными молекулами воды, гексафторосиликат-анионами и атомом O карбонильной группы NA в качестве акцептора водородной связи ($d(D...A)$ 2.77–2.92 Å).

Гексафторосиликат никотинамидия V кристаллизуется в моноклинной сингонии. В структуре соединения четко видно, что атом азота пиридинового кольца HNA⁺ протонирован. Вероятно, за счет этого нарушается общая сопряженность π-системы лиганда, так что угол разворота пиридинового кольца относительно амидной группы становится равным 38.1° (сравн. с 2.8° (I), 0.5°(II), 0.8° (III), 2.7°(IV)). В структуре образуется двухслойная гексагональная укладка совместных катионно-анионных слоев вдоль оси *b*. При этом плоскость пиридинового кольца HNA⁺ развернута почти перпендикулярно (70.0°) плоскости гексагонального слоя. Атомы Si гексафторосиликат-анионов занимают одну из двух систем осей 2, тогда как весь катион располагается в общем положении. В структуре присутствуют водородные связи: сильная “кислая” водородная связь между протонированным пиридиновым кольцом HNA⁺ и выступающей акцептором водородной связи карбонильной группой соседнего катиона ($d(D...A)$ 2.66 Å) и две водородные связи средней силы с участием аминогруппы типа N–H...F ($d(D...A)$ 2.85 и 2.92 Å).

Геометрия гексафторосиликат-анионов во всех пяти соединениях идентична.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования комплексов I–III показали, что для них характерны островные

структуры, состоящие из изолированных катионов $[M(NA)_2(H_2O)_4]^{2+}$, анионов SiF_6^{2-} и кристаллизационных молекул воды, как это ранее наблюдалось в гексафторосиликатах комплексов кобальта(II) с DMSO и DMFA [36]. В то же время структура соединения IV [37] существенно отличается. Вещество IV имеет полимерное цепочечное строение, в котором гексафторосиликат-анионы выступают в роли мостиков между соседними катионами, координационный полиэдр катиона меди – вытянутый по оси октаэдр. Структура гексафторосиликата комплекса меди(II) с DMSO островная, построенная из нейтральных координирован одним атомом фтора к катиону меди(II), координационное окружение катиона меди(II) квадратно-пирамидальное. Таким образом, различие в структурах определяется способом координации анионов SiF_6^{2-} .

Кроме того, получен и структурно охарактеризован гексафторосиликат никотинамидия (HNA)₂SiF₆ (V), в котором атом азота пиридинового кольца HNA⁺ протонирован.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Результаты элементного анализа соединений I–V.

Таблица S2. Основные межатомные расстояния (*d*, Å) и величины углов (град) для I–IV.

Таблица S3. Основные межатомные расстояния (*d*, Å) для V.

Рис. S1. Упаковка чередующихся катионных и анионных слоев в I–III (показана разным цветом).

Рис. S2. Гексагональный катионно-анионный слой в структуре V.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kose D.A., Necefogly H. // Therm. Anal. Calorim. 2008. V. 93. № 2. P. 509.
2. Кокшарова Т.В., Гриценко И.С., Курандо С.В. и др. // Вісник ОНУ. 2009. Т. 14. № 12. С. 91.
3. Sayin E., Kurkcuoglu G.S., Yesilel O.Z. et al. // J. Mol. Struct. 2015. V. 1096. P. 84. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.04.046>
4. Puchonova M., Repicka Z., Moncol J. et al. // J. Mol. Struct. 2015. V. 1092. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.02.086>
5. Dilip C.S., Thangaraj V., Paul Raj A.P. // Arab. J. Chem. 2016. V. 9. P. 731. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2011.07.016>
6. Tella A.C., Owalude S.O., Ajibade P.A. et al. // J. Mol. Struct. 2016. V. 1125. P. 570. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.07.016>
7. Vaskova Z., Kitanovski N., Jaglicic Z. et al. // Polyhedron. 2014. V. 81. P. 555. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2014.07.017>

8. *Al-Saif F.A., Refat M.S.* // J. Mol. Struct. 2012. V. 1021. P. 40.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.04.057>
9. *Dziewulska-Kulaczkoska A., Mazur L., Ferenc W.* // J. Therm. Anal. Calorim. 2009. V. 96. № 1. P. 255.
10. *Smith N.A., Zhang P., Salassa L. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2017. V. 454. P. 240.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.06.014>
11. *Ozbek F.E., Sertcelik M., Yuksek M. et al.* // J. Mol. Struct. 2017. V. 1150. P. 112.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.08.074>
12. *Askin G.S., Necefoglu H., Tonbul A.M. et al.* // Acta Crystallogr., Sect. E. 2015. V. 71. P. 479.
<https://doi.org/10.1107/S2056989015006490>
13. *Bozkurt N., Dilek N., Delibas N.C. et al.* // Acta Crystallogr., Sect. E. 2013. V. 69. P. 389.
<https://doi.org/10.1107/S1600536813015948>
14. *Sharnin V.A., Dushina S.V., Grazhdan K.V. et al.* // J. Chem. Therm. 2015. V. 82. P. 116.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2014.11.004>
15. *Altun O., Suozer M.* // J. Mol. Struct. 2017. V. 1149. P. 307.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.07.069>
16. *Tella A.C., Owalude S.O., Ajibade P.A. et al.* // J. Mol. Struct. 2016. V. 1125. P. 570.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.07.016>
17. *Baig R.B.N., Vaddula B.R., Nadagouda M.N. et al.* // J. Royal Soc. Chem. 2015. V. 17. P. 1243.
18. *Li C., Cui F., Zhang H. et al.* // Spectrochim. Acta. Part A: Mol. and Biomol. Spectr. 2015. V. 134. P. 367.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.06.080>
19. *Chisca D., Croitor L., Petunov O. et al.* // CrystEngComm. 2018. V. 20. P. 432.
<https://doi.org/10.1039/c7ce01988b>
20. *Arici M., Yesilel O.Z., Acar E. et al.* // Polyhedron. 2017. V. 127. P. 293.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2017.02.013>
21. *Gor K., Kurkuogly G.S., Yesilel O.Z. et al.* // J. Mol. Struct. 2014. V. 1060. P. 166.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.12.024>
22. *Xue J., Hua X., Li W. et al.* // J. Mol. Struct. 2014. V. 1059. P. 108.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.11.001>
23. *Yildirim T., Kose D.A., Avci E. et al.* // J. Mol. Struct. 2019. V. 1176. P. 576.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.02.086>
24. *Рысс И.Г.* Химия фтора и его неорганических соединений. М.: Госхимиздат, 1956. 718 с.
25. *Мышляева Л.В., Краснощекоев В.В.* Аналитическая химия кремния. М.: Наука, 1972. 212 с.
26. *Шарло Г.* Методы аналитической химии. М.: Химия, 1965. 976 с.
27. *Sheldrick G.M.* SADABS. Version 2.01. Bruker AXS Inc. Madison, Wisconsin, USA, 2004.
28. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. 2015. V. 71. P. 3.
29. *Pearson R.G.* // J. Chem. Educ. 1985. V. 45. P. 581.
30. *Гарновский А.Д., Садименко А.П., Осипов О.А. и др.* Жестко-мягкие взаимодействия в координационной химии. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовск. ун-та, 1986. 272 с.
31. *Накамото К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и коорд. соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
32. *Садиков Г.Г., Анцышкіна А.С., Кокшарова Т.В. и др.* // Кристаллография. 2007. Т. 52. № 5. С. 847. [*Sadikov G.G., Antsyskina A.S., Koksharova et al.* // Cryst. Reports. 2007. V. 52. № 5. P. 819.
<https://doi.org/10.1134/S1063774507050112>]
33. *Jain S.C., Rivest R.* // Can. J. Chem. 1969. V. 47. P. 2209.
34. *Смит А.* Прикладная ИК-спектроскопия. М.: Мир, 1982. 328 с.
35. *Преч Э., Бюльманн Ф., Афвольтер К.* Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 438 с.
36. *Черкасова Т.Г., Багрянская И.Ю., Первухина Н.В. и др.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 6. С. 776. [*Cherkasova T.G., Bagryanskaya I.Yu., Pervukhina N.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2017. V. 62. № 6. P. 760.]
<https://doi.org/10.7868/S0044457X17060022>
37. *Черкасова Т.Г., Первухина Н.В., Куратьева Н.В. и др.* // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 7. С. 858. [*Cherkasova T.G., Pervukhina N.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 7. P. 899.
<https://doi.org/10.1134/S0036023618070045>]